



Análisis de la operación y fiabilidad de los recuperadores de energía comerciales basados en cámaras isobáricas instalados en Canarias y estudio de la adaptación de dichos equipos al régimen de operación variable a diferentes escalas

Máster en Eficiencia Energética

22/12/2015

Autora: Sigrid Yurena Arenas Urrea

Tutores: Felipe Díaz Reyes (ULPGC) y Baltasar Peñate Suárez (ITC)

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO.....	1
LISTADO DE TABLAS	2
LISTADO DE FIGURAS	3
LISTADO DE ABREVIATURAS.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. JUSTIFICACIÓN	7
3. OBJETIVOS.....	7
4. DESALACIÓN DE AGUA POR ÓSMOSIS INVERSA Y SU CONSUMO ENERGÉTICO	8
5. ESTADO DEL ARTE DE LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN LA DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA.....	10
6. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN LA DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA EN CANARIAS.....	19
7. VALORACIÓN CUALITATIVA Y CUANTITATIVA DE LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA POR CÁMARAS ISOBÁRICAS EN CANARIAS	25
7.1 Recopilación de información.....	25
7.2 Análisis de los sistemas de recuperación de energía instalados.....	27
7.3 Análisis de la evolución de los sistemas de recuperación de energía en la desalación por OI.....	35
7.4 Análisis de las bombas de alta presión comúnmente instaladas.....	46
8 ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA QUE MEJOR SE ADAPTAN A LA OPERACIÓN CON ENERGÍAS RENOVABLES	49
9 CONCLUSIONES	62
AGRADECIMIENTOS.....	64
BIBLIOGRAFÍA.....	65
ANEXO I: Cálculos.....	70
ANEXO II: Entrevistas realizadas.....	80

RESUMEN EJECUTIVO

La obtención de agua desalada a través de procesos de desalación basados en ósmosis inversa (OI) es una técnica extendida en las Islas Canarias. Sin embargo la OI requiere de un gran consumo de energía, el cual se puede reducir mediante la aplicación de sistemas de recuperación de energía, contribuyendo a su vez, a reducir los costes de agua producida por metro cúbico. Es por ello que este trabajo se centra en el estudio de los sistemas de recuperación de energía comúnmente instalados en Canarias, basados principalmente en cámaras isobáricas (CIP).

En la primera parte de este trabajo se analiza el comportamiento de los diferentes tipos de CIP, basándose en la experiencia de varias plantas que actualmente están en funcionamiento en Canarias, con el fin de establecer cuál es el sistema más adecuado para ser instalado en el futuro en plantas de mediana y gran capacidad.

Por otro lado, en la segunda parte de este trabajo se estudia en profundidad la adaptación de estos dispositivos en plantas desaladoras de OI bajo condiciones variables de energía, enfocándolo también a plantas de mediana y gran capacidad.

El concepto innovador que introduce este trabajo es el análisis del comportamiento de los distintos tipos de cámaras isobáricas en condiciones reales de funcionamiento para su adaptación con energías renovables mediante sistemas de almacenamiento de energía, sistemas de gestión de la carga o sistemas de control y seguimiento.

LISTADO DE TABLAS

- Tabla 1: Clasificación de los sistemas de recuperación de energía más actuales. (Elaboración propia).
- Tabla 2: Número de plantas desaladoras por OI y producción de agua desalada en Canarias (2012).
- Tabla 3: Principales centros de producción de agua desalada en Gran Canaria.
- Tabla 4: Estimación de la demanda de agua por sectores en Canarias para el año 2015 (hm³/año).
- Tabla 5 : Ahorro energético estimado en desaladoras públicas.
- Tabla 6: Resumen de los datos principales obtenidos en los diagramas Sankey.
- Tabla 7: Parámetros de funcionamiento de las Plantas desaladoras por OI visitadas (Elaboración propia).
- Tabla 8: Ventajas, desventajas y mantenimientos que tienen los diversos sistemas de recuperación de energía, basados en cámaras isobáricas (Elaboración propia).
- Tabla 9: Características principales de las bombas centrífugas y de desplazamiento positivo.
- Tabla 10: Comparación entre diferentes diseños de bombas centrífugas.
- Tabla 11: Marca /Modelo de las bombas de alta presión de las plantas visitadas (Elaboración propia).
- Tabla 12: Promedio de los costos de algunas combinaciones tecnológicas .
- Tabla 13: Datos de una planta sin recuperador de energía (Elaboración propia).
- Tabla 14: Datos de una planta con recuperador de energía tipo Turbina Francis (Elaboración propia).
- Tabla 15: Datos de una planta con recuperador de energía del tipo ERI-PX (Elaboración propia).

LISTADO DE FIGURAS

- Figura 1: Evolución de la reducción del consumo de energía en la desalación por OI .
- Figura 2: Diagrama del proceso de desalación por OI con un recuperador de energía CIP.
- Figura 3: Dispositivo KSB Saltec DT.
- Figura 4: Dispositivo Aqualyng.
- Figura 5: Dispositivo DWEER™.
- Figura 6: Dispositivo OSMOREC.
- Figura 7: Dispositivo RO-KINETIC.
- Figura 8 : Dispositivo ERI-PX.
- Figura 9: Dispositivo iSave
- Figura 10: Dispositivo bomba Danfoss.
- Figura 11: Dispositivo bomba Clark.
- Figura 12: Evolución de la capacidad de agua desalada en Gran Canaria (m³/d).
- Figura 13: Demanda energética (%) en desalación de instalaciones públicas en Canarias.
- Figura 14: Nuevos sistemas de recuperación de energía para plantas de OI a pequeña escala RO-Boost™ (Izquierda) e ISOBARIX (Derecha).
- Figura 15: Nuevo sistema de recuperación de energía para plantas de OI de mediana escala, Salino Pressure Center de KSB.
- Figura 16: Diagrama Sankey de la planta desaladora (nº2, Anexo II) sin recuperador de energía.
- Figura 17: Diagrama Sankey de la planta desaladora (nº2, Anexo II) con Turbina Francis.
- Figura 18: Diagrama Sankey de la planta desaladora (nº2, Anexo II) con sistema ERI-PX.

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHOS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

- Figura 19: Tipos de diseños de las bombas de alta presión.
- Figura 20: Imagen del programa LG Nano H₂O.
- Figura 21: Datos obtenidos en la simulación con el programa LG Nano H₂O.

LISTADO DE ABREVIATURAS

- CIP: Cámaras isobáricas.
- CSX: Bomba de alta presión del tipo segmentada.
- CV: Destilación por Compresión Vapor
- DMX: Bomba de alta presión del tipo carcasa partida axialmente.
- EDR: Electrodiálisis.
- EERR: Energías renovables.
- EO: Energía eólica.
- FV: Energía fotovoltaica.
- ITC: Instituto tecnológico de Canarias.
- ME: Destilación por Efectos Múltiples
- MSF: Destilación Súbita con Múltiples Etapas
- OI: Ósmosis Inversa
- PLC: controladores lógicos programables
- SWRO: Desalación de agua de mar por ósmosis inversa.
- TDS: sólido totales disueltos.
- VFD: Variador de frecuencia.

1. INTRODUCCIÓN

La política energética actual y la importancia de la energía en las sociedades modernas nos han llevado a depender de los combustibles fósiles. Sin embargo, como bien sabemos, las fuentes de energía convencionales se están agotando y por lo tanto es necesario encontrar otras alternativas como son las energías renovables.

Por otro lado, el consumo de agua potable ha aumentado considerablemente, debido al crecimiento de la población y del nivel de vida, en consecuencia también ha aumentado la capacidad de producción de agua potable, la cual se obtiene en determinados entornos mediante procesos de desalación tanto de agua de mar como de agua salobre. La desalación es un proceso que está bien extendido a nivel mundial y comprende diferentes tecnologías, pero requiere una gran cantidad de energía. Por ello la combinación de energías renovables y desalación de aguas han sido objeto de estudio desde hace tiempo, siendo interesante su aplicación para zonas aisladas donde hay escasez de agua y energía.

Centrándonos en Canarias, donde afortunadamente abunda el sol y el viento y existe una experiencia de casi 50 años en la explotación de plantas desaladoras, este trabajo profundiza en la evolución que han sufrido los sistemas de recuperación de energía más comerciales (basados en cámaras isobáricas), en términos de operación, fiabilidad y consumo específico. Por otro lado, también se estudian los sistemas de recuperación que mejor se adaptan a un suministro de potencia variable, como consecuencia del modo de operación con energías renovables en aislado.

2. JUSTIFICACIÓN

La justificación de este trabajo se basa en la necesidad de conocer varios factores importantes a tener en cuenta sobre los diferentes sistemas de recuperación de energía (basados en cámaras isobáricas) en plantas de Ósmosis Inversa (OI), con el objetivo de poder compararlos y así determinar qué sistema de recuperación, disponible en el mercado, es el más adecuado para ser instalado en futuras plantas de mediana y gran escala.

Por otro lado, también hay una gran necesidad de analizar cómo afectaría a estos dispositivos un suministro de potencia variable, para su aplicación con energías renovables.

En base a estas necesidades surge este trabajo, en cuya primera parte se analiza las condiciones de operación en tiempo real de diversos dispositivos instalados en las plantas desaladoras de Canarias. Con respecto a la segunda parte de este trabajo, ésta se ha llevado a cabo con las aportaciones y orientaciones de los tutores, unido a una intensa búsqueda en la literatura, debido a la poca experiencia real que existe en ese campo de investigación.

3. OBJETIVOS

El presente trabajo tiene varios objetivos. El primero es profundizar en la enorme experiencia, de más de 15 años, que existe en Canarias respecto a la operación y mantenimiento de sistemas de recuperación de energía basados en cámaras isobáricas y documentarla. El segundo es aportar información de mucho interés, tras un profundo análisis, sobre la adaptabilidad de estos equipos al régimen variable (en el caso de operar con energías renovables) enfocado a plantas desaladoras de mediana y gran escala. Finalmente se comentará brevemente que tipo y marca de bombas de alta presión son las más empleadas en las plantas desaladoras en Canarias.

4. DESALACIÓN DE AGUA POR ÓSMOSIS INVERSA Y SU CONSUMO ENERGÉTICO

Los procesos de desalación se dividen en dos categorías principales, los procesos térmicos o procesos de membrana. Los procesos de desalación térmica o también denominada como destilación, se comenzaron a utilizar en la década de 1950¹, siendo los países de Oriente Medio los pioneros en el diseño e implementación de la destilación del agua de mar. Primero utilizaron un proceso llamado destilación multi-efecto (MED) y más tarde usaron un proceso llamado destilación flash multi-etapa (MSF)². Mientras la destilación se mantenía como la tecnología principal empleada en el Medio Oriente, se fueron desarrollando los procesos de membranas en la década de 1960³. Hoy en día, el Medio Oriente posee el 50%⁴ de la capacidad de desalación del mundo y utiliza principalmente la tecnología de MSF.

En el año 1999, el 78% de la capacidad de agua potable se producía con plantas MSF mientras que con la tecnología de OI sólo se producía el 10%⁵. Sin embargo, se ha ido incrementado la producción de agua potable con la tecnología de OI, debido a su menor costo, con respecto a las demás tecnologías, a la simplicidad del proceso y a su capacidad de modularidad, permitiendo aumentar su capacidad de forma escalonada.

En el año 2001, en los países fuera de Oriente Medio la capacidad de agua desalada producida por desalación por OI era del 51% y en el 2003 representó el 75 %⁶. Sin embargo los países de Oriente Medio siguen utilizando la destilación debido a los recursos de combustibles fósiles de fácil acceso y a la mala calidad del agua de alimentación local. De tal modo que en países como el Golfo Pérsico y el Golfo de Omán, donde las aguas tienen altas salinidades, elevadas temperaturas y un alto potencial de ensuciamiento de las membranas, la presión requerida para la desalación mediante membranas puede ser mayor que la presión máxima permisible de los módulos de la planta de OI. Por lo que en estos casos es mejor utilizar la desalación por destilación ya que al proceso no le afecta ni las altas temperaturas ni una alta concentración de sólidos en suspensión.

¹ Gleick, P.H., 2006. *The World's Water 2006–2007, The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island Press, Chicago.

² Van der Bruggen, B., Vandecasteele, C., 2002. Distillation vs. membrane filtration: overview of process evolutions in seawater desalination. *Desalination* 143, 207–218.

³ Loeb, S., Sourirajan, S., 1963. Seawater demineralization by means of an osmotic membrane. *Advances in Chemistry Series* 38, 117–132.

⁴ Henthorne, L., 2003. Desalination today. *Southwest Hydrology*, 12–13.

⁵ Akili D. Khawajia, Ibrahim K. Kutubkhanaha, Jong-Mihn Wieb, 2007, Advances in seawater desalination technologies, *Desalination* 221, 47–69.

⁶ Lauren F. Greenleaa, Desmond F. Lawlerb, Benny D. Freeman, Benoit Marrotc, Philippe Moulinc, 2009, Reverse ósmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges, *Water Research*, 43, 2317 – 2348.

La OI es hoy en día la tecnología líder de desalación de agua de mar. Como se ha comentado previamente ha superado a la tecnología térmica convencional, tal como la destilación MED y la MSF, además de otras tecnologías desarrolladas como la destilación por membrana (MD) y la compresión de vapor (CV).

El interés comercial en la tecnología OI está aumentando a nivel mundial debido a la mejora continua del proceso, que a su vez conduce a importantes reducciones de costes. Estos avances incluyen desarrollos en los materiales de las membranas, en el diseño del módulo, en el diseño del proceso, en el pre-tratamiento del agua de alimentación y en la recuperación de energía para la reducción del consumo energético. Algunos de esos desarrollos implican que con una mayor fuerza mecánica, biológica y química de las membranas de OI, se consigue el aumento de la permeabilidad, además también se han desarrollado métodos para reducir al mínimo el ensuciamiento y la polarización por concentración en las membranas para así maximizar la recuperación del flujo permeado y conseguir reducir el costo de la membrana por unidad de volumen de agua producida. Por otro lado, con las mejoras en los sistemas de recuperación de energía también se consigue una reducción en el consumo energético de la planta bastante significativo, de 12 kWh/m³ en los años 70 a aproximadamente 2 kWh/m³ en el 2006 como puede verse en la figura 1. Actualmente el consumo de energía en la desalación por OI, usando cámaras isobáricas y para una planta de mediana capacidad, es inferior a 3 kWh/m³ ⁷.

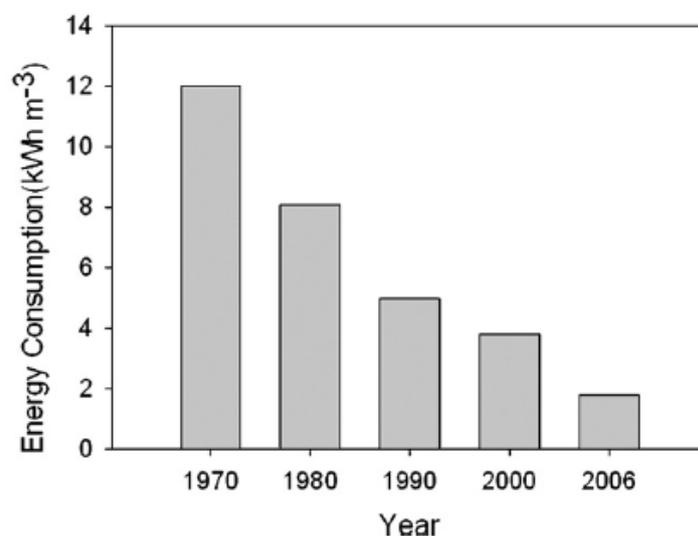


Figura 1: Evolución de la reducción del consumo de energía en la desalación por OI ⁸.

⁷ Kah Peng Lee, Tom C. Arnot, Davide Mattia, 2010, A review of reverse ósmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential, *Journal of Membrane Science* 370, 1–22.

⁸ Kah Peng Lee, Tom C. Arnot, Davide Mattia, 2010, o.c.

5. ESTADO DEL ARTE DE LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN LA DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA.

La tendencia actual a nivel mundial es la instalación de plantas de desalación de OI debido a su menor consumo energético⁹. El mayor consumo de energía en las plantas de ósmosis inversa tiene lugar en la bomba de alta presión. Sin embargo hay varios modos de reducir el consumo específico en una planta desaladora, por ejemplo, mediante desarrollos en los materiales de las membranas que nos permitan obtener un mayor caudal de permeado con la misma o menor presión de trabajo, en el diseño del proceso mejorando las condiciones de operación y mantenimiento de las plantas, en el pre-tratamiento del agua de alimentación y en la recuperación de energía, optimizando los sistemas actuales o bien desarrollando nuevos dispositivos con mejores resultados. En este trabajo nos centramos en los dispositivos que nos permiten recuperar la energía en forma de presión proveniente de la salmuera para así reducir el consumo de la bomba de alta presión y por lo tanto el coste energético del agua desalada por metro cúbico.

Los primeros sistemas de recuperación de energía utilizados en las plantas de OI fueron las turbinas Francis al comienzo de los años 90 con un rendimiento del orden del 77 %¹⁰, las cuales se montan en el mismo eje que la bomba de alta presión, reduciendo así, el consumo de la misma. Sin embargo este sistema era poco flexible con las variaciones en la operación de la planta, debido a que a lo largo del año las membranas se ensucian y también se dan variaciones de temperatura del agua de alimentación, produciéndose en ambos casos que la presión de salida de la salmuera varíe. Al ser el sistema de recuperación una bomba invertida, su funcionamiento viene definido por la curva caudal/altura, pero al variar la presión de entrada se debía variar el caudal siguiendo la curva. Como esto no era posible, se obtenían producciones variables, por lo que había que llevar a cabo un pequeño *by-pass* con una válvula reductora de presión con la finalidad de desviar el caudal que, en determinadas situaciones, la bomba no podía evacuar. Todo esto se traducía en ineficiencias del sistema¹¹.

Posteriormente, se incorporó en los diseños otro dispositivo de recuperación de energía, el Turbocharger, con un rendimiento del 80%¹² aproximadamente y con el cual se puede conseguir una reducción del consumo de energía del 30%. En el Turbocharger la salmuera acciona una turbina que impulsa mediante un eje iso-axial una bomba centrífuga que permite una reducción en el consumo de energía de la

⁹ Al-Karaghoulí A., Kazmerski L.L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable Sustainable Energy*, 24, 343–356.

¹⁰ Julieta Schallenberg-Rodríguez n, José Miguel Veza, Ana Blanco-Marigorta, 2014, Energy efficiency and desalination in the Canary Islands, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40,741–748.

¹¹ Peñate-Suarez B., Fuente-Bencomo J.A. (2009). *Proyecto tecnológico Recudesal*. (p. 8). Las Palmas de Gran Canaria: Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.

¹² Peñate-Suarez B., Lourdes García-Rodríguez, 2010, Energy optimisation of existing SWRO (seawater reverse ósmosis) plants with ERT (energy recovery turbines): Technical and thermoeconomic assessment, *Energy*, 36, 613-626

bomba de alta al no tener que impulsar un mayor caudal de agua de alimentación a presiones tan altas como 60 bar aproximadamente.

Más tarde, a finales de los años 90, se introdujeron las turbinas Pelton con un rendimiento del 88% aproximadamente, y estas comenzaron a sustituir a las turbinas Francis por su alta eficiencia, permitiendo un ahorro energético de entre 0.18-0.2 kWh/m³ adicional. Además, la curva de operación de una turbina Pelton es un área, que admite variaciones en la presión de entrada a la turbina sin que por ello se afecte al rendimiento. Por otra parte, en la turbina Pelton la salmuera se descarga a la atmósfera, es decir, se aprovecha toda la energía en forma de presión de la salmuera. En cambio, las bombas invertidas necesitaban una contrapresión en la descarga, el equivalente al NPSH (*Net Positive Suction Head*) de las bombas, pues si no, cavitaban, lo que suponía perder parte de la energía en forma de presión que se obtenía de la salmuera¹³.

Finalmente, tras las turbinas Pelton tomaron posición los dispositivos de cámaras isobáricas (CIP) con la finalidad de evitar las pérdidas de eficiencia asociadas a la conversión de energía que se producen en los dispositivos centrífugos, donde se convierte energía hidráulica en energía mecánica. Son los sistemas de recuperación de energía más actuales que también aprovechan la presión de salida de salmuera pero con un funcionamiento diferente a las turbinas, de tal modo que se obtienen mejores rendimientos en comparación con dichas turbinas. Hay básicamente dos tipos de cámaras isobáricas disponibles según su principio de funcionamiento:

- dispositivos de desplazamiento positivo, y
- cámaras de desplazamiento rotativo.

Sin embargo, todos ellos se basan en un sistema que utiliza la presión de salida de salmuera para aumentar la presión del agua de alimentación, reduciendo así el consumo de energía de la bomba de alta presión. El proceso comienza del siguiente modo, por un lado se introducen la salmuera a alta presión y el agua de alimentación a baja presión simultáneamente en las cámaras isobáricas y se produce un intercambio de presión entre ambas corrientes, de tal modo que a medida que se reduce la presión de la salmuera se aumenta la presión del agua de alimentación. Luego el agua de mar a alta presión que sale de la cámara isobárica pasa por una bomba booster para aumentar su presión entre 3-4 bar hasta alcanzar la presión de funcionamiento de la bomba de alta. Al mismo tiempo por otro lado la salmuera a baja presión (debido a que ha cedido su presión al agua de alimentación) es desplazada de la cámara y enviada al exterior por el agua de mar que entra en la cámara a baja presión y de nuevo se repite el proceso¹⁴. Por este motivo, en general, los sistemas CIP basados en el desplazamiento positivo tienen dos cámaras en paralelo, cada una realizando uno de los dos pasos de forma alternada. Algunos fabricantes realizan el contacto entre agua

¹³ Peñate-Suarez B., Fuente-Bencomo J.A. (2009).o.c.

¹⁴ Julieta Schallenberg-Rodríguez n, José Miguel Veza, Ana Blanco-Marigorta, 2014, o.c.

de mar y salmuera directamente y otros sitúan un pistón separador entre ambos fluidos que realiza un cierre hermético, manteniéndolos cuasi-separados.

Con respecto a las CIP de desplazamiento rotativo, estas se basan en el mismo principio que las anteriores, pero no disponen de partes móviles tales como válvulas que dan paso a una corriente u otra. En su lugar los elementos que dan paso a las diferentes corrientes, son las propias cámaras mediante una serie de canales abiertos en la estructura del rotor.

Por otro lado en este sistema el contacto entre los fluidos es directo, no existiendo ninguna separación física (pistón) entre ambas corrientes, como consecuencia de esto, se produce una mezcla mayor que en el caso de los sistemas de desplazamiento positivo, llegando a ser del 2-3%¹⁵.

El ahorro energético que se puede conseguir con estos sistemas es del 40% y tienen un rendimiento del 97%. Esto supone un consumo de energía en el proceso (línea de alta presión) que puede rondar los 2,5 kWh/m³¹⁶. Teniendo en cuenta que el mínimo teórico para una conversión del 45% está en torno a 1,5 kWh/m³¹⁷, el consumo específico de las plantas desaladoras por OI es cada día más reducido gracias al desarrollo y continua mejora de los sistemas de recuperación de energía. Minimizar el consumo energético de los sistemas de desalación por ósmosis inversa (OI) y lograr la mejor eficiencia energética, maximizando de esta manera el aprovechamiento de la energía, es uno de los factores claves para hacer rentable este proceso de obtención de agua potable a partir del agua de mar. Debido a esto la tendencia en estos últimos años ha sido instalar cámaras isobáricas en nuevas plantas desaladoras en lugar de los recuperadores de energía centrífugos basados en turbinas, o bien sustituir en plantas antiguas el sistema de recuperación de energía disponible por cámaras isobáricas (*Retrofitting*).

El esquema principal de una planta desaladora con cámaras isobáricas se puede ver en la figura siguiente.

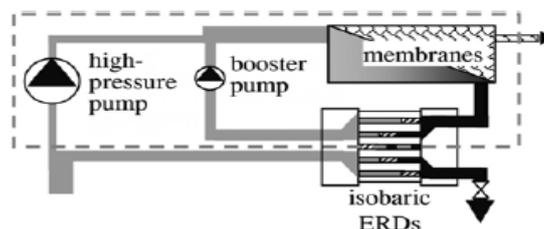


Figura 2: Diagrama del proceso de desalación por OI con un recuperador de energía CIP¹⁸.

¹⁵ Ian B. Cameron, Rodney B. Clemente, 2007, SWRO with ERI's PX Pressure Exchanger device — a global survey, *Desalination*, 221,136–142.

¹⁶ Peñate-Suarez B, Lourdes García-Rodríguez, 2010, o.c.

¹⁷ Peñate-Suarez B, Fuente-Bencomo J.A, 2009. o.c.

¹⁸ Ian B. Cameron, Rodney B. Clemente, 2007, o.c.

Las cámaras isobáricas comerciales o, en algún caso, ensayadas, son las siguientes.

- Cámaras isobáricas de desplazamiento positivo con pistón separador integrado:
 - *KSB (SalTec DT)*: Está formado por dos cámaras isobáricas y una válvula rotativa (componente principal del intercambiador de presión), gracias a la cual se lleva a cabo la admisión y descarga de la salmuera, también dispone de actuadores y de un sistema de control ¹⁹.

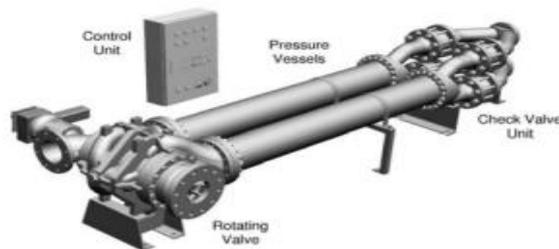


Figura 3: Dispositivo KSB Saltec DT ²⁰.

- *Aqualyng*: Consiste en dos cámaras isobáricas verticales en paralelo (de acero inoxidable) que operan alternativamente y dispone de válvulas de tres pasos con las que puede controlar el flujo que circula por las cámaras, produciendo una secuencia de compresión y descarga por descompresión. Además requiere de un actuador y un sistema de control ²⁰.



Figura 4: Dispositivo Aqualyng ²¹.

¹⁹ Stephan Bross, Wolfgang Kochanowski, 2006, SWRO core hydraulic system: Extension of the SalTec DT to higher flows and lower energy consumption, *Desalination*, 203, 160–167.

²⁰ Mageed Jean Guirguis, 2011, Energy Recovery Devices in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants with Emphasis on Efficiency and Economical Analysis of Isobaric versus Centrifugal Devices, consultada el 18/12/2015 en : <http://scholarcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4330&context=etd>

- *Calder (DWEERTM)*: Dispone de dos cámaras isobáricas horizontales (o verticales según la disposición de espacio) con una válvula corredera patentada (LinXTM), para la admisión y descarga de la salmuera y cuatro válvulas de retención para la entrada y salida del agua de mar. También requiere de controladores lógicos programables (PLC) y de actuadores²¹.

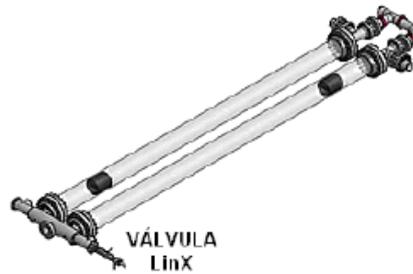


Figura 5: Dispositivo DWEERTM 23.

- *Osmorec*: Está formado por tres cámaras isobáricas verticales en paralelo, donde cada una dispone de pistones para así evitar la mezcla de ambos fluidos. El diseño incorpora válvulas de retención y válvulas rotatorias de tres vías (accionadas por un pequeño motor eléctrico) para la distribución secuencial de salmuera y agua de mar a alta y baja presión. El proceso consta de dos etapas que se producen secuencialmente en cada una de las tres cámaras isobáricas²².



Figura 6: Dispositivo OSMOREC²⁴.

²¹ Beat Schneider, 2005, Selection, operation and control of a work exchanger energy recovery system based on the Singapore Project, *Desalination*, 184, 197–210,

²² OSMOREC Innovative Reverse Ósmosis Energy Recovery Technology, consultada el 20/10/2015 en <http://osmorec.com/product/technology>

- Cámaras isobáricas de desplazamiento positivo con contacto directo de fluidos:
 - *RO-KINETIC*: Consta de dos cámaras que tienen forma de doble bucle cerrado donde el agua que entra o sale, presurizada o despresurizada, está en continuo movimiento para evitar el consumo de energía cinética que hay en las paradas en la operación. De tal modo que el agua de mar entra a la cámara y se queda contenida en ella y luego entra la salmuera a alta presión y la desplaza hacia el bastidor. El diseño consta de dos válvulas servo-comandadas separadas por dos válvulas inerciales. Las primeras distribuyen de forma secuencial la entrada de agua de mar y la salida de salmuera de las cámaras, y las segundas conectan ambas cámaras y permiten el paso del fluido de una cámara a otra sin interrupción²³.



Figura 7: Dispositivo RO-KINETIC ²⁵.

- Cámaras isobáricas de desplazamiento rotativo:
 - *Energy Recovery Pressure Exchanger (ERI-PX)*: Consiste en un rotor cilíndrico cerámico que gira de forma automática conducido por el flujo sobre un rodamiento hidrodinámico, con conductos longitudinales paralelos a su eje de rotación. El rotor se mueve dentro de una camisa envolvente que contiene dos tapas con puertos de apertura para ambas corrientes y no contiene pistones por lo que la mezcla es ligeramente mayor 2-6 %²⁴ que en los demás dispositivos, pero representa un problema menor con respecto a todas las ventajas que ofrece. El proceso consta de 4 etapas, en la primera etapa empieza el llenado de la tobera con agua de mar a baja presión, en la segunda etapa se produce la expulsión de la salmuera a baja presión debido al ingreso del agua de mar en la tobera, la tercera etapa empieza con el llenado de la tobera con salmuera a alta presión y la cuarta y última etapa termina con la expulsión del agua de mar a alta presión hacia el bastidor debido a la transferencia de presión de la salmuera. Al terminar la cuarta etapa se ha realizado un ciclo y de nuevo comienza la primera etapa del segundo ciclo²⁵.

²³ Peñate Suarez B., J.A. de la Fuente a, M. Barreto, 2009, Operation of the RO Kinetic energy recovery system: Description and real experiences, *Desalination*, 252, 179–185.

²⁴ Richard L. Stover, 2004, Development of a fourth generation energy recovery device. A 'CTO's Notebook', *Desalination*, 165, 313-321.

²⁵ Ian B. Cameron, Rodney B. Clemente, 2007, o.c.



Figura 8 : Dispositivo ERI-PX²⁶.

- *Danfoss (iSave)*: Es un dispositivo de última generación que incorpora en un solo cuerpo un intercambiador de presión con cámaras isobáricas, una bomba booster de desplazamiento positivo de alto rendimiento y un motor de alta eficiencia. El principio de funcionamiento es parecido al sistema ERI, pero en este caso el rotor cilíndrico es de acero inoxidable y no hay camisa envolvente, pero sí dos tapas de plástico PEEK (plástico desarrollado por la NASA) donde se encuentran los puertos de alta y baja presión. La rotación la produce el motor y no la energía cinética del agua. El intercambiador de presión y la bomba booster giran sincrónicamente mediante un eje conectado a un motor (que gira entre 1000 y 1500 rpm) y destina muy poca energía a mantener en movimiento el rotor (solo un 10 %), el otro 90% de la energía se destina a elevar la presión del agua presurizada en 3 bar. El único sistema de control que necesita el iSave es un variador de velocidad de baja potencia para modificar el número de revoluciones y así poder cambiar el caudal²⁷.

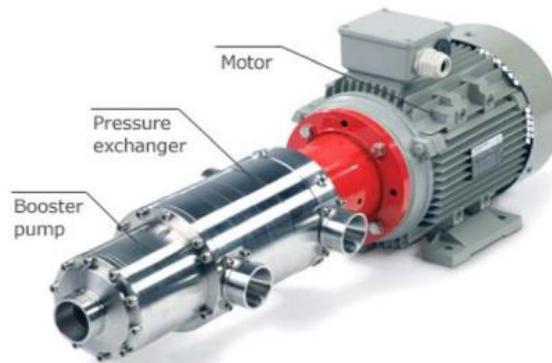


Figura 9: Dispositivo iSave³⁰.

²⁶ Energy Recovery Inc, 2011, *Highly Efficient Energy Recovery Devices* , consultada en 25/10/2015 en <http://www.energyrecovery.com/wp-content/uploads/2014/12/White-PaperHigh-Efficiency-ERD.pdf>

²⁷ Danfoss, 2014, *Energy recovery just got simple*, consultada el 25/10/2015 en http://ro-solutions.danfoss.com/media/1138/521b1106_energy-recovery-just-got-simple.pdf

Por otro lado existen otros tipos de recuperadores de energía, cuya diferencia principal con respecto a las cámaras isobáricas, es la forma en que se transfiere la energía de vuelta al sistema. Estos sistemas se denominan intercambiadores de presión y se encargan de convertir la presión de la salmuera directamente en la alimentación del proceso.

- *Bomba Danfoss*: Consiste de dos bombas de pistones rotativos acopladas a un motor (por ambos lados), las cuales trabajan, la primera como bomba (produciendo el salto de presión necesario para la ósmosis inversa), y la segunda como recuperador (recuperando la energía proveniente del rechazo y permitiendo al motor una reducción de consumo eléctrico instantáneo). Este sistema convierte la presión de salmuera en energía mecánica y el único control que necesita es un variador de frecuencia para modificar el número de revoluciones y así poder cambiar el caudal²⁸.

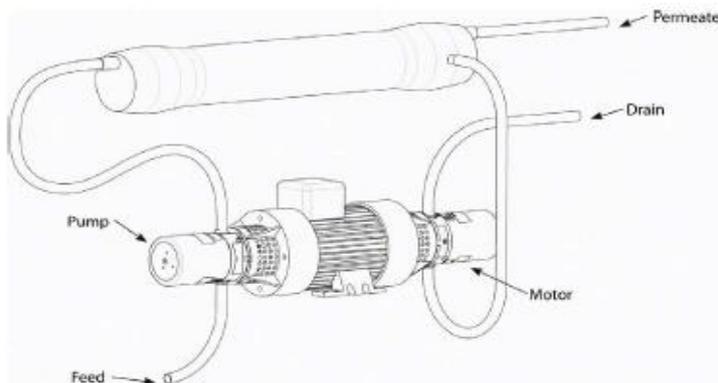


Figura 10: Dispositivo bomba Danfoss ³⁴.

- *Bomba Clark Watermakers*: Consiste en dos cilindros enfrentados con pistones que comparten un único eje que atraviesa un bloque central y una válvula inversora, controlada por una válvula motorizada que actúa mecánicamente sobre los pistones. Esta válvula motorizada permite a los cilindros alternar entre conducción y presurización, de tal modo que el cilindro empieza a presurizar cuando el eje es empujado hacia la derecha, permitiendo entrar a la salmuera a alta presión dentro del cilindro, y esta a su vez envía el agua de mar que se encontraba en el cilindro hacia el módulo. Cuando el eje es empujado hacia la izquierda entra agua de mar a baja presión al cilindro y desplaza la salmuera a baja presión que estaba en el cilindro. Finalmente se vuelve a cambiar el sentido del eje y comienza un nuevo ciclo²⁹.

²⁸ A. Valbjørn, 2008, ERD for small SWRO plants, *Desalination*, 248, 636–641A.

²⁹ Nauti Expo, consultada el 25/10/2015 en <http://www.nauticexpo.es/prod/spectra/product-22056-204777.html>



Figura 11: Dispositivo bomba Clark ³⁵.

En la siguiente tabla se muestra un cuadro resumen con la clasificación de los sistemas de recuperación de energía explicados.

Tabla 1: Clasificación de los sistemas de recuperación de energía más actuales. (Elaboración propia).

SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA			
Cámaras isobáricas	Desplazamiento Positivo	Con pistón separador	KSB (SalTec DT)
			Aqualyng
			Calder (DWEER™)
		Osmorec	
	Desplazamiento Rotativo	Sin pistón separador	RO-KINETIC
		ERI-PX	
Intensificadores de presión	Danfoss (iSave)		
	Bomba Danfoss		
	Bomba Clark Watermakers		

6. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN LA DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA EN CANARIAS

Históricamente la mayor parte del agua en Canarias, se ha obtenido a través de pozos (principalmente en la isla de Gran Canaria) y galerías (especialmente en las islas de La Palma y Tenerife), sin embargo el abastecimiento de agua potable en el archipiélago canario se ha visto marcado por la necesidad del autoabastecimiento en cuanto a recursos hídricos se refiere, llegando a requerir de trasvases de agua desde otros territorios. De hecho, en momentos determinados de nuestra historia, islas como Lanzarote, tuvieron que ser abastecidas de agua a través de barcos provenientes de Gran Canaria o Tenerife.

En parte esto es debido, a las condiciones climáticas de las islas que se caracterizan por la escasez de lluvias (variable según las islas), por las circunstancias geomorfológicas que explican la ausencia de aguas superficiales aprovechables debido principalmente al relieve accidentado de la mayor parte de las islas, y además debido a la sobreexplotación de los acuíferos que ha provocado la disminución de los caudales captados y la intrusión marina a los acuíferos aumentando la salinidad de las aguas de los mismos.

Por otro lado la disponibilidad de agua se ve limitada por las importantes pérdidas (debido al mal estado) que se producen en la red de transporte y distribución de agua, además del aumento de la población de cada isla. De tal modo que Canarias ha tenido que adaptarse a los tiempos, e innovar para aprovechar, de la forma más eficiente posible, los recursos hídricos naturales.

Como fruto de ello se construye la primera planta desaladora por evaporación súbita (MSF) de 2.300 m³/día en la isla de Lanzarote en el año 1964, lo que propicia no sólo que Canarias abra las puertas a la desalación de aguas sino también al hecho de requerir mucha energía para obtener agua. Esta planta fue la primera desaladora de agua de mar para uso urbano de toda Europa. A partir de esta experiencia, le siguieron en Gran Canaria, con la planta desaladora Las Palmas I con tecnología MSF y una capacidad de producción de 20.000 m³/ día y también en Fuerteventura, con una planta desaladora denominada Puerto del Rosario, con tecnología MSF y 2.000 m³/día de capacidad de producción ³⁰. Del mismo modo ocurrió en la mayoría de las islas, donde se instalaron todos los tipos de sistemas comerciales de desalación existentes, abarcando desde tecnologías de destilación hasta de membranas de última generación. Por este motivo, el Archipiélago Canario fue considerado hasta finales de siglo XX como un gran laboratorio para las diferentes técnicas de desalación con un abanico muy amplio de tecnologías, capacidades, calidades del agua bruta y aplicaciones del agua producto³¹.

³⁰ Gobierno de Canarias, 2015, *Plan de Ecogestión en la producción y distribución de agua de Canarias*, consultada el 25/10/2015 en : http://oic.itccanarias.org/files/PLAN_ECOGESTION_DEL_AGUA.pdf

³¹ Gobierno de Canarias, 2015, *Plan de Ecogestión en la producción y distribución de agua de Canarias*, o.c.

En 1984 la desalación en Canarias empieza a ser de gran Interés para el Estado, por lo que se pone en marcha el Programa de Desalación de Canarias, con financiación por parte del Ministerio de Obras Públicas y del Gobierno de Canarias, siendo a partir de esos años cuando realmente se aprecia la apuesta decidida por la desalación³².

A continuación se mostrarán las desaladoras por OI disponibles por islas, cómo aumenta la capacidad de producción debido al aumento del requerimiento de agua potable y cuáles son las plantas desaladoras más destacadas en la isla de Gran Canaria.

En la tabla siguiente se muestran el número de desaladoras de carácter público y privado, así como la producción de agua potable por isla en el año 2012. Como se puede observar el mayor número de plantas desaladoras y la mayor capacidad de producción se encuentra en la isla de Gran Canaria, siendo en su mayoría de carácter privado.

Tabla 2: Número de plantas desaladoras por OI y producción de agua desalada en Canarias (2012)³³.

Nº de plantas desaladoras y producción de agua desalada en 2012 (DGA GobCan)				
	Nº Desaladoras	Nº Públicas	Nº Privadas	Producción (m³)
GRAN CANARIA	137	11	126	336.195
TENERIFE	44	5	36	118.143
FUERTEVENTURA	64	4	60	65.049
LANZAROTE	85	5	80	62.570
LA GOMERA	1	0	1	4.100
EL HIERRO	4	4	0	2.000
LA PALMA	0	0	0	0

³² Gobierno de Canarias, 2015, o.c.

³³ Consejería de empleo, Industria y Comercio, Gobierno de Canarias, 2011, Anuario Energético de Canarias 2011, consultada el 01/11/2015 en <http://www.gobcan.es/ceic/energia/publicaciones/Anuario2011.pdf>

En la figura 12 se muestra la evolución de la capacidad de agua desalada en Gran Canaria y como se puede observar esta ha ido aumentando gradualmente año tras año debido principalmente al aumento de la población en las islas.

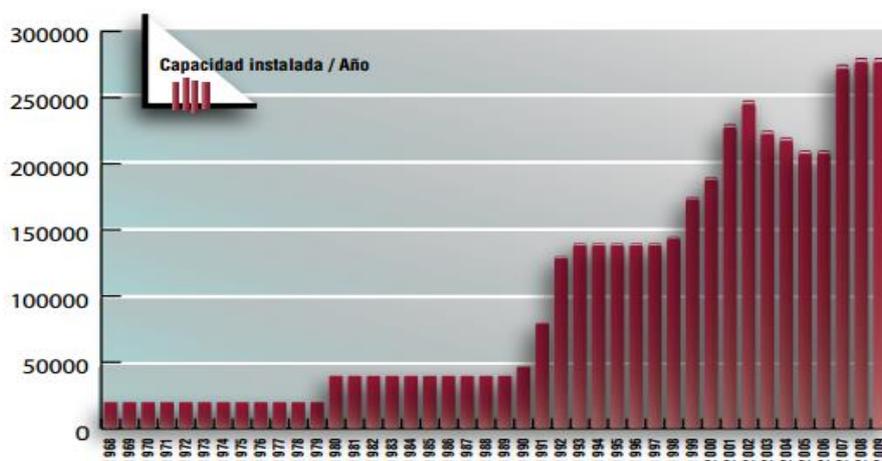


Figura 12: Evolución de la capacidad de agua desalada en Gran Canaria (m³/d)³⁴.

En la tabla 3 se pueden ver los principales centros de producción de agua desalada en la isla de Gran Canaria, donde la planta desaladora con mayor capacidad de producción es la planta de Emalsa, Piedra Santa, con 80.000 m³/d.

Tabla 3: Principales centros de producción de agua desalada en Gran Canaria³⁵.

Complejo	Emplazamiento	Municipio	Zona	Uso
Salinetas	Salinetas	Telde	E	15.000 Abasto
Punta Camello	Arucas	Arucas	N	11.300 Abasto/Riego
Piedra Santa	Piedra Santa	Las Palmas GC	NE	80.000 Abasto/Industrial
Varias Las Palmas	Las Palmas de GC	Las Palmas GC	NE	400 Abasto/Médico
Bocabarranco	Gáldar	Gáldar	NO	25.000 Abasto/Riego
Roque Prieto	Guía	Guía	NO	5.000 Abasto/Riego
Bco. La Aldea	Bco. La Aldea	La Aldea de S.N.	O	10.700 Abasto/Riego
Las Burras	San Agustín	S Bartolomé T	S	26.184 Abasto
Juan Grande	Juan Grande	S Bartolomé T	S	8.000 Riego
Bco. Tirajana	Bco. Tirajana	S Bartolomé T	SE	600 Industrial
Pozo Izquierdo	Pozo Izquierdo	Santa Lucía	SE	33.000 Abasto/Riego
Gando	Gando	Agüimes	SE	2.500 Abasto
Vargas	Vargas	Santa Lucía	SE	5.000 Abasto/Riego
Playa de Tauro	Tauro	Mogán	SO	2.000 Abasto
Puerto Rico	Puerto Rico	Mogán	SO	4.000 Abasto
Playa de la Verga	Playa de la Verga	Mogán	SO	500 Abasto
				229.184

³⁴ Gobierno de Canarias, 2015, *Plan de Ecogestión*, o.c.

³⁵ Gobierno de Canarias, 2015, *El Agua en Canarias*, o.c

Por otro lado la creciente demanda y la competencia en usos es también un factor importante en la desalación. Tres son los usos principales: agrícola, urbano y turístico. En la tabla siguiente se muestran las estimaciones de la demanda de agua por sectores para el año 2015, pudiendo ver que en su mayoría el uso del agua desalada es en el sector urbano- turístico (47,45%) y agrícola (43,8%).

Tabla 4: Estimación de la demanda de agua por sectores en Canarias para el año 2015 ($hm^3/año$)³⁶.

	Urbano	Turístico	Recreativo	Industrial	Agrícola	Total demanda ($hm^3/año$)
Lanzarote(*)	10,76	8,79	1,48	0,70	1,20	22,93
Fuerteventura	10,42	5,55	2,70	0,66	0,97	20,30
Gran Canaria	66,93	16,74	11,87	8,28	63,30	167,12
La Gomera	1,41	0,46	1,47	0,07	4,50	7,91
La Palma(*)	8,30		3,90	–	62,80	75,00
El Hierro(*)	1,47		0,00	0,13 ⁶	1,91	3,51
Total	236,16		29,52	14,84	219,68	501,67
(%)	47,4%		5,9%	3,0%	43,8%	100%

Con respecto a la energía destinada únicamente para desalar agua en alguna de las islas, esta supone entre el 5-10% de la energía puesta en la red (ver figura 13). Desde un punto de vista de agua desalada para cubrir la demanda pública de agua potable, después de la isla de Gran Canaria y teniendo en cuenta el número de habitantes servidos y el total de energía puesta en la red, destaca Lanzarote con un 10%, seguido de Fuerteventura con un 6,6 %. La isla que menos electricidad consume en desalación de agua de mar es Tenerife con un 1,3 %. Se desestiman La Gomera y La Palma que no tienen desaladoras públicas (en La Gomera hay una única planta desaladora de carácter privado con una capacidad de producción de 4.000 m^3/d , pero no hay datos de su consumo energético).

³⁶ Gobierno de Canarias, 2015, *Plan de Ecogestión*, o.c.

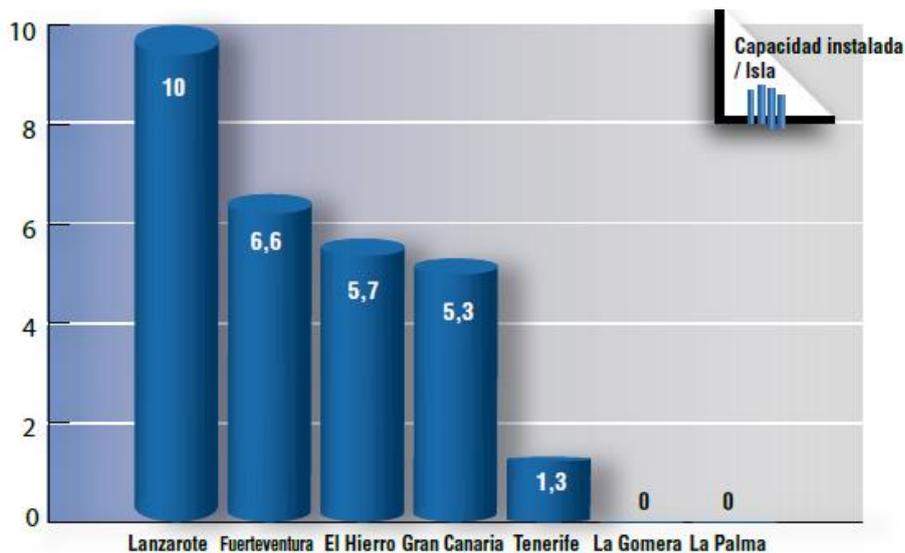


Figura 13: Demanda energética (%) en desalación de instalaciones públicas en Canarias³⁷.

En Canarias hay un total de 327 plantas de desalación. Las públicas producen el 73,9% del agua de abasto con una demanda energética total de 358.099 MWh (dato estimado considerando que el consumo específico de la línea de alta presión es de 3,5 kWh/m³). Estudios recientes sugieren que la demanda energética de las plantas desaladoras por OI puede reducirse con la sustitución de las turbinas que quedan instaladas y sustituyéndolas por dispositivos de recuperación de energía basados en cámaras isobáricas consiguiendo que el consumo específico de energía, de una desaladora con capacidad mediana-grande, disminuya hasta alcanzar valores entre 2,2 y 2,5 kWh/m³ ³⁸.

Sin embargo dado el elevado número existente de desaladoras, muchas de ellas de carácter privado, no hay un control estadístico completo, no existiendo por tanto datos oficiales del volumen total de agua desalada ni de la demanda energética en las mismas. Es por ello que a continuación se estiman los datos de producción de agua de abasto público desalada mediante OI tomándose como referencia el número de desaladoras de OI existentes en Canarias según la Dirección General de Aguas del Gobierno de Canarias.

³⁷ Gobierno de Canarias, 2015, *Plan de Ecogestión*, o.c

³⁸ Nidal Hilal, 2012, *The International of Science and Technology of desalting and water purification, Desalination*, 285,ii.

Por otra parte, para determinar el ahorro energético se ha considerado que el 90% del agua desalada en cada isla, procede de plantas de OI, excepto en Tenerife y El Hierro que, en base al número de desaladora de OI existentes, se ha supuesto que son el 55% y 100%, respectivamente. Por otro lado con respecto al consumo específico, se considera que tras la instalación de un dispositivo de recuperación de energía, este pasa de 3,5 kWh/m³ a 2,5 kWh/m³ (línea de alta presión). Por tanto, en la tabla 5, se muestra el ahorro de energía que se conseguiría con la instalación de dispositivos de recuperación de energía en las plantas públicas de OI existentes en Canarias.

Tabla 5 : Ahorro energético estimado en desaladoras³⁹.

Isla	Número desaladoras Ósmosis Inversa	m ³ de agua desalada		Demanda energética (MWh/año)		Ahorro (MWh/año)
		Total	Ósmosis Inversa	Sin sistema recuperación	Con sistema recuperación	
Gran Canaria	117	53.655.895	48.290.306	169.016	120.726	48.290
Tenerife	24	12.588.211	11.329.390	39.653	17.309	6.924
Lanzarote	53	23.229.532	20.906.579	73.173	52.266	20.907
Fuerteventura	56	12.137.322	10.923.590	38.233	27.309	10.924
El Hierro	4	703.143	703.143	2.461	1.758	703
Canarias	255	102.314.103	92.153.007	358.099	219.368	87.747

En base a toda la información recolectada se puede ver que en estas islas se generaría un problema muy grave de suministro de agua, en el caso de haber alguna avería en las plantas o si hubiera una pérdida del suministro energético, ya que el agua desalada es prácticamente el único recurso disponible para abastecimiento de la población residencial y turística. Para evitar este posible percance una opción interesante es integrar las energías renovables a las plantas desaladoras, aspecto que se analizará más adelante.

³⁹ Consejería de Empleo, Industria y Comercio, Gobierno de Canarias, 2011, Anuario energético de Canarias, consultado el 07/12/2015 en <http://www.gobcan.es/ceic/energia/publicaciones/Anuario2011.pdf>

7. VALORACIÓN CUALITATIVA Y CUANTITATIVA DE LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA POR CÁMARAS ISOBÁRICAS EN CANARIAS

En esta sección se estudia la evolución del consumo energético de los sistemas de recuperación de energía empleados en la desalación por OI en Canarias, con la finalidad de establecer qué tipo de sistema es el más apropiado enfocado a plantas de mediana y gran escala, además también se estudia cuál es la marca de la bomba de alta presión más solicitada por las empresas.

7.1 Recopilación de información

En esta parte del trabajo se llevó a cabo una intensa búsqueda en la literatura y también se realizaron entrevistas completas a un total de 10 expertos, entre gestores, explotares y operarios de diversas plantas desaladoras actualmente en funcionamiento, con la finalidad de obtener los datos principales de operación del proceso de OI y de los recuperadores de energía empleados para su posterior análisis. Los datos principales recolectados son, el año de puesta en marcha, producción de la planta, conversión empleada, tipo de membranas que utilizan, sistemas de recuperación de energía empleados, consumo específico (línea de alta presión), mantenimientos llevados a cabo, averías, etc.

De tal modo que en la tabla 6 se pueden ver los datos principales de las plantas visitadas, no obstante debido al requerimiento de confidencialidad de las personas entrevistadas, las plantas están enumeradas. Por simplicidad de lectura, todas las encuestas realizadas, descripción de las plantas desaladoras y fotos de las mismas se encuentran en el Anexo II. Aquí se hace un resumen de los datos e información obtenida.

Como se puede observar la tendencia a realizar el *retrofitting* de turbinas a cámaras isobáricas es cada vez mayor, debido a que permite una disminución del consumo energético de la planta. De hecho de las 8 plantas visitadas, 7 ya disponen de cámaras isobáricas. Y en Canarias, a raíz del trabajo realizado, se puede afirmar que son muy pocas, menos de una decena, las plantas que quedan con turbinas en operación.

Por otro lado, con respecto al consumo específico de las plantas desaladoras, se ha tenido en cuenta únicamente los datos relativos a la línea de alta presión con el objetivo de poder comparar el proceso de OI de las diversas plantas desaladoras visitadas. Por lo que en lo relativo al consumo específico de las plantas desaladoras con cámaras isobáricas, el valor teórico en general es de 2 - 2,5 kWh/m³ ⁴⁰ y cómo podemos ver en la realidad estos valores se encuentran entre 2 - 3,5 kWh/m³, excepto en algún caso del ERI-PX con el que se está trabajando a casi 4 kWh/m³.

⁴⁰ Gobierno de Canarias, 2015, *Plan de Ecogestión*, o.c.

Tabla 6: Parámetros de funcionamiento de las plantas desaladoras por OI visitadas (Elaboración propia).

Planta	Año de puesta en marcha del recuperador actual	Capacidad (m ³ /d)	Conversión (%)	Configuración, Hibridación	Tipo de recuperador de energía	Consumo específico medio (kWh/m ³)
1	2010	400	40	Simple sin hibridación	iSave ERDs 21	2,10
2	2015	14000	42	Simple, con hibridación	14 x ERI-PQ 300	2,22
	2009	2500	40	Simple, sin hibridación	4 x ERI-PX 220	2,98
	1996	2200	45	Simple, sin hibridación	Turbina Francis	4,08
3	2100	72	43	2º paso, sin hibridación	Danfoss 2.5 APP & 1.8 APM	3,20
4	2008	15000	45	Simple, sin hibridación.	20 x ERI-PX 220	2,60
5	2014	16000	45	Simple, sin hibridación	20 x ERI-PX 220	2,66
6	2002	33000	55	2º paso y 2º etapa e hibridación en 2º etapa	4 x Turbinas Pelton	3,00
7	1998	31600	57	2º etapa e hibridación	3 x Turbina Pelton	3,97
	2007	45600	52	2º etapa e hibridación	38 x ERI-PX 220	3,85
	2010	16300	52	2º etapa e hibridación	2 x DWEER	2,32
	2012	12000	52	2º etapa e hibridación	7 x ERI-PX 300	3,28
	2013	12000	52	2º etapa e hibridación	8 x ERI-PXQ 260	2,72
8	2007	240	40	Simple, sin hibridación	RO-KINETIC	2,20

Sin embargo, como se ha comentado previamente, el consumo energético de la planta va a depender de muchos factores tales como, la edad y el tipo de membranas utilizadas, si se realiza hibridación de las mismas, es decir, dentro de un mismo bastidor coexisten diferentes tipos de membranas, i.e. membranas de alto rechazo, membranas de bajo consumo energético, membranas de alto rechazo al boro etc. Otros factores que influyen son el diseño del proceso, i.e. si entre etapas o pasos existen bombas booster y el tipo de pretratamiento realizado, ya que si el agua de alimentación del proceso viene con suciedad se puede formar una torta en la superficie de la membrana (*fouling*) y en consecuencia se produce una disminución del flujo del permeado, la vida útil de las membranas es menor y el recuperador de energía también puede sufrir daños (dependiendo del tipo de recuperador).

7.2 Análisis de los sistemas de recuperación de energía instalados

Por otro lado analizamos la información recopilada en las entrevistas sobre los diversos sistemas de cámaras isobáricas, así como mantenimientos que requieren, averías sufridas, etc. Con el objetivo de determinar que dispositivo es el más idóneo en plantas desaladoras de tamaño mediano y grande por su bajo mantenimiento, buen funcionamiento y por su consumo específico. Dicha información se recoge en la tabla 8.

Existe una gran variedad de sistemas de recuperación de energía basados en cámaras isobáricas en Canarias. A continuación analizaremos cada uno de los sistemas de recuperación.

- RO-KINETIC:

Es un dispositivo inventado por el canario Manuel Barreto con buenos resultados de consumo específico 2,2 kWh/m³ (caso planta nº 8, tabla 7), ya que aprovecha la energía cinética del agua y por lo tanto no sufre golpes de ariete, además presenta un bajo nivel de ruidos (10 dB). No obstante presenta los siguientes inconvenientes, dispone de mecanismos de accionamiento eléctrico y de válvulas de cierre de cámaras, que requieren de un mantenimiento programado. Es complejo de desarmar (debido principalmente a la válvula reductora), ocupa bastante espacio y los repuestos son fabricados artesanalmente por el propio Manuel Barreto, por lo que el tiempo de espera de los repuestos es mayor que con los demás dispositivos. Además este dispositivo está limitado a plantas de pequeño y mediano tamaño, ya que la capacidad máxima de producción conocida hasta el momento es la planta desaladora del Confital (Tenerife)⁴¹ con 166,67 m³/h. En el caso de la planta desaladora visitada con este sistema, se produjeron pérdidas de agua en las mancuernas del dispositivo y además presentó corrosión intersticial debido a la calidad del material (acero 904 L), por lo que tuvo que ser modificado dicho material por acero Dúplex. Actualmente este tipo de dispositivos no se comercializan, a pesar de dar buenos resultados, debido a que no tienen un adecuado canal comercial y de suministros a gran escala por su carácter artesanal.

⁴¹ B. Peñate, J.A. de la Fuente, M. Barreto, 2010, o.c.

- DWEER Calder:

Este dispositivo también presenta buenos resultados de consumo energético, 2,32 kWh/m³ (caso planta n^o 7, tabla 7), es un equipo muy robusto de material súper Dúplex, que nos permite una flexibilidad operacional y es capaz de tolerar fluctuaciones de caudal y presión sin degradación del equipo. También produce poco ruido (80 dB) con respecto a los demás y es uno de los sistemas de recuperación de energía con mayor capacidad con respecto a los demás (500 m³/h)⁴², por lo que es apto para plantas de mediana y gran capacidad. No obstante ocupan bastante espacio, ya que presentan grandes dimensiones y además requieren de un mantenimiento periódico de los pistones, las válvulas y todos los subsistemas necesarios para la operación del dispositivo, ya que al ser los componentes metálicos, estos se corroen, se desgastan y sufren fatiga, reduciendo el rendimiento del dispositivo y pudiendo provocar fallos en el mismo. También requiere de un sistema de control para operar las válvulas y limitar los movimientos de los pistones de forma secuencial. Se pueden colocar en paralelo en plantas de gran capacidad, pero cada dispositivo debe ser operado de forma individual y conjuntamente con los otros dispositivos para minimizar el caudal que se pierde en la lubricación del dispositivo (*overflush*) y para evitar pulsaciones excesivas. Con respecto al dispositivo de la planta entrevistada, este sufrió averías en la bomba de aceite y en la válvula solenoide del sistema hidráulico, por lo que se tuvo que cambiar el sistema de regulación hidráulico por uno eléctrico. Además durante su instalación dejaron soldaduras mal acabadas, lo que también ocasionó pérdidas de agua en algunos puntos. Por otro lado.

- Bomba Danfoss

Es un sistema robusto, hecho con material *super dúplex*, lleva poco mantenimiento, es compacto, ocupa poco espacio y hace poco ruido (80 dB). No obstante requiere de un variador de velocidad para modificar el caudal y de un alto coste de inversión para pequeñas producciones, debido al material de fabricación. También condiciona el tamaño de la planta, ya que su rango de capacidad de producción máxima es de 1,1 m³/h a 3000 rpm⁴³. Se pueden disponer varias unidades en paralelo pero generalmente es ideal para plantas de pequeña escala. Con respecto a la planta desaladora visitada con este sistema, esta no ha tenido averías, es muy eficiente y lleva el mantenimiento propio de una bomba. Sin embargo presenta un consumo específico ligeramente superior al de las CIP con un 3,20 kWh/m³ (caso planta n^o 3, tabla 7).

⁴² Sun Jiaxi, Wang Yue, Xu Shichang, Wang Shichang, 2008, Energy Recovery Device with a Fluid Switcher for Seawater Reverse Osmosis System, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 16, 329-332.

⁴³ Danfoss, consultada el 04/12/2015 en http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/C290C7DF-5058-44DE-BEB9-7C9492577CDC/0/521B1216_FichaT%C3%A9cnica_BombadeAguaMarinaconRecuperaci%C3%B3ndeEnerg%C3%ADaSWPE_ES_A4.pdf

- ERI-PX

Es el sistema de recuperación de energía basado en cámaras isobáricas más empleado en las plantas desaladoras de Canarias. Esto es debido, por una parte a los buenos resultados de consumo específico que presentan, entre 2,2 y 3,85 kWh/m³, dependiendo del estado de las membranas, y por otro lado a que el ERI-PX es un sistema autónomo que se pone en marcha con el propio flujo del agua de mar y la salmuera que entran en él gracias a los canales abiertos. Es ligero, modular, ocupa poco espacio, se puede colocar en tanto en vertical como en horizontal, no requiere de conexiones eléctricas y tampoco de un mantenimiento periódico, lo que se traduce en una disminución de los costes de mantenimiento. Son ideales para todo tipo de plantas (pequeñas, medianas y grandes) porque se pueden disponer varios de ellos en paralelo y si uno deja de funcionar, por cualquier razón, no se para la planta sino que el agua fluye a través del dispositivo sin impedimentos, ya que no hay pistones que lo impidan, pero como consecuencia de ello aumenta la salinidad del agua de alimentación del proceso. Cuentan con una gran vida útil, debido a que algunos factores, tales como la corrosión, vibración y el desgaste no afectan prácticamente a este dispositivo, ya que el rotor es de un material cerámico tres veces más duro que el acero y prácticamente no se corroe con el agua de mar. Con respecto a las vibraciones y pulsaciones, estas son insignificantes, ya que la única parte móvil en el dispositivo flota en un cojinete hidrodinámico formado por agua de mar que impide el contacto sólido-sólido y por lo tanto evita el desgaste. No obstante este dispositivo requiere de un buen pretratamiento ya que si el agua de alimentación contiene suciedad, el rotor se puede atascar o bien producirse la acumulación de microorganismos sobre superficies mojadas (*biofouling*), disminuyendo el rendimiento del mismo. Por otro lado este dispositivo hace bastante ruido (92 dB), por lo que requieren alojarse en una cámara insonorizada, aunque esta tecnología sigue evolucionando y ya se están fabricando dispositivos tales como el ERI-PXQ300 con una mayor capacidad 68,18 m³/h⁴⁴ y un menor nivel de ruidos (81 dB). Con respecto a las plantas visitadas que disponen de este dispositivo, en algunos casos los ERI-PX presentaron fallos debido a la presencia de objetos extraños (trozos de válvulas) dentro del rotor que ocasionaron su parada pero sin provocar la parada de la planta, no obstante los explotadores de las plantas están bastante satisfechos con este sistema de recuperación y no hicieron mención alguna sobre los problemas de mezcla y *biofouling* que suelen afectar a este tipo de dispositivos.

- iSave ERDs:

Es un sistema de recuperación de energía de última generación que incorpora en un solo cuerpo un intercambiador de presión, una bomba booster de desplazamiento positivo y un motor de alta eficiencia. A pesar de ello no se han encontrado muchas plantas en Canarias que dispongan de este sistema. Las principales ventajas que presenta son, que es muy compacto, ocupa poco espacio, hace poco ruido (< 87 dB) y el único sistema de control que necesita es un variador de velocidad para poder

⁴⁴ Energy Recovery , consultada el 04/12/2015 en:

[file:///C:/Users/Sigrid/Downloads/ERI_Product_Catalog_WEB3_01%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Sigrid/Downloads/ERI_Product_Catalog_WEB3_01%20(2).pdf)

modificar el caudal. Sin embargo también presenta algunos inconvenientes como, que requiere exigencia en el pretratamiento, ya que si entra suciedad al dispositivo el rotor podría atascarse o sufrir *biofouling*. También condiciona el tamaño de la planta ya que el dispositivo con mayor capacidad de salmuera fabricado es el modelo iSave 77, para 52 m³/h ⁴⁵. Es idóneo para plantas de pequeño y mediano tamaño, pudiendo ser colocados varios dispositivos en paralelo, sin embargo al tener incorporada la bomba booster, el precio unitario del iSave sería más elevado que con respecto a los demás dispositivos CIP que no integran la bomba booster y que pueden ser agrupados varias unidades en paralelo con una sola bomba booster. En consecuencia el coste de inversión de la planta con iSave sería mayor. Con respecto al iSave de la planta desaladora visitada, no ha sufrido averías importantes durante el tiempo de funcionamiento (5 años), ha dado buenos resultados de consumo específico, 2,10 kWh/m³ (planta nº1, tabla 7) y el mantenimiento que requiere es el propio que se le realiza a un motor y a una bomba.

⁴⁵ Danfoss, consultada el 04/12/2015 en: <http://high-pressurepumps.danfoss.com/products/energy-recovery-devices/isave-erd/>

Tabla 7: Ventajas, desventajas y tipología de mantenimiento que tienen los diversos sistemas de recuperación de energía, basados en cámaras isobáricas (Elaboración propia).

	Mantenimiento	Desventajas	Ventajas
Turbinas Francis	Cambio de aceite, cambio de retenes, cambio de junta tórica, sellos, engrasado motor.	Es tecnología obsoleta. Tiene un alto consumo específico.	No hay tanto enredido de tuberías. Se adapta bien a la variación de condiciones. Nos permite ajustar la producción, modificando lo 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.	El consumo específico es mayor que con cámaras isobáricas.	No hay tanto enredido de tuberías. Se adapta bien a la variación de condiciones. Tiene un consumo específico menor que la turbinas Francis.
ERI-PX o ERI-PQ	Ver que no hay obstrucción en los ERIs, asegurar flujo de lubricación, etc.	No tolera objetos extraños. Hace mucho ruido > 92 dB (PXQ < 81). Problemas de mezcla, aunque ningún operador de planta se quejó de esta problema ni tampoco de ensuciamiento por problemas de <i>biofouling</i> .	Es autónomo. Es de fácil mantenimiento y poco gasto. Es ligero lo cual facilita su mantenimiento. Es modular y ocupa poco espacio. Capacidad máxima ERI-PXQ 300 (68 m ³ /h)
Calder DWEER	En muelles de válvulas de retención, juntas de los pistones y válvulas LINX, picaduras por corrosión, etc.	Soldaduras mal acabadas. Fallo en la bomba de aceite y en la válvula solenoide del sistema hidráulico. Se cambió el sistema de regulación hidráulico por uno eléctrico. Ocupa mucho espacio. El equipo debe estar controlado por un 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 de súper dúplex. Hace poco ruido < 83 dB. Capacidad mínima de salmuera 200 m ³ /d y máxima 500 m ³ /h.
iSave ERDs	Reponer aceite, cambio de retenes, sello, juntas tóricas, revisar que no hay obstrucción en el rotor, asegurar flujo de lubricación.	Está condicionado al tamaño de la planta, el dispositivo con mayor capacidad de salmuera es el iSave 77 con 52 m ³ /h. Requiere exigencia en el pretratamiento. Hace bastante ruido < 87 dB	El único control que necesita es un variador de frecuencia. Es muy compacto sin necesidad de tantas tuberías y por lo tanto requiere de un menor mantenimiento por corrosión. Ocupa poco espacio. Ideal para pequeña y mediana escala.
Bomba Danfoss	Cambio de aceite, cambio de retenes, cambio de junta tórica, sellos, engrasado motor.	Condicionado al tamaño de la planta, ya que su capacidad máxima de producción es de 1,1 m ³ /h a 3000 rpm. Alto coste de inversión para pequeñas producciones por el material de fabricación.	Es un sistema robusto hecho con súper dúplex, lleva poco mantenimiento, ocupa poco espacio, es compacto por lo que evita tener muchas tuberías reduciendo costes de mantenimiento por corrosión, no ha tenido averías y es muy eficiente. Ideal para pequeña escala.
RO-KINETIC	Cambio de los retenes, sellos de gomas, reparación válvulas servo-comandadas e inerciales etc.	Es complejo de desarmar por la válvula reductora. Tendencia al fallo por el carácter artesanal de la fabricación. Cambio de material de acero 904 L por acero Dúplex por corrosión intersticial, cambio de los retenes de las mancuernas por pérdida de agua, ocupa mucho espacio. Capacidad máxima de salmuera conocida 166,67 m ³ /h.	Evita el innecesario consumo de energía cinética que aparece en las paradas en la operación. Permite regular los tiempos de cambio de cámara mediante la gestión del variador de accionamiento de las levas del sistema.

Con respecto a los sistemas de cámaras isobáricas del tipo Aqualyng y Osmorec éstos no han superaron la fase experimental y no se han podido concretar visitas a sistemas instalados en Canarias y en operación.

En base a los resultados obtenidos, se determina que para plantas de agua de mar por OI a muy pequeña escala (<100 m³/d)⁴⁶, los sistemas estudiados de Bomba Danfoss⁴⁷ y bomba Clark⁴⁸ son adecuados para un buen funcionamiento de la misma con un consumo específico relativamente bajo. En el caso de los demás sistemas de recuperación de energía basados en CIP, podría darse una complejidad mecánica e hidráulica para adaptarlas a este tipo de plantas y además podrían no ser viables económicamente. Sin embargo habría que llevarse a cabo el estudio económico pertinente, ya que pueden existir dispositivos de recuperación de energía aptos para este tipo de plantas. Por ejemplo en el caso del sistema ERI-PX, a pesar de que la planta desaladora debe disponer de una bomba *booster*, de una bomba de alta presión y del propio recuperador de energía, el consumo específico que se obtiene con este dispositivo en una planta desaladora de agua de mar es de 2,0 - 2,5 kWh/m³ aproximadamente. Sin embargo con la bomba Danfoss se obtienen consumos específicos de 3,5 kWh/m³ aproximadamente. Por lo que con el consumo específico obtenido con el sistema ERI-PX para una vida útil de la planta de 20 años, podría amortizarse el coste de inversión inicial de dicha planta desaladora.

No obstante siguen desarrollándose nuevos dispositivos para plantas de muy pequeña escala como RO-BoostTM de Danfoss e ISOBARIX de Pressure Exchanger Technology (XPR). El RO-BoostTM de Danfoss es un amplificador de presión con capacidades de agua producto de hasta 30-126 l/h, que permite una operación suave. Gracias a su diseño, que emplea cuatro pistones en lugar de dos, permite minimizar las pulsaciones que con el tiempo pueden afectar a las membranas, además su diseño es pequeño y compacto, permitiéndole encajar satisfactoriamente en espacios reducidos⁴⁹. Con respecto al sistema denominado ISOBARIX, este dispone de una capacidad mínima de salmuera de 7 m³/h (modelo 390SS) y una máxima de 137 m³/h (modelo 809SL). Consiste en un rotor de material cerámico que se encuentra en el interior de un recipiente a presión y su principio de funcionamiento es similar al del ERI-PX. Se presagia que con él se puede obtener una mayor eficiencia que los sistemas actuales y se produce un menor porcentaje de mezcla⁵⁰. En la figura 11 se muestran los sistema RO-BoostTM e ISOBARIX.

⁴⁶ Valores estimados del ITC por su amplia experiencia en este campo.

⁴⁷ La capacidad de producción máxima de la bomba Danfoss es de 30 m³/d aproximadamente. Fuente : Danfoss, consultada el 04/12/2015 en http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/C290C7DF-5058-44DE-BEB9-7C9492577CDC/0/521B1216_FichaT%C3%A9cnica_BombadeAguaMarinaconRecuperaci%C3%B3ndeEnerg%C3%ADaSWPE_ES_A4.pdf

⁴⁸ La capacidad de producción máxima de la bomba Clark es de 3,7 m³/d aproximadamente. Fuente: ITC.

⁴⁹ Danfoss RO-Boost, consultada el 04/12/2015 en <file:///C:/Users/Sigrid/Downloads/DATA%20SHEET-INSTRUCTION%20-%20Danfoss.pdf>

⁵⁰ ISOBARIX, consultada el 04/12/2015 en <http://www.isobarix.com/products>



Figura 14: Nuevos sistemas de recuperación de energía para plantas de OI a pequeña escala RO-Boost™ (Izquierda) ⁵¹e ISOBARIX (Derecha)⁵².

En el caso de las plantas de desalación por OI de entre 100 y 500 m³/d, los sistemas de recuperación de energía del tipo CIP más adecuados son el ERI-PX⁵³ y el ¡Save Danfoss⁵⁴, ya que dan buenos resultados en términos de consumo específico. Sin embargo apenas se encontraron plantas que dispongan del dispositivo ¡Save, a pesar de que es realmente interesante, ya que combina en un solo dispositivo, motor, recuperador de energía y bomba booster y con cual se pueden obtener bajos consumos energéticos. Por lo que debido a la escasa presencia de los mismos en las plantas desaladoras de Canarias, no se dispone de datos de funcionamiento en plantas reales para realizar un correcto análisis de la evolución de la operación del mismo en términos de mantenimientos, averías y consumo específico. En este sentido sólo se encontró una planta con este dispositivo con un corto periodo de tiempo de funcionamiento (5 años) y el cual no había sufrido averías importantes.

Por otro lado, siguen desarrollándose nuevos sistemas de recuperación de energía del tipo CIP para plantas desaladoras a esta escala, como el Salino Pressure Center de KSB, que combina los 4 elementos requeridos en el proceso de OI, la bomba de alta presión, el dispositivo de recuperación de energía, la bomba booster y el motor eléctrico, en un sólo dispositivo compacto. Su funcionamiento es similar al ¡Save y su capacidad de producción puede llegar a los 250 m³/d ⁵⁵. En la figura 12 se muestra el dispositivo Salino Pressure Center de KSB.

⁵⁰ La capacidad mínima de producción del ERI-PX es de 108 m³/d aproximadamente. Fuente: Energy Recover, consultada el 18/12/15 en: [file:///C:/Users/Sigrid/Downloads/ERI_Product_Catalog_WEB3_01%20\(10\).pdf](file:///C:/Users/Sigrid/Downloads/ERI_Product_Catalog_WEB3_01%20(10).pdf)

⁵¹ Danfoss RO-Boost, o.c.

⁵² ISOBARIX, o.c.

⁵³ La capacidad de producción del ERI-PX es entre 108 – 1089 m³/d aproximadamente. Fuente: Energy Recover, consultada el 18/12/15 en: [file:///C:/Users/Sigrid/Downloads/ERI_Product_Catalog_WEB3_01%20\(10\).pdf](file:///C:/Users/Sigrid/Downloads/ERI_Product_Catalog_WEB3_01%20(10).pdf)

⁵⁴ La capacidad de producción del ¡Save Danfoss es entre 302,4 – 749 m³/d aproximadamente. Fuente: ¡Save Danfoss, consultada el 18/12/15 en: <http://high-pressurepumps.danfoss.com/products/energy-recovery-devices/isave-erd/>

⁵⁵ Salino Pressure Center, consultada el 04/12/2015 en: <http://www.ksb.com/salino-en/>



Figura 15: Nuevo sistema de recuperación de energía para plantas de OI de mediana escala, Salino Pressure Center de KSB⁵⁶.

En el caso de plantas desaladoras por OI de mediana (500–5,000 m³/d) y gran escala (>5,000 m³/d), los sistemas de recuperación de energía del tipo CIP más adecuados y que mejores resultados han dado son el ERI-PX y el DWEER⁵⁷. Sin embargo el dispositivo predominante en la mayoría de los casos es el sistema rotativo ERI-PX, debido a las numerosas ventajas que ofrece frente a los demás dispositivos. No obstante, también depende de las características del agua de alimentación de la planta, ya que el sistema ERI-PX requiere de una gran exigencia en el pretratamiento debido a que si le entra suciedad podrían obstruirse y dejar de funcionar, por lo que en este sentido los demás dispositivos de recuperación como el DWEER y el KSB son más permisibles. Con respecto al dispositivo KSB⁵⁸, no se encontraron plantas desaladoras por OI en Canarias que dispongan de este sistema, sin embargo también se considera como una opción para este tamaño de plantas desaladoras.

En algunos casos las plantas desaladoras de gran capacidad, disponen de varios dispositivos en paralelo para conseguir cubrir la demanda de agua desalada, por ejemplo la planta n^o 7, tabla 7, emplea de hasta 15 ERI-PX en una línea y 2 DWEER en otra línea de producción.

⁵⁶ Salino Pressure Center, o.c.

⁵⁷ La capacidad de producción del DWEER es entre 2880 a 7200 m³/d aproximadamente. Fuente: Flowserve, consultada el 18/12/15 en: http://www.flowserve.com/es_ES/Products/Energy-Recovery-Devices/Work-Exchangers

⁵⁸ La capacidad de producción del KSB es entre 2500 a 4400 m³/d aproximadamente. Fuente: SalTec DT, 2006, consultada el 18/12/2015 en : http://www.tulumbapompa.com.tr/KSB_Urun_Dokuman/SaltecDT.pdf

7.3 Análisis de la evolución de los sistemas de recuperación de energía en la desalación por OI.

En este apartado se analiza la evolución de los sistemas de recuperación de energía en la desalación por OI. Para ello se han realizado una serie de diagramas Sankey⁵⁹, con la finalidad de poder observar la evolución del consumo energético en la misma planta habiendo pasado por diversas reformas o *retrofitting* para aumentar su eficiencia y reducir consumo de energía.

Los diagramas que se exponen a continuación están basados en una de las plantas visitadas (nº 2, Anexo II) en la que recientemente se ha llevado a cabo un *retrofitting* de turbinas Francis a sistemas ERI-PX aumentando el caudal de alimentación y por lo tanto el caudal de permeado. Sin embargo en este caso el diagrama Sankey representa una planta a la cual se le ha realizado un *retrofitting* de turbinas a CIP, manteniendo el caudal de producto de la planta original, para así poder comparar la evolución de una planta con la misma capacidad de producción y diferentes sistemas de recuperación de energía. Para ver los cálculos realizados consultar Anexo I.

Los siguientes diagramas Sankey representan la evolución del consumo específico de energía, en kWh/m³ de producto, de la misma planta desaladora (con una capacidad de producción de 259 m³/h y un 43% de conversión) acorde a los siguientes casos de estudio:

1. Sin recuperador de energía.
2. Con recuperador centrífugo turbina Francis (basado en datos de operación reales).
3. Con cámaras isobáricas del tipo ERI-PX, debido al *retrofitting* de turbinas a CIP y con la incorporación de membranas de última generación de la marca LG NANO H₂O a partir de enero de 2016 (basado en datos de diseño suministrados por el explotador y suponiendo capacidad de producción constante).

⁵⁹ Es un diagrama de flujo que representan líneas de flujo direccionales donde el ancho de las flechas es proporcional a la cantidad de flujo. Se suelen utilizar para visualizar las transferencias de energía o materiales entre los procesos. Fuente: Eficienciame consultada el 14/12/20015 en: <http://www.eficienciame.com/conceptos-energia-primaria-diagrama-de/>

En la figura 16 se representa la energía requerida por la planta desaladora (nº 2, Anexo II) sin recuperador de energía. Como se puede observar la energía aportada para realizar la desalación es de 5,57 kWh/m³ y se va conformando a lo largo de todo el proceso debido a pérdidas energéticas de diversas índoles, como pérdidas mecánicas de los equipos empleados, tales como el motor y la bomba alta presión, pérdidas de carga en la membrana y pérdidas hidráulicas por toda la instalación.

Con respecto al consumo específico del agua producto, este representa la energía mínima que se necesita para comenzar a realizar la OI a la presión osmótica de 27,91 bar⁶⁰, ya que requiere sobrepasar dicha presión osmótica para desalar. Por otro lado la energía que se obtiene con la salmuera representa la energía que se requiere para alcanzar la conversión a la que se quiere trabajar en la planta, que en este caso es al 43%.

⁶⁰ Presión osmótica obtenida de la simulación con el Programa LG NANO H₂O. Consultar Figura **¡Error! solo el documento principal..**

Diagrama Sankey Desalación por OI sin recuperador

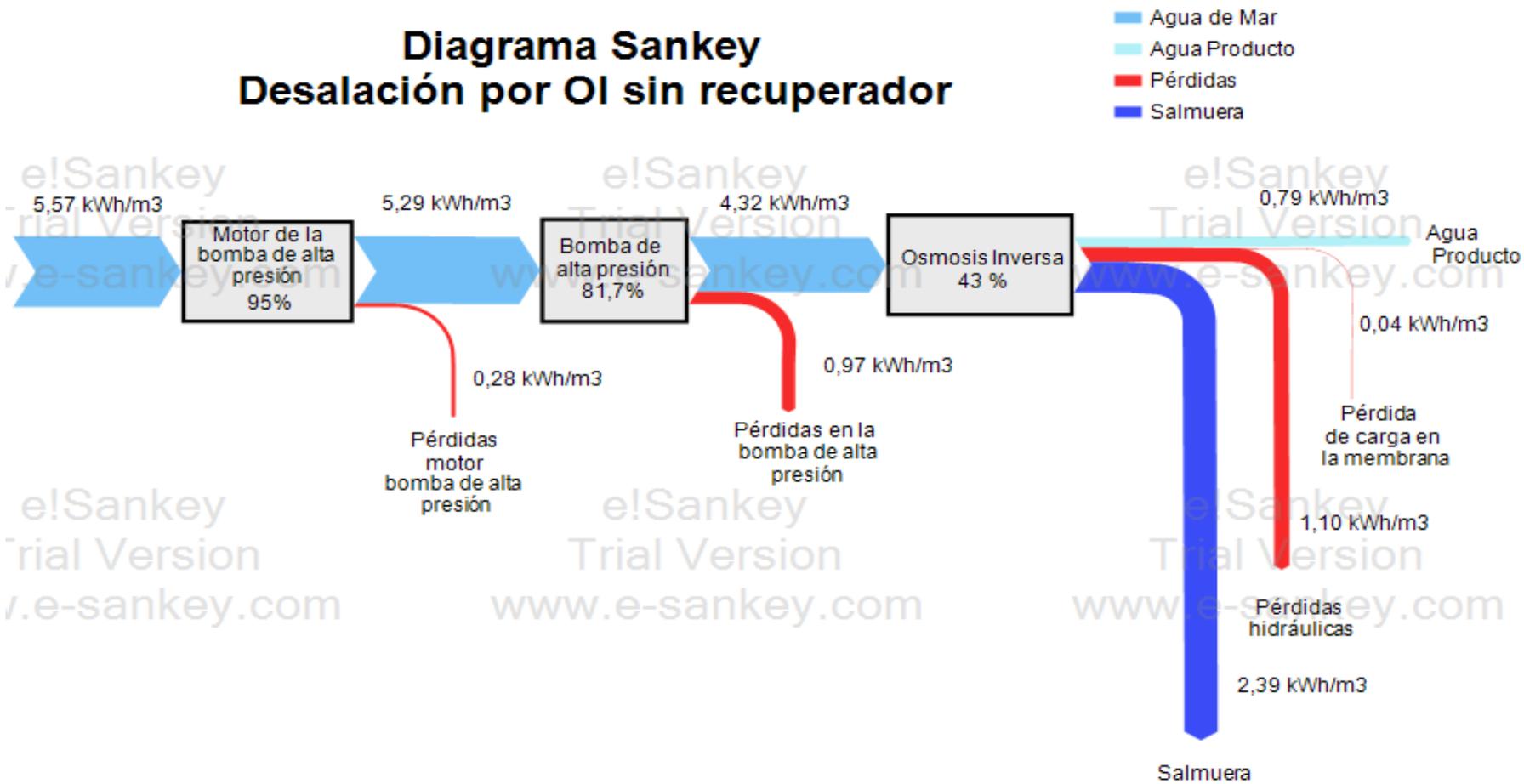


Figura 16: Diagrama Sankey de la planta desaladora (nº2, Anexo II) sin recuperador de energía.

En la figura 17 se representa la misma planta desaladora (nº 2, Anexo II) con un sistema de recuperación de energía centrífugo del tipo Turbina Francis. Este sistema de recuperación de energía fue uno de los primeros en utilizarse por su flexibilidad y buenos resultados como se explica en la introducción. De hecho la Turbina Francis funciona como una bomba invertida que recupera parte de la energía que sale con la salmuera y que en el caso anterior se desaprovechaba. De este modo la energía requerida por la planta para llevar a cabo la ósmosis inversa es menor, $3,65 \text{ kWh/m}^3$, ya que se consigue una recuperación de energía con la turbina Francis de $1,82 \text{ kWh/m}^3$. Los principales inconvenientes de las turbinas Francis son que ocupa mucho espacio, la recuperación de energía es menor que con respecto a los demás dispositivos tales como turbinas Pelton y las cámaras isobáricas y que es una tecnología ya obsoleta.

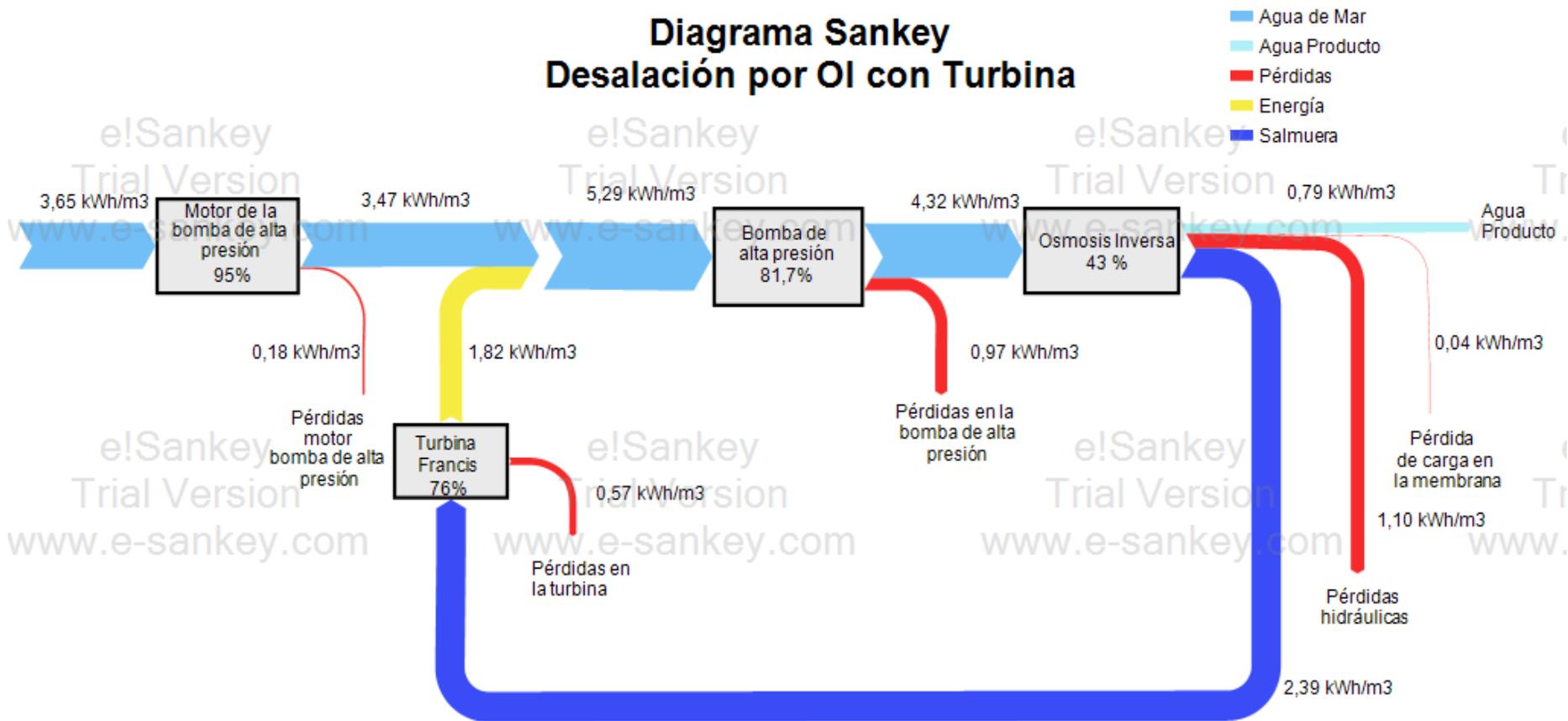


Figura 17: Diagrama Sankey de la planta desaladora (n^o2, Anexo II) con Turbina Francis.

En la figura 18 se representa la planta desaladora (nº 2, Anexo II) con un sistema de recuperación de energía del tipo ERI-PX. En este caso el gestor correspondiente no sólo realizó un *retrofitting* de turbinas a cámaras isobáricas, sino que también aumentó la producción de la misma, por lo que se obtenía un consumo específico similar con cámaras isobáricas y turbinas. Por ello, y para poder comparar entre los esquemas de las Figuras 8 y 9, se llevó a cabo una simulación con el programa LG Nano H₂O para obtener el consumo específico de la planta si se mantuviera la capacidad original de la misma. Para ver tanto los cálculos realizados como los datos obtenidos de la simulación, consultar el Anexo I.

Como se puede observar en la figura siguiente la energía requerida por la planta desaladora para realizar la OI es de 3,05 kWh/m³ y el ahorro energético que se consigue con este sistema es menor que con la turbina Francis, 1,34 kWh/m³. Esto es debido a que las cámaras isobáricas precisan de una bomba booster con su correspondiente motor de accionamiento, los cuales tiene un requerimiento de energía de 0,12 kWh/m³ que se le debe restar a la energía recuperada de la salmuera. No obstante, se consigue disminuir el consumo energético del proceso de ósmosis inversa en mayor medida que en los recuperadores centrífugos.

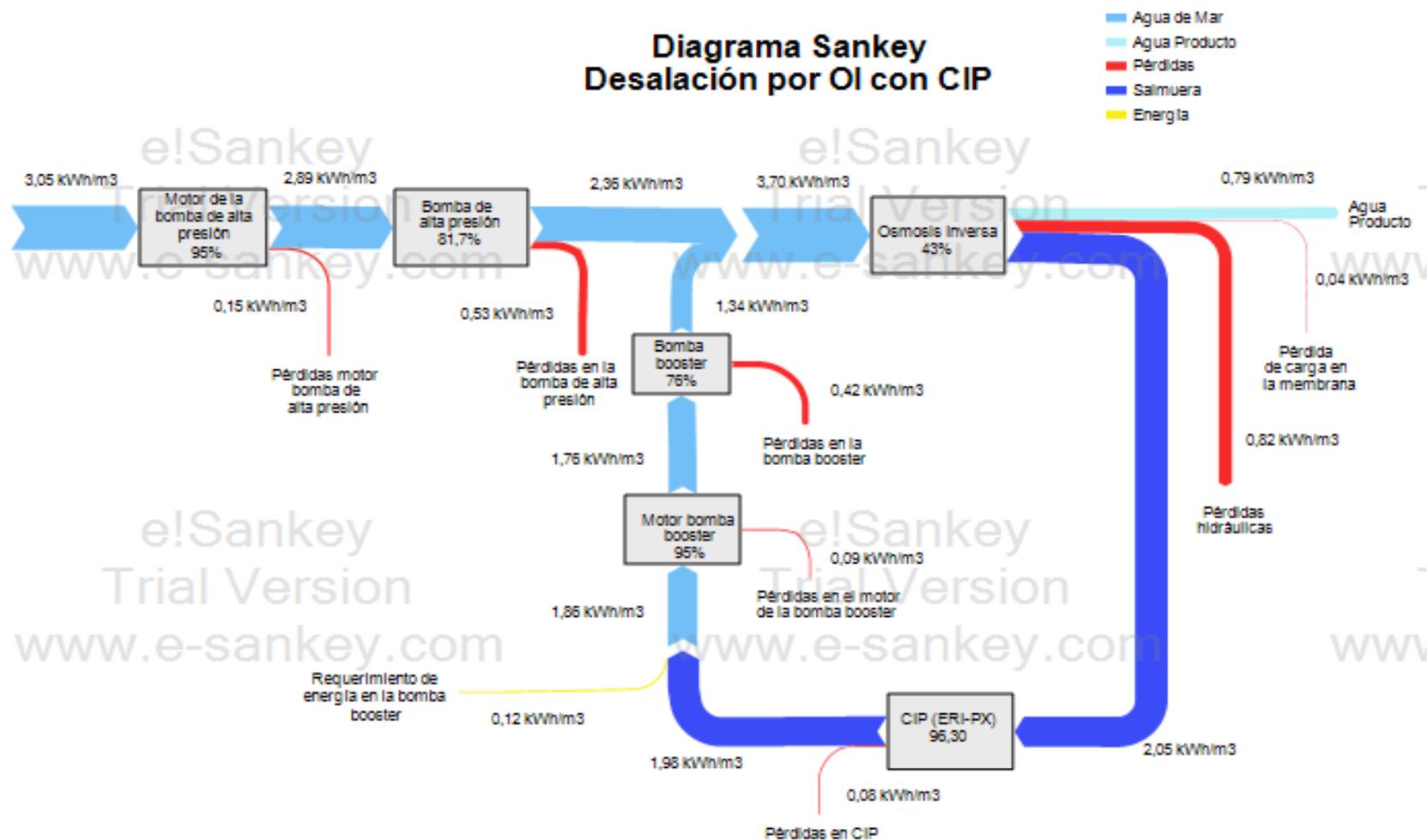


Figura 18: Diagrama Sankey de la planta desaladora (n^o2, Anexo II) con sistema ERI-PX.

En la siguiente tabla se recoge una recopilación de los datos principales de los diagramas Sankey con la finalidad de justificar lo que ocurre en cada uno de ellos en términos de:

- Consumo específico.
- Ahorro energético.
- Pérdidas mecánicas.
- Pérdidas hidráulicas.
- Pérdidas de carga en la membrana.
- Energía contenida en la salmuera.
- Pérdidas energéticas totales en cada caso, planta desaladora sin recuperador de energía, con turbina Francis y con sistema ERI-PX.

- Consumo específico:

Como se puede observar el consumo específico de energía es menor en la planta (nº2, Anexo II), con el sistema ERI-PX, debido a que este sistema se ha diseñado con un funcionamiento distinto a los sistemas de recuperación centrífugos, de tal modo que se obtienen mejores resultados en términos de rendimientos y permiten reducir el tamaño de la bomba de alta presión y por tanto el consumo de la misma.

- Ahorro energético:

Como se puede observar con el ERI-PX se obtiene un mayor ahorro de energía que con la turbina Francis, a pesar de que las CIP precisan de bombas booster con su respectivo motor de accionamiento, los cuales requieren de un aporte de energía para aumentar en 2- 3 bar la presión del agua de alimentación y así alcanzar la presión de funcionamiento de la bomba de alta presión. Es por ello que el ahorro energético obtenido con el ERI-PX, 1,98 kWh/m³, se ve penalizado por el consumo de la bomba booster, el rendimiento de la misma que en este caso es de tan solo un 76% y el rendimiento del motor de la misma restándole al ahorro energético obtenido con el ERI-PX una potencia de consumo de 0,64 kWh/m³.

• Pérdidas mecánicas:

Las pérdidas mecánicas se producen principalmente debido a la fricción en los cojinetes de los equipos empleados, tales como las bombas de alta presión y booster con sus respectivos motores y también en el sistema de recuperación de energía empleado. De tal modo que en el caso de la planta desaladora que no emplea recuperador de energía, las pérdidas mecánicas son menores debido a que no dispone de tantos equipos como en los casos en que se emplea una turbina Francis y un sistema ERI-PX. Con respecto a la planta desaladora que emplea la turbina Francis, en esta se obtiene una mayor pérdida mecánica que con el sistema ERI-PX, a pesar de que

con el ERI-PX se emplean más equipos que conllevan pérdidas mecánicas, debido por un lado a que el rendimiento de la turbina Francis es del 76 % con respecto al 96,3 % del sistema ERI-PX y por otro lado, con el sistema ERI-PX se reduce el tamaño de la bomba y por lo tanto la presión de alimentación al bastidor, permitiendo reducir la potencia suministrada a esa bomba. Por lo que al realizar el balance energético se multiplica una menor potencia de la bomba de alta presión por el rendimiento de dicha bomba dando como resultado que las pérdidas mecánicas serán menores con respecto al diagrama energético de la turbina Francis.

- Pérdidas hidráulicas:

Las pérdidas hidráulicas son debidas principalmente a las pérdidas de carga que sufre el fluido al atravesar los diferentes elementos de una instalación hidráulica, tales como en bombas, tuberías, válvulas y codos. Como se puede observar en la tabla 6, se obtiene el mismo valor de pérdidas hidráulicas, en términos de consumo energético, tanto en el caso de la planta desaladora sin recuperador de energía como en el caso de la planta desaladora con turbina Francis. Teóricamente se deberían obtener mayores pérdidas hidráulicas con la turbina Francis al tener un mayor número de equipos. Sin embargo en este caso no se ha tenido en cuenta las pérdidas hidráulicas en la turbina Francis por falta de información.

Comparando la planta desaladora con turbina Francis y sistema ERI-PX, se obtiene una mayor pérdida de carga con la turbina Francis. Teóricamente se debería obtener una mayor pérdida de carga en el sistema ERI-PX que en la turbina Francis, ya que el fluido tiene que atravesar una mayor número de elementos que incluye la bomba booster. Sin embargo al emplear el sistema ERI-PX se consigue reducir la presión de alimentación de 64,9 a 55,62 bar y en este caso las pérdidas hidráulicas se han calculado como resultado de la resta de la potencia de la alimentación menos la pérdida de carga de la membrana, la potencia a la salida de la salmuera y la potencia del agua producto. Por lo tanto, como la potencia de estos parámetros es directamente proporcional a la presión de alimentación, se obtienen valores inferiores de dichos parámetros en el sistema ERI-PX que con respecto a la turbina Francis y en consecuencia el cálculo de la pérdida hidráulica también es inferior. Para ver los cálculos realizados consultar el Anexo I.

- Pérdidas de carga en la membrana:

En este caso la pérdida de carga que se obtiene con la planta desaladora sin recuperador de energía y con la turbina Francis es la misma debido a que se emplean las mismas presiones y tipos de membranas. Sin embargo en la simulación llevada a cabo con del sistema ERI-PX la planta desaladora se diseñó con membranas de última generación del tipo LG NANO H₂O con la cual se obtienen menores pérdidas de carga, sin embargo en términos de consumo específico no se aprecia considerablemente. Por lo que en términos de presión tenemos que la pérdida de carga de las membranas en

el caso de la turbina Francis es de 1,4 bar y en el ERI-PX es de 1,2 bar ⁶¹. Sin embargo otro parámetro a tener en cuenta es el tiempo de funcionamiento de las membranas, ya que se ensucian y en consecuencia su conversión disminuye con el número de horas de funcionamiento mientras que la pérdida de carga aumenta. En este sentido en la planta desaladora con ERI-PX no se ha tenido en cuenta las horas de funcionamiento de las membranas, considerándolas nuevas y en el caso de la planta desaladora con turbina Francis los datos cedidos pertenecen a membranas con varias horas de funcionamiento.

- Energía contenida en la salmuera:

Como se comentaba previamente, esta energía representa la energía necesaria para alcanzar la conversión a la que trabaja la planta desaladora. En este caso se puede observar que el sistema ERI-PX requiere de una menor cantidad de energía para alcanzar la conversión del 43%, debido a que la presión de alimentación con este sistema es inferior (54,38 bar) comparada con en el caso con la turbina Francis (63,5 bar), permitiendo a su vez reducir el tamaño de la bomba de alta presión.

- Pérdidas energéticas totales:

Representa la suma de todas las pérdidas del tipo mecánico, hidráulico y de carga en las membranas. De tal modo que como se puede observar en la tabla 6 la planta desaladora con el sistema ERI-PX y membranas de última generación LG NANO H₂O, obtiene una menor cantidad de pérdidas mecánicas, hidráulicas y de carga en las membranas, como se explica previamente, y en consecuencia también presenta una menor cantidad de pérdidas energéticas totales con respecto a la turbina Francis.

Tabla 8: Resumen de los datos principales obtenidos en los diagramas Sankey.

	Consumo específico (kWh/m ³)	Ahorro de energía obtenido (kWh/m ³)	Pérdidas mecánicas totales (kWh/m ³)	Pérdidas hidráulicas totales (kWh/m ³)	Pérdida de carga en las membranas (kWh/m ³)	Energía contenida en la salmuera (kWh/m ³)	Pérdidas energéticas totales (kWh/m ³)
Planta sin recuperador de energía	5,57	0	1,25	1,10	0,041	2,39	4,78
Planta con turbina Francis	3,65	1,82	1,72	1,10 ⁶²	0,041	2,39	5,25
Planta con ERI-PX	3,05	1,92 ⁶³	1,27	0,82	0,037 ⁶⁴	2,05	4,18

⁶¹ Consultar Anexo I.

⁶² En este caso no se tienen en cuenta las pérdidas hidráulicas de la turbina Francis por falta de datos.

⁶³ El ahorro de energía en el sistema ERI-PX está formado por el ahorro que se consigue con el recuperador de energía y con la diferencia entre las potencias de consumo de la bomba de alta presión con la turbina Francis y el ERI-PX, ya que también se traduce en un ahorro energético.

⁶⁴ No se tiene en cuenta la evolución de las membranas en la planta desaladora.

Como conclusión, se puede ver que el sistema ERI-PX es más eficiente que la turbina Francis, debido a que se obtiene un menor consumo específico, un mayor ahorro de energía y menores pérdidas energéticas en el proceso de OI de la planta desaladora nº 2 del Anexo II.

7.4 Análisis de las bombas de alta presión comúnmente instaladas

La selección de la bomba de alta presión depende de las necesidades de presión y caudal de agua. Hay dos tipos diferentes de bombas instaladas en las plantas de ósmosis inversa, bombas centrífugas y las bombas de desplazamiento positivo. Las centrífugas son las que normalmente se instalan en plantas de gran tamaño, mientras que las bombas de desplazamiento positivo se suelen instalar en plantas pequeñas, a pesar de ser más eficientes, debido a que son más caras y requieren un mayor mantenimiento⁶⁵.

En la tabla siguiente, se muestran las características principales de las bombas centrífugas con respecto a las de desplazamiento positivo

Tabla 9: Características principales de las bombas centrífugas y de desplazamiento positivo⁶⁶.

	Centrifugas	Desplazamiento positivo
Mecánica	<p>Confiere velocidad al líquido produciéndose una presión en la salida (La presión se crea y como resultado se produce el flujo).</p> <p>Vibraciones y ruido en menor medida.</p> <p>Poco mantenimiento</p> <p>Requerimiento de variadores de frecuencia (sólo disponible en bombas de tamaño pequeño) para la variación de la presión.</p>	<p>Capta pequeñas cantidades de líquido y lo transfiere desde la succión hasta la abertura de descarga (Se crea el flujo y como resultado se produce la presión).</p> <p>Vibraciones y ruido</p> <p>Mantenimiento frecuente y costoso (cambio empaquetaduras y émbolos).</p> <p>Variación de la presión sin necesidad de ningún sistema de control.</p>
Rendimiento	<p>El flujo varía con el cambio de presión. Bajo rendimiento hidráulico < 85%</p>	<p>Flujo constante con el cambio de presión. Alto rendimiento hidráulico >90 %.</p>
Viscosidad	<p>La eficiencia disminuye con el aumento de la viscosidad debido a las pérdidas por fricción dentro de la bomba.</p>	<p>La eficiencia aumenta con el aumento de la viscosidad.</p>
Eficiencia	<p>Presenta la mayor eficiencia en su punto óptimo de trabajo. Por lo que a presiones mayores o menores (fuera del punto óptimo de trabajo), la eficiencia disminuye.</p>	<p>La eficiencia aumenta con el aumento de la presión.</p> <p>Menor consumo de energía</p>
Condiciones de entrada	<p>Se adapta mejor a presiones bajas y grandes caudales.</p> <p>El líquido debe estar en la bomba para crear un diferencial de presión. Una bomba seca no se cebará por sí misma, requiriendo de una succión positiva para el buen funcionamiento.</p>	<p>Se adapta mejor a presiones elevadas y pequeños caudales.</p> <p>Se crea una presión negativa en el puerto de entrada, por lo que una bomba seca se cebará por sí misma.</p>
Costes	<p>Para bombas del mismo tamaño, las centrífugas son más económicas.</p>	<p>Para bombas del mismo tamaño, las de pistones son más caras.</p>

⁶⁵ Veza J.M. (2002). *Introducción a la Desalación del Aguas* (p. 343). Las Palmas de Gran Canaria: Servicio de Publicaciones y Producción Documental de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

⁶⁶ Smart Energy (Energy-Efficient Flow Solutions by Design) consultada el 27/11/2015 en <http://www.blackmersmartenergy.com/comparativedata/centrifugal-pumps-vs-positive-displacement-pumps.html>

La elección del tipo de bomba se basa en las necesidades del proceso, por lo que se emplearán las bombas de desplazamiento positivo sobre las centrífugas en los siguientes casos:

- Cuando se requiere que el caudal sea precisamente controlado.
- Cuando el caudal debe permanecer constante bajo variaciones de presión del sistema.
- El sistema requiere de alta presión, y dispone de un reducido flujo.
- Se requiere el auto-cebado.
- Cuando se pretende mejorar la eficiencia energética de la planta, ya que disponen de un menor consumo energético.

Dentro del tipo de las bombas centrífugas se encuentran los dos diseños más empleados en la desalación de aguas por OI, bomba multietapa de carcasa partida axialmente (DMX) o segmentada (CSX). El diseño de ambos tipos se muestra a continuación.

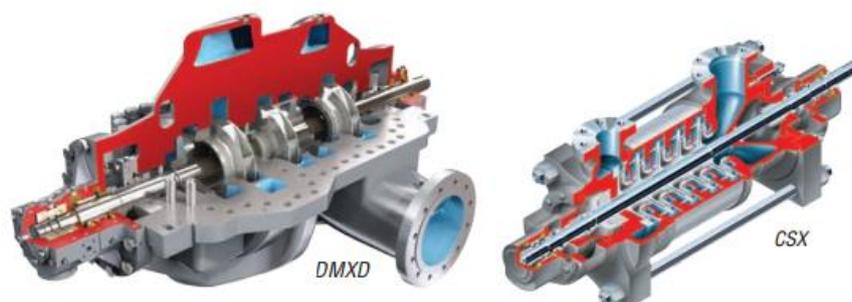


Figura 19: Tipos de diseños de las bombas de alta presión⁶⁷.

Según los entrevistados las principales ventajas de un diseño con respecto al otro es que el tipo DMXD tiene una vida útil más larga que las segmentadas, se les augura menor mantenimiento y, en caso de ser sometidas a ello, no se necesita desmontar conexiones hidráulicas sino sólo se debe destapar la cámara, por estos motivos la mayoría de los empresarios han elegido este diseño. Sin embargo, también comentan que las bombas con el diseño CSX son más económicas que las DMXD y ambas bombas se fabrican en materiales resistentes a la corrosión para garantizar una larga vida de rendimiento sin degradación.

Las principales ventajas entre un diseño de bomba centrífuga del tipo DMXD a una bomba del tipo CSX se pueden ver en la tabla 10.

⁶⁷ Flowserve, consultada el 25/11/2015 en <http://www.flowserve.com/files/Files/Literature/ProductLiterature/Pumps/fpd-18-s.pdf>

Tabla 10: Comparación entre diferentes diseños de bombas centrífugas⁶⁸.

	Centrífugas	
	Segmentada (CSX)	Cámara Partida (DMXD)
Ventajas	Económicas. Robustas.	Buen rendimiento hidráulico. Muy robustas. Fácilmente desmontables. Fáciles de mantener.
Inconvenientes	Bajo rendimiento hidráulico (<80% aproximadamente). Para mantenimiento es necesario desmontar tuberías y toda la bomba. Riesgo corrosión entre los segmentos.	Inversión elevada. Repuestos caros.

Con respecto al tipo de bomba de alta presión más solicitada por los empresarios para sus plantas de desalación por OI, se puede observar en la tabla 11, que la mayoría de los explotadores han elegido bombas centrífugas de la marca Flowserve S.L. (antiguamente denominada Ingersoll Dresser Pump S.A.). Muchos de ellos manifiestan que la marca Flowserve ofrece bastante fiabilidad y el servicio técnico es muy bueno, siendo el tiempo de espera de los repuestos menor a 24-72 horas (aunque depende del repuesto solicitado). De hecho una de las empresas dispone de una bomba de alta presión de la marca Sulzer pero su servicio técnico lo lleva Flowserve. No obstante una minoría de empresarios comenta que también es cuestión de la oferta de bombas de alta presión que halla en el mercado en el momento de la compra de los equipos y que algunas marcas ofrecen descuentos ventajosos si se compran tanto la bomba de alta presión como la bomba booster.

Tabla 11: Marca /Modelo de las bombas de alta presión de las plantas visitadas (Elaboración propia).

Planta	Marca/Tipo Bomba alta presión	Modelo Bomba alta presión
1	CAT/ Desplazamiento positivo	2541
2	Danfoss / Desplazamiento positivo	2.5 APP & 1.98 APM
3	KSB/ Centrífuga (Cámara Partida)	MTC-RO-A
	Sulzer/ Centrífuga (Cámara Partida)	MBN 80-MB N80-255-7
	Flowserve / Centrífuga (Cámara Partida)	6 x 13 DA-5
	Flowserve/ Centrífuga (Cámara Partida)	4 x 11 DA-7
4	Flowserve / Centrífuga (Cámara Partida y Segmentada)	6 x 13 DA-5 / 6 x 13 CS-5
5	Sulzer/ Centrífuga (Cámara Partida)	MB 150-360/4
6	Flowserve / Centrífuga (Cámara Partida)	8 x 13 DA-5
7	Flowserve /Centrífuga (Cámara Partida y Segmentada)	-
8	Danfoss (Desplazamiento positivo)	8.2

⁶⁸ Nieves Cifuentes, consultada el 26/11/2015 en:
http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45515/componente45513.pdf

8 ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA QUE MEJOR SE ADAPTAN A LA OPERACIÓN CON ENERGÍAS RENOVABLES

La aplicación de las energías renovables (EERR) a la desalación de aguas tanto de mar como salobres, es un tema que lleva siendo estudiado desde hace tiempo, en particular con la tecnología de OI por su alta eficiencia energética al lograr consumos específicos de energía menores de 3 kWh/m³⁶⁹, para agua de mar.

En ambos casos existen dos combinaciones posibles:

- Plantas desaladoras OI- EERR en aislado.
- Plantas desaladoras OI- EERR conectadas a la red eléctrica.

- Plantas desaladoras OI- EERR en aislado.

En el caso de un sistema aislado de OI, este puede incluir uno o varios sistemas de generación basados en EERR (eólica y solar fotovoltaica son las energías renovables más usadas), un grupo diésel y/o acumulación de energía, y un conjunto de cargas para formar una “microrred”. Las baterías o volantes de inercia, aunque no son indispensables, se recomiendan como sistemas de apoyo y almacenamiento de energía para adaptar el funcionamiento de la planta a la fuente de energía variable. El inconveniente más destacado de los sistemas en aislado son los posibles efectos negativos sobre la operatividad y durabilidad de las membranas al funcionar con una fuente variable de energía, es decir, fenómenos asociados a los ciclos de arranque-parada y a la operación con carga parcial.

- Plantas desaladoras OI- EERR conectadas a la red eléctrica.

En aquellos casos de conexión a la red, la planta puede operar en continuo de la misma forma que trabaja una planta convencional, actuando la fuente de EERR, como una fuente energética de sustitución.

Otro factor importante a tener en cuenta a la hora de combinar los procesos de desalación por OI con las EERR, es analizar qué tipo de fuente de energía es la que nos conviene. Para ello se analizan las fuentes de EERR más prometedoras para su aplicación a la desalación por OI:

- Energía solar fotovoltaica (FV).
- Energía eólica (EO).

⁶⁹ Markus Forstmeiera, Fredrik Mannerheima, Fernando D’Amatob, Minesh Shahb, Yan Liub, Michael Baldeab, Albert Stella, 2006, Feasibility study on wind-powered desalination, *Desalination*, 203, 463–470.

- Análisis de la EO como sistema de generación de energía

El acoplamiento de un sistema eólico a una planta de ósmosis inversa puede utilizar, energía mecánica o eléctrica, siendo la energía eléctrica la única opción viable para una planta de mediana o gran escala según estudios de investigación experimental⁷⁰. Esto es debido a que en el caso de la energía eléctrica, esta se puede almacenar y utilizar cuando no hay disponibilidad de viento, sin embargo al emplear la energía mecánica en un sistema eólico-OI, la planta sólo puede operar cuando hay disponibilidad de viento.

- Análisis de la FV como sistema de generación de energía

La combinación FV-OI, ha sido ampliamente desarrollada para pequeños sistemas aislados. El mayor inconveniente es la considerable inversión inicial y la disponibilidad de tierras, aunque el costo de los paneles solares fotovoltaicos ha disminuido en los últimos años. Por lo que la viabilidad económica del proyecto FV-OI dependerá de la distancia del sistema aislado a la red eléctrica, la capacidad de la planta necesaria y la salinidad del agua a tratar. No obstante este tipo de plantas desaladoras FV-OI se descartan para plantas de medianas y grandes capacidades porque no son económicamente viables. Actualmente están operativos varios sistemas de pequeña capacidad en lugares aislados, tales como Azla, Tangarfa (Marruecos) o Ksar Ghilène (Túnez)⁷¹.

Si se comparan ambos sistemas de generación de energía, se concluye que el sistema con EO es más rentable que la FV⁷². Sin embargo la decisión de instalar un sistema u otro dependerá de varios factores como, las condiciones de las fuentes renovables disponibles en el lugar en el que se quiere construir dicha tecnología, la superficie requerida, la calidad del agua de alimentación, el tamaño de la planta desaladora y el costo de capital del equipo.

La combinación de las tecnologías de desalación por OI con EERR en aislado, enfocado a plantas de mediana y grande capacidad, son la solución a la dependencia de los combustibles fósiles ocasionando un menor impacto ambiental por una reducción de emisiones de CO₂ y permitiendo establecer un sistema energético más sostenible. Sin embargo, es complicado introducir la desalación con EERR en el mercado del abastecimiento de agua, debido a su elevado coste de inversión lo que conlleva que el coste de producir un metro cúbico de agua sea superior al coste del agua producida en plantas desaladoras convencionales conectadas a la red eléctrica (generalmente inferior a 1 €/m³). Sin embargo, el coste del agua obtenida con EERR

⁷⁰ Baltasar Peñate, Fernando Castellano, Alejandro Bello, Lourdes García-Rodríguez, 2010, Assessment of a stand-alone gradual capacity reverse osmosis desalination plant to adapt to wind power availability: A case study, *Energy*, 36, 4372-4384.

⁷¹ V.J. Subiela, J.A. de la Fuente, G. Piernavieja, B. Peñate, 2008, o.c.

⁷² V.J. Subiela, J.A. de la Fuente, G. Piernavieja, B. Peñate, 2008, Canary Islands Institute of Technology (ITC) experiences in desalination with renewable energies, *Desalination and water treatment*, 7, 220-235.

aumenta con la disminución de la capacidad de producción, llegando a variar entre 1,5 a 6 €/m³ ⁷³, dependiendo de la tecnología empleada, la salinidad del agua de alimentación y el potencial de la energía renovable. En la tabla 12 se puede observar el coste del agua por metro cúbico de algunas combinaciones tecnológicas.

Como se puede observar la planta desaladora OI - eólica de agua de mar en aislado con un sistema de recuperación de energía, es la más rentable, siendo el costo de agua producida por metro cúbico competitivo con respecto al coste de las plantas actuales con energías convencionales. Por lo que una innovación para reducir costes sería incorporar los sistemas de recuperación energía del tipo CIP (con consumos específicos inferiores a 3,3 kWh/m³) y con carga variable, lo cual permitiría reducir el coste de agua desalada debido a que se podrían aumentar las horas de operación anuales, permitiendo convertir estas tecnologías en soluciones viables económicamente.

Tabla 12: Promedio de los costos de algunas combinaciones tecnológicas^{74, 75}.

Combinación	Coste €/m ³	Observaciones
Planta desaladora OI-eólica de agua de mar en aislado	1,07	Capacidad nominal: 1.000 m ³ /d. Horas de operación anuales: 5.200. Consumo específico de energía: 3,3 kWh/m ³ . Con sistema de recuperación de energía. Vida útil: 20 años. Tasa de interés: 7%
Planta desaladora OI-FV de agua de mar en aislado	4,50	Capacidad nominal: 1.000 m ³ /d. Horas de operación anuales: 3.000. Consumo específico de energía: 3,3 kWh/m ³ . Con sistema de recuperación de energía Vida útil: 20 años. Tasa de interés: 7%
Planta desaladora OI-FV de agua de salobre en aislado.	3,75	Capacidad nominal: 100 m ³ /d. Horas de operación anuales: 3.000. Consumo específico de energía: 1,6 kWh/m ³ . Sin sistema de recuperación de energía Vida útil: 20 años y Tasa de interés: 7%

Sin embargo, la incorporación de los sistemas de recuperación de energía también presenta una problemática y es que cuando se decide instalar un recuperador de energía, lo que se determina es su punto óptimo de funcionamiento en la instalación. Esto es posible, gracias a que la planta está funcionando en todo momento en un régimen estable de energía. Sin embargo, cuando hablamos de plantas de OI que dependen exclusivamente de la energía producida por un sistema de EERR, el planteamiento cambia. Debido a que este tipo de energías es fluctuante y depende de

⁷³ Referencia el ITC, debido a la amplia experiencia en este campo.

⁷⁴ Michael Papapetrou , Marcel Wieghaus , Charlotte Biercamp, 2010, *Roadmap for the development of desalination powered by renewable energy*, consultada el 07/12/2015 en : http://www.prodes-project.org/fileadmin/Files/ProDes_Road_map_on_line_version.pdf

⁷⁵ Valores estimados del ITC por su amplia experiencia en este campo.

una serie de factores medioambientales totalmente ajenos al control humano y en consecuencia no se puede asegurar que la generación de energía sea siempre constante. Por lo tanto, aunque se calcule la instalación de un dispositivo recuperador de energía para que funcione en un punto óptimo de eficiencia, éste no siempre va a estar trabajando en este estado, por lo que no se obtienen los resultados esperados de ahorro energético. Además de esto, se estarán introduciendo dispositivos que pueden ser causa de posibles fallos en el funcionamiento de la planta y no estarán siendo aprovechados.

Debido a estos argumentos es necesario estudiar las posibilidades que ofrecen los diferentes sistemas de recuperación de energía del tipo CIP en plantas de OI accionadas con EERR, así como la configuración más adecuada para este tipo de sistemas en términos de diseño de la planta, sistemas de almacenamiento, sistemas de control y automatización, etc. Por ello se ha realizado una intensa búsqueda en la literatura sobre estudios o proyectos que combinen la desalación por OI con EERR. Existen numerosos estudios sobre sistemas de desalación por OI con EERR.

Algunos de esos estudios han sido desarrollados por el ITC como⁷⁶:

- *Proyecto SDAWES*: analiza una planta desaladora de agua de mar de tres tipos, OI, VC y EDR mediante un parque eólico autónomo.
- *Proyecto AERODESA I*: estudia la combinación de un aeromotor con acoplamiento mecánico a planta desaladora.
- *Proyecto AERODESA II*: estudia la combinación de un aeromotor con acoplamiento hidráulico a planta desaladora.
- *Proyecto AEROGEDESA*: estudia la combinación de un aerogenerador con acoplamiento eléctrico a planta desaladora.
- *Proyecto DESSOL*: analiza un sistema de desalación con energía solar fotovoltaica.
- *Proyecto MORENA*: analiza un sistema de desalación por OI con energía solar fotovoltaica y mediante el uso de dispositivos de recuperación de energía como la bomba Clark.
- *Proyecto CONTEDES*: estudia la combinación de un sistema de desalación por OI con un motor diésel, que puede ser alimentado con biodiésel y la planta también dispone de dos bombas Danfoss como sistemas de recuperación.

⁷⁶ Julieta C. Schallenberg , 2000, Las energías renovables en canarias: implementación, estrategias y perspectivas, consultada el 05/12/2015 en http://jrguezs.webs.ull.es/tecnologia/tema5/eneren_can.pdf

- *Proyecto SODAMEE (ULPGC-ITC)*: estudia la combinación de una pequeña planta desaladora de agua de mar por OI sin recuperación de energía accionada con energía eólica sin acumulación de energía.

La mayoría de estos proyectos están enfocados a plantas desaladoras a pequeña escala en lugares aislados sin red eléctrica y con una gran fuente de energía renovable, bien eólica, solar o ambas en conjunto, pero sin el uso de recuperadores de energía. En este caso nos centraremos sólo en aquellos proyectos que han empleado sistemas de recuperación de energía basados en cámaras isobáricas o en intensificadores de presión.

- Proyecto CONTEDES:

El objetivo de este proyecto es abastecer de agua potable a pequeños pueblos aislados de la red eléctrica (menos de 1000 habitantes), a partir de agua salobre o salada. El proyecto consiste en una planta desaladora por OI alimentada por un generador de energía diésel (pudiendo ser biodiésel) de 16 kW y con 2 días de autonomía en continuo y dos bombas Danfoss en paralelo. La planta se encuentra montada en un contenedor de 15 m², de fácil transporte e instalación, con alta seguridad y sencilla operación y mantenimiento. Los principales datos de operación son, capacidad de producción de 1875 l/h, conversión de un 40%, presión de trabajo de 55 bar y consumo específico de 3,2 kWh/m³. El primer prototipo de este proyecto se instaló en Alhucemas (Marruecos) en 2004 después de un terremoto que devastó la región⁷⁷.

- Estudio basado en el proyecto SDAWES :

Como se comentó previamente, el proyecto SDAWES consiste en una planta de desalación de agua de mar de tres tipos, OI, VC y EDR mediante un parque eólico autónomo, sin recuperador de energía. Por lo que tras el éxito del proyecto, el ITC fue más allá y realizó un experimento basado en el proyecto SDAWES, pero incorporaron al diseño de la planta un sistema de recuperación de energía del tipo RO-KINETIC. El experimento consiste en una planta por OI accionada por un aerogenerador en aislado, con apoyo de baterías, volantes de inercia, dos generadores diésel y el correspondiente sistema de control. Para ello se evaluó el diseño más adecuado para este sistema con una producción de 1000 m³/d de agua potable. Los diseños planteados fueron dos, una planta con capacidad gradual, que consiste en dos líneas de 400 m³/d de capacidad y una línea de 200 m³/d (todas con una conversión del 35 %) capaces de operar independientemente, siendo conectadas o desconectadas dependiendo de la cantidad de energía disponible. La segunda opción consiste en una planta por OI (con una conversión del 40%), que puede trabajar dentro de un rango de consumo energético, únicamente cuando el recurso del viento es suficiente para suministrar toda la energía requerida por la planta. Todas las bombas disponen de

⁷⁷ V.J. Subiela, J.A. de la Fuente, G. Piernavieja, B. Peñate, 2008, o.c

variadores de frecuencia que permiten adaptar suavemente el flujo de agua de mar a la energía eólica disponible y con respecto al recuperador de energía, se eligió el RO-KINETIC porque es flexible y capaz de adaptarse rápidamente al flujo y a la conversión deseada. Los resultados demuestran que con ambos diseños, las plantas desaladoras presentaban un consumo energético medio bastante aceptable (2,78 kWh/m³ con el diseño fijo y 2,97 kWh/m³ con el diseño gradual), no obstante la planta con capacidad fija permite la producción de una mayor cantidad de agua al año (2-8%) en comparación con la planta gradual y además en los meses con menor recurso eólico también producía una mayor cantidad de agua, no obstante la planta operaba un menor número de horas al año. Sin embargo, la planta con capacidad gradual presentó un menor exceso de energía y además operaba más horas al año, afectando en menor medida a la durabilidad de las membranas. Por lo que finalmente se recomienda el diseño gradual para la optimización de una planta desaladora con EERR ⁷⁸ .

- Estudio basado en el proyecto DESSOL :

Este estudio está basado en el proyecto DESSOL, el cual consiste de una planta de OI accionada mediante energía fotovoltaica, que produce 30 m³/d y trabaja con un factor de conversión del 36%. Consta de una bomba de alta presión de desplazamiento positivo que incrementa la presión del agua hasta 56 bar para su entrada en el bastidor. Como sistema de recuperación de energía, se emplea un ERI-PX-15 con el cual se consigue un consumo específico de 2,54 kWh/m³ y la idea de este estudio es conocer la influencia del sistema de recuperación de energía y el incremento de la energía solar recogida en el número de horas de funcionamiento diarias y la calidad del agua. La energía requerida por la planta la produce un pequeño campo fotovoltaico, compuesto por diferentes tipos de paneles con seguidores solares, cuyos fabricantes son (Lorentz, Degertracker y TRAXLE). En conjunto de potencia fotovoltaica instalada es de 5,6 Wp, con su respectivo sistema de baterías para abastecer un consumo de energía de 41 kWh en un promedio de funcionamiento de 8 h/d.

- Proyecto MORENA:

El proyecto Morena (módulo rural energéticamente autosuficiente), consiste en un módulo que dispone de una planta de agua de mar por OI y de un sistema híbrido de energía eólica y fotovoltaica, el cual permite suministrar agua potable a un pueblo de 185 habitantes (considerando 20 l/d por habitante). El proyecto consta de una planta desaladora de OI que produce 154 l/h de agua desalada con un factor de conversión del 18%. La energía requerida por la planta la produce un sistema híbrido compuesto por un pequeño campo fotovoltaico de 600 Wp, un aerogenerador de 890 W a 13 m/s y un banco de baterías de 868 Ah de capacidad nominal a C100. El sistema está montado en un contenedor de 15 m² que le confiere un alto nivel de seguridad, independencia, y simplicidad de operación y mantenimiento. El contenedor está

⁷⁸ Baltasar Peñate, Fernando Castellano, Alejandro Bello, Lourdes García-Rodríguez, 2010, o.c.

dividido en tres zonas, una que alberga la unidad de desalación, otra que aloja el banco de baterías, y la última que contiene los paneles eléctrico y de control y adquisición de datos, y los reguladores (paneles PV y aerogenerador). Las condiciones de pozo izquierdo son, velocidad media anual del viento de 8 m/s, radiación solar horizontal de 5,5 kWh/m²/d y temperatura media de 23°C. La bomba de alta presión dispone de un VFD y proporciona agua de mar a la bomba Clark a una presión de 14 bar con un flujo nominal de 13,5 l/min y esta la impulsa hacia el bastidor a 40 bar, produciendo un consumo específico de 3,74 kWh/m³⁷⁹.

- Proyecto SODAMEE (ULPGC-ITC):

Este proyecto pretende probar en condiciones reales de variabilidad el comportamiento de una pequeña planta desaladora de agua de mar por OI sin recuperación de energía accionada con energía eólica sin acumulación de energía.

De los primeros test realizados se desprende que la planta se comporta adecuadamente, estableciéndose una nube de puntos de operación muy extensa en función de la energía disponible (haciéndose variar caudales de alimentación o presiones de operación, según el punto de energía disponible) obteniéndose una variabilidad imprecisa de la conversión de la planta y conductividades de agua producto en función de la misma.

Esta estrategia, concluye el estudio, sería trasladable a escalas mayores, teniendo en cuenta el funcionamiento de los recuperadores de energía, con lo que se disminuirían el número de paradas⁸⁰.

- Estudio de un sistema ERI-PX en condiciones de régimen variable:

Este estudio es sobre el comportamiento de un sistema de recuperación de energía en una planta de OI en condiciones de funcionamiento de régimen variable con un sistema ERI-PX. Para ello emplearon un programa de simulación denominado SIPLOI, que permite conocer el comportamiento de una membrana de ósmosis inversa sometida a condiciones de carga variable, además del caudal y la presión del flujo de la salmuera a la salida de la membrana, necesaria para determinar el diseño más apropiado del sistema de recuperación con carga variable. Por otro lado realizaron un estudio de las curvas de energía características del sistema de recuperación elegido, con la finalidad de establecer los rangos de operación admisibles para dicho sistema bajo condiciones de carga variable, facilitando la decisión a la hora de decantarse por uno u otro sistema. Los resultados demuestran que el rango de funcionamiento es

⁷⁹ Vicente J. Subiela*, Juan A. de la Fuente, Gonzalo Piernavieja, Baltasar Peñate, 2008, o.c.

⁸⁰ José A. Carta, Jaime González, Pedro Cabrera, Vicente J. Subiela, 2014, Preliminary experimental analysis of a small-scale prototype SWRO desalination plant, designed for continuous adjustment of its energy consumption to the widely varying power generated by a stand-alone wind turbine, *Applied Energy*, 137, 222–239.

limitado y depende del modelo del ERI-PX, por ejemplo para el modelo ERI-PX 25 el rango de presiones de trabajo es de 30 a 70 bar y el caudal de rechazo permitido es de 3,2 a 5,8 m³/h. Con el modelo ERI-PX 45 el rango de presiones de trabajo es de 40 a 60 bar y el caudal de rechazo es de 5,6 a 10,2 m³/h y con el modelo ERI-PX 70 el rango de presiones es de 48 a 65 bar y el caudal de rechazo permitido es de 9 a 11,8 m³/h aproximadamente, por lo que instalar uno u otro modelo significa limitar el rango de la zona donde se puede garantizar el correcto funcionamiento del intercambiador de presión respecto a los caudales de estos dispositivos, llegando incluso a afectar negativamente al conjunto del sistema aumentando su tasa de fallo⁸¹.

- Estudio de un sistema ERI-PX en condiciones de régimen variable:

El siguiente estudio es fruto de una tesis doctoral en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria a manos de Francisco Javier García Latorre. Se titula “Análisis y simulación de la tecnología de ósmosis inversa con fuentes energéticas no convencionales” y en él compara algunos sistemas de recuperación de energía, tales como el Turbocharger, turbina Pelton, Bomba Clark y ERI-PX para una planta con una capacidad de producción de 1,5 a 5 m³/h. Como resultado de su estudio deduce que la bomba Clark da buenos resultados pero se trata de un dispositivo para instalaciones a muy pequeña escala. Con respecto al Turbocharger y a la turbina Pelton el autor indica que al estar trabajando con EERR la generación de energía no es siempre constante, por lo que aunque se calcule la instalación de un dispositivo recuperador de energía para que funcione en un punto óptimo de eficiencia, este equipo recuperador de energía, no siempre va a estar trabajando en este estado, por tanto puede que no se obtengan los resultados esperados de ahorro energético. Además de esto, se están introduciendo dispositivos que pueden ser causa de posibles fallos en el funcionamiento de la planta, y sin embargo no están siendo aprovechados. Debido a estas razones no es adecuada la opción de instalar Turbinas Pelton o Turbocharger. En cuanto al caso del ERI-PX, ocurre que su diseño está hecho para que su funcionamiento se active a partir de 2,1 m/s. Sin embargo, tratándose de energía renovable, no se puede asegurar que siempre se obtenga la energía suficiente como para estar tratando con este rango de flujo. Por lo que es otra opción que se desecha, puesto que puede haber momentos en los que el PX esté sin actuar y provoque fallos en el funcionamiento de la instalación. Como solución final el autor plantea una turbina Pelton con un variador de velocidad para que adecúe en todo momento el funcionamiento de la bomba, consiguiendo con ello la mejora del rendimiento energético de la instalación. No obstante el variador de velocidad requiere de una energía para funcionar, por lo que también plantea acoplar un generador eléctrico a la turbina Pelton para que aprovechara la energía que se obtiene con el rechazo⁸².

⁸¹ Lidia Segura Acosta y Ignacio de la Nuez Pestana, 2008, *Estudio del comportamiento de un sistema de recuperación de energía en una planta de ósmosis inversa en condiciones de funcionamiento de régimen variable, fundamentado en el empleo de un sistema PX*, Universidad de las Palmas de Gran Canaria, consultada el 04/12/2015 en : http://acceda.ulpgc.es/bitstream/10553/6636/1/0231633_00031_0001.pdf

⁸² Francisco Javier García Latorre, 2012, *Análisis y simulación de la tecnología de ósmosis inversa con fuentes energéticas no convencionales*, Universidad de las Palmas de Gran Canaria, consultada el 07/12/2015 en http://acceda.ulpgc.es/bitstream/10553/9742/4/0675367_00000_0000.pdf

- Proyecto ENERCON (Sistema autónomo):

El Departamento de Desalación de ENERCON ha desarrollado un nuevo sistema de recuperación de energía para la desalación de OI accionado mediante energía eólica, el cual se instaló en la isla de Utsira, Noruega en el 2004 (en fase experimental). El diseño del recuperador de energía es similar al Osmorec, pero en este caso el dispositivo consiste en una bomba de baja presión (20 bar), de tres pistones conectados con válvulas antiretorno y válvulas automáticas controladas por un PLC, pero sin necesidad de la bomba booster. La bomba de alta presión que emplean en este proyecto es del tipo centrífuga y requiere de un VDF. El modo de operación del recuperador de energía permite transferir una presión de hasta 70 bar, necesaria para el proceso de OI, además también permite ajustar el rango de funcionamiento en un 12,5 - 100% de disponibilidad de energía de una manera muy eficiente. Por otro lado con este sistema se puede prescindir del uso de productos químicos que pueden causar incrustaciones. El consumo de energía de una planta desaladora de agua de mar por OI con este sistema es entre 2-2,8 kWh/m³ y en el caso de plantas desaladoras de agua salobre es entre 0,8-1,3 kWh/m³. No obstante a pesar de presagiar buenos resultados, se desestimó comercialmente esta opción por motivos empresariales⁸³.

Como se puede observar, la mayoría de los estudios de plantas desaladoras de OI con EERR, son de tamaño muy reducido (< 100 m³/d) y a pequeña escala (100 – 1000 m³/d) y emplean energía eólica, fotovoltaica o una hibridación de ambos con apoyo de un grupo electrógeno diésel, baterías o volantes de inercia, para tratar de proporcionar unas condiciones de funcionamiento más estables. Sin embargo, tanto los componentes hidráulicos y como el dispositivo de recuperación de energía tienen un punto de trabajo muy específico en términos de caudal y presión, en el cual la planta operará con una eficiencia energética óptima. Cuanto más lejos del punto de trabajo óptimo opere la planta, menor será la eficiencia energética. Por lo que se debe implementar sistemas de control y monitorización, con el fin de ajustar los parámetros de funcionamiento del flujo de alimentación. En la mayoría de los casos, se emplea un dispositivo de estrangulamiento o un variador de frecuencia (VFD), para evitar un exceso de energía eléctrica, disminuyendo la disipación de la misma y en consecuencia, el consumo específico de energía es menor. Sin embargo los VFD para plantas de tamaño mediano y grande (1000 kW) presentan algunos inconvenientes que limitan su uso, como sus altos costes de inversión (pudiendo llegar a ser superiores a los costes del motor y la bomba de alta presión), dispone de una eficiencia de conversión eléctrica interna del 97% y puede reducir la eficiencia de las bombas, debido a que el punto de funcionamiento de la bomba variará con la velocidad del impulsor. Por lo tanto, la decisión de incorporar VFD tanto a la bomba de alta presión como a la bomba booster, está determinado por el costo de la energía en un lugar determinado y por los costes de inversión de la planta⁸⁴.

⁸³ Kay Paulsen, Frank Hensel, Introduction of a new Energy Recovery System—optimized for the combination with renewable energy, 2005, *Desalination*, 184, 211–215.

⁸⁴ Thomas Manth, Michael Gabor, Eli Oklejas, 2003, Minimizing RO energy consumption under variable conditions of operation, *Desalination*, 157, 9-21.

Las conclusiones que se obtienen en base a la literatura se pueden clasificar con respecto al tamaño de la planta⁸⁵:

- Plantas desaladoras OI-EERR a muy pequeña escala (< 100 m³/d).
- Plantas desaladoras OI-EERR a pequeña escala (100 – 1000 m³/d).
- Plantas desaladoras OI-EERR a mediana escala (> 1000 – 5000 m³/d).
- Plantas desaladoras OI-EERR a gran escala (> 5000 m³/d).

En todos los casos se va a disponer como mínimo de un sistema de almacenamiento de energía y sistemas de control y monitorización, como se puede observar en los proyectos o estudios con sistemas CIP e intensificadores de presión encontrados en la literatura. Además en lo relativo a los sistemas de recuperación de energía, sólo se tendrán en cuenta los sistemas de intensificación de presión como la Bomba Danfoss y bomba Clark y los dispositivos basados en CIP, tales como el KSB, DWEER, ERI-PX y ¡Save Danfoss ya que los demás dispositivos basados en CIP han sido descartados por diferentes motivos.

- Plantas desaladoras OI-EERR a muy pequeña escala

Las plantas desaladoras por OI accionadas por energía FV con sistemas de recuperación del tipo bomba Danfoss⁸⁶ o bomba Clark⁸⁷, se consideran una solución adecuada para este tipo de plantas, para zonas con alta y media radiación solar, aisladas y donde carecen de la infraestructura adecuada de red eléctrica, como ocurre en algunas zonas de África y Sudamérica.

No obstante, también puede considerarse otra opción para este tipo de plantas desaladoras, por ejemplo una planta desaladora de OI accionada con FV y con un sistema ERI-PX (Proyecto DESSOL). En este caso habría que llevarse a cabo el estudio económico pertinente, ya que si se instala un ERI-PX⁸⁸ con sistema de almacenamiento de energía, el coste de inversión de la planta desaladora sería mayor que en el caso de una planta con la bomba Clark, ya que el sistema ERI-PX dispone de una bomba booster, de una bomba de alta presión y del propio recuperador de energía. Sin embargo con el sistema ERI-PX se obtiene una reducción en el consumo de energía mayor que con la bomba Clark, por lo que para una vida útil de la instalación de 20 años, se podría compensar tales gastos de inversión del sistema ERI-PX.

⁸⁵ Valores estimados del ITC por su amplia experiencia en este campo.

⁸⁶ La capacidad de producción máxima de la bomba Danfoss es de 30 m³/d aproximadamente. Fuente : Danfoss, consultada el 04/12/2015, o.c.

⁸⁷ La capacidad de producción máxima de la bomba Clark es de 3,7 m³/d aproximadamente. Fuente: ITC.

⁸⁸ La capacidad mínima de producción del ERI-PX es de 108 m³/d aproximadamente. Fuente: Energy Recovery, consultada el 18/12/15, o.c.

En todos los casos estas plantas desaladoras deben disponer de sistemas de almacenamiento, normalmente baterías y sistemas de control tal como variadores de frecuencia, para tratar de conseguir un suministro de energía más estable.

- *Plantas desaladoras OI-EERR a pequeña escala :*

Los sistemas de recuperación del tipo CIP que mejor se adaptarían a este tamaño de planta son sistema el ERI-PX y el ¡Save Danfoss ⁸⁹, con el correspondiente sistema de almacenamiento y variadores de frecuencia para poder garantizar un suministro de energía mínimo que permita mantener en funcionamiento de estos dispositivos. Esto es debido a que en los recuperadores de desplazamiento rotativo la entrada de los fluidos al dispositivo no está controlada por válvulas sino que el propio fluido de admisión, es el que activa el funcionamiento del dispositivo. Por lo que en estos casos es necesario que la corriente de admisión tenga una velocidad mínima de 2,1 m/s ⁹⁰ para el sistema ERI-PX y para el dispositivo ¡Save 21 se debe disponer de un caudal mínimo de 7 m³/h ⁹¹ (dependiendo del modelo de cada uno de los dispositivos). Por lo que tratándose de energías renovables, no se puede asegurar que siempre se obtenga la energía suficiente como para estar tratando con este rango de flujos. Es por ello que estos dispositivos requieren de sistemas de almacenamiento y sistemas de control y monitorización.

Por otro lado, en el caso del ERI-PX se dispone de ensayos experimentales con EERR con buenos resultados (Proyecto DESSOL), sin embargo en el caso del ¡Save Danfoss, no se han encontrado ensayos experimentales con EERR y apenas existen plantas desaladoras instaladas en la actualidad con este dispositivo, por lo que se requiere una mayor investigación con este tipo de dispositivos.

- *Plantas desaladoras OI-EERR de mediana y gran escala:*

Con respecto a las plantas desaladoras por OI accionadas con EERR de mediana y gran escala, son escasos los estudios o proyectos en la literatura. No obstante, en base a los sistemas de cámaras isobáricas estudiadas anteriormente se deduce que los sistemas más adecuados para este tamaño de plantas serían los sistemas de recuperación de energía del tipo CIP, tales como el DWEER⁹², KSB⁹³ y el ERI-PX en una

⁸⁹ La capacidad de producción del ¡Save Danfoss es entre 302,4 –749 m³/d aproximadamente. Fuente: ¡Save Danfoss, consultada el 18/12/15, o.c.

⁹⁰ Energy Recovery Inc, consultada el 03/12/2015 en <file:///C:/Users/Sigrid/Downloads/80019-01-8%2065%20Series%20Manual.pdf>

⁹¹ Data sheet, Energy Recovery Device ¡Save 21-40, Consultada el 03/12/2015 en: <file:///C:/Users/Sigrid/Downloads/Data%20sheet%20¡Save%2021-40.pdf>

⁹² La capacidad de producción del DWEER es entre 2880 a 7200 m³/d aproximadamente. Fuente: Flowserve, consultada el 18/12/15, o.c.

⁹³ La capacidad de producción del KSB es entre 2500 a 4400 m³/d aproximadamente. Fuente: SalTec DT, 2006, consultada el 18/12/2015, o.c.

planta desaladora con un diseño gradual, es decir, que existan varias líneas de producción capaces de operar independientemente, siendo conectadas o desconectadas dependiendo de la cantidad de energía disponible, ya que ofrece un alto grado de flexibilidad en el diseño del sistema. Además la planta desaladora también debe disponer del correspondiente sistema de almacenamiento, sistema de control y monitorización y de un sistema de gestión de la carga.

El sistema de gestión de cargas consiste en hacer un estudio del consumo, ya que es de especial importancia que el diseño de la instalación permita satisfacer horas punta de consumo de una forma satisfactoria a todos los usuarios. Esto se puede conseguir, por ejemplo, priorizando los consumos, es decir, en el caso de que la energía producida sea insuficiente se desconectan aquellas cargas que no sean críticas, para así asegurar el suministro de las declaradas como prioritarias. De esta forma, se reduce el pico de consumo en las horas punta y se aumenta el de las horas valle. Esta compensación del consumo contribuye a que los equipos de generación tengan una potencia nominal más baja y sean, por lo tanto, más baratos⁹⁴. De tal modo que la combinación de sistemas de almacenamiento, sistemas de gestión de carga y sistemas de control y automatización, permita a una planta desaladora por OI con EERR disponer de un suministro de energía lo más estable posible.

Por otro lado, se plantea otra opción para este tamaño de plantas desaladoras por OI - EERR, que consiste en un planta sin sistemas de almacenamiento, pero con un sistema de control y monitorización, de tal modo que la planta desaladora sería sobredimensionada para poder almacenar agua en las horas picos de la distribución el viento y así poder abastecer la demanda de agua potable, sin necesidad de disponer sistemas de almacenamiento de energía, reduciendo por tanto en costes de inversión y de mantenimiento. En este caso se apostaría por los sistemas CIP del tipo DWEER y KSB, ya que disponen de sistemas de control (PLC), permitiéndoles tener un mejor comportamiento que los sistemas rotativos como el ERI-PX y ¡Save Danfoss, los cuales requieren de un caudal mínimo para ser activados.

Si se comparan ambas opciones, con la planta desaladora de OI - EERR sin sistemas de almacenamiento, se podría reducir en costes de inversión inicial y de mantenimiento, sin embargo al sobredimensionar la planta, se aumentan los costes de inversión de la misma por lo que sería necesario realizar un estudio económico exhaustivo, con la finalidad de comprobar si realmente se consigue reducir los costes. Además en términos de operación las membranas sufren con el arranque y parada de la planta desaladora, disminuyendo su vida útil y los dispositivos de recuperación de energía podrían no estar trabajando es su punto óptimo disminuyendo el rendimiento del mismo. Por lo que no se obtendrían los consumos específicos esperados con este tipo de dispositivos.

⁹⁴ Camilo José Carrillo González, 2001, Tesis doctoral "*Análisis y simulación de sistemas eólicos aislados*". Universidad de Vigo, consultada el 15/12/2015 en : <http://carrillo.webs.uvigo.es/publicaciones/Tesis.pdf>

Sin embargo en el caso de una planta desaladora por OI-EERR con un sistema de almacenamiento, un sistema de control y monitorización y un sistema de gestión de cargas se podría conseguir un régimen de operación estable, por lo que las membranas no sufrirían los fenómenos de arranque y parada, manteniendo su vida útil establecida por el fabricante, y además los dispositivos trabajarían en puntos cercanos al óptimo, obteniendo los consumos específicos esperados y pudiéndose amortizar el coste de inversión inicial de la planta desaladora.

En este sentido se dispone de poca información, lo que indica la necesidad de una mayor labor de investigación en este campo y abrir nuevas líneas de investigación para conseguir superar esta barrera de conocimiento y así poder introducir la desalación con EERR en el mercado del abastecimiento del agua a cualquier escala con máxima eficiencia energética.

En base a todo este estudio de acoplamiento de OI con EERR en régimen variable y haciendo uso de CIP, las líneas de investigación que se proponen reforzar o abrir son las siguientes:

- El diseño de nuevos dispositivos de recuperación de energía especialmente pensados para plantas de pequeña escala.
- La optimización de los actuales sistemas de recuperación de energía, para que puedan ser operados en régimen variable (plantas desaladoras de mediana y gran capacidad).
- El diseño de nuevos dispositivos de recuperación que se adapten a las condiciones de operación variable al usar EERR.
- Ensayos experimentales y proyectos demostrativos en plantas desaladoras por OI con sistemas de recuperación del tipo CIP (pequeña, mediana y gran capacidad).
- Diseño de bombas de desplazamiento positivo de mayor capacidad, ya que se adaptarían bien a las condiciones de operación variable.
- Herramientas de predicción eólica y solar, adaptadas a plantas desaladoras en funcionamiento con EERR.
- Estudios económicos de sistemas de desalación de gran capacidad energéticamente mixtos (conectados a red y con energía eólica de forma simultánea) – Evaluación de la capacidad óptima de almacenamiento de energía.

9 CONCLUSIONES

Los sistemas de recuperación de energía son dispositivos indispensables para conseguir una reducción de consumo de energía eléctrica de una planta desaladora por ósmosis inversa y por tanto repercuten decisivamente en una disminución en los costes de producción del m³ de agua producida.

En base a este estudio de campo realizado en plantas desaladoras por IO de mediana y gran capacidad en operación en Canarias, se deduce que el sistema ERI-PX es el más idóneo por sus numerosas ventajas frente a los demás sistemas de cámaras isobáricas, de hecho en la mayoría de las plantas visitadas ya disponían de éste sistema. Sin embargo en los casos en que el agua de alimentación no sea de buena calidad, como puede ocurrir en una toma abierta, el diseño del ERI-PX presenta un peor comportamiento, lo que conlleva incrementar los costes en el pretratamiento. En este sentido los demás sistemas basados en cámaras isobáricas de desplazamiento positivo son más tolerantes.

Por otro lado, con respecto a la tecnología de desalación por OI con EERR en aislado se la presupone como la solución a la dependencia de los combustibles fósiles ocasionando un menor impacto ambiental por una reducción de emisiones de CO₂ y permitiendo establecer un sistema energético más sostenible. Sin embargo, es complicado introducir la desalación con EERR en el mercado del abastecimiento de agua, debido a la variabilidad energética que presentan las energías renovables y al elevado coste de inversión lo que conlleva que el coste de producir un metro cúbico de agua sea, actualmente, superior al coste del agua producida en plantas desaladoras convencionales conectadas a la red eléctrica (generalmente inferior a 1 €/m³). Sin embargo, la utilización de sistemas de recuperación de energía del tipo CIP son condición indispensable para lograr la mayor eficiencia energética en el proceso de desalación y permitir obtener un consumo específico muy bajo. De esta forma se obtendría la mayor eficiencia del recurso renovable puesto a disposición y por lo tanto un menor coste del agua desalada por metro cúbico.

Sin embargo la incorporación de los sistemas de recuperación de energía del tipo CIP presenta una problemática y es que cuando se decide instalar un recuperador de energía, lo que se determina es su punto óptimo de funcionamiento en la instalación. Esto es posible, gracias a que la planta está funcionando en todo momento en un régimen estable de energía. Sin embargo, cuando hablamos de plantas de OI que dependen exclusivamente de la energía producida por un sistema de EERR, el planteamiento cambia. Debido a que este tipo de energías es fluctuante y depende de una serie de factores medioambientales totalmente ajenos al control humano y en consecuencia no se puede asegurar que la generación de energía sea siempre constante. Por lo tanto, aunque se calcule la instalación de un dispositivo recuperador de energía para que funcione en un punto óptimo de eficiencia, éste no siempre va a estar trabajando en este estado, por lo que no se obtienen los resultados esperados de ahorro energético. Además de esto, se estarán introduciendo dispositivos que

pueden ser causa de posibles fallos en el funcionamiento de la planta y no estarán siendo aprovechados.

Debido a estos argumentos se ha estudiado las posibilidades que ofrecen los diferentes sistemas de recuperación de energía (basados en cámaras isobáricas) en plantas de OI accionadas con EERR, así como la configuración más adecuada para este tipo de sistemas en términos de diseño de la planta, sistemas de almacenamiento, sistemas de control y automatización, etc.

En plantas desaladoras de mediana y gran capacidad (> 1000 m³/d) conectadas a un sistema con EERR en régimen variable se determina que debe constar de un sistema de almacenamiento, un sistema de control y monitorización y/o un sistema de gestión de carga. La justificación se basa en que con estas medidas se podrían emplear los diferentes dispositivos actualmente disponibles en el mercado, además de que las membranas de OI no sufrirían los fenómenos de arranque y parada continuos, manteniendo su vida útil establecida por el fabricante. Los recuperadores ERI-PX, DWEER y el KSB podrían conseguir un régimen de operación estable que permitiría a dichos dispositivos trabajar en puntos cercanos al óptimo. De tal modo que se obtendrían los consumos específicos esperados y por lo tanto se podría amortizar el coste de inversión inicial de la planta desaladora.

Se dispone de poca información relativa a la operación en régimen variable de plantas desaladoras, lo que indica la necesidad de una mayor investigación en este campo y abrir nuevas líneas de investigación para conseguir superar esta barrera de conocimiento y así poder introducir de forma eficiente las EERR a la desalación por OI.

Las líneas de investigación que se proponen reforzar o abrir son las siguientes:

- El diseño de nuevos dispositivos de recuperación de energía especialmente pensados para plantas de pequeña escala.
- La optimización de los actuales sistemas de recuperación de energía, para que puedan ser operados en régimen variable (plantas desaladoras de mediana y gran capacidad).
- El diseño de nuevos dispositivos de recuperación que se adapten a las condiciones de operación variable al usar EERR.
- Ensayos experimentales y proyectos demostrativos en plantas desaladoras por OI con sistemas de recuperación del tipo CIP (pequeña, mediana y gran capacidad).
- Diseño de bombas de desplazamiento positivo de mayor capacidad, ya que se adaptarían bien a las condiciones de operación variable.
- Herramientas de predicción eólica y solar, adaptadas a plantas desaladoras en funcionamiento con EERR.
- Estudios económicos de sistemas de desalación de gran capacidad energéticamente mixtos (conectados a red y con energía eólica de forma simultánea) – Evaluación de la capacidad óptima de almacenamiento de energía.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría expresar mi agradecimiento a mis tutores Felipe Díaz Reyes y Baltasar Peñate Suárez, por haber confiado en mí para realización de este trabajo final de máster y por haberme brindado su apoyo.

En cuanto en mi estancia en el Instituto Tecnológico de Canarias, quisiera mencionar también a Juan Antonio de la Fuente Bencomo y Gustavo Santana los cuales también han colaborado en la realización de este trabajo y me han ofrecido su ayuda en todo momento.

Gracias también a todos los gestores, explotares y operarios de todas las plantas desaladoras visitadas: Federico León, Andrés Rodríguez, Juan José Rodríguez González, Carmelo Santana, Obed Rodríguez, Gabriel Gómez, Pedro Curbelo, Luis Alberto León Ramos, Juan Parra y José Manual; por su predisposición a ayudarme en todo y por permitirme visitar las instalaciones personalmente. Me llevo una grata y enriquecedora experiencia de todas y cada una de las visitas realizadas.

Por último también quisiera agradecer al apoyo incondicional de mi madre, familiares y amigos, porque siempre han confiado en mis posibilidades.

BIBLIOGRAFÍA

- Akili D. Khawajia, Ibrahim K. Kutubkhanaha, Jong-Mihn Wieb, 2007, Advances in seawater desalination technologies, Desalination 221, 47–69.
- Al-Karaghoul A., Kazmerski L.L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. Renewable Sustainable Energy, 24, 343–356.
- Beat Schneider, 2005, Selection, operation and control of a work exchanger energy recovery system based on the Singapore Project, Desalination, 184, 197–210,
- Bross Stephan, Wolfgang Kochanowski, 2006, SWRO core hydraulic system: Extension of the SalTec DT to higher flows and lower energy consumption, Desalination, 203, 160–167.
- Carrillo González Camilo José, 2001, Tesis doctoral “Análisis y simulación de sistemas eólicos aislados”. Universidad de Vigo, consultada el 15/12/2015 en : <http://carrillo.webs.uvigo.es/publicaciones/Tesis.pdf>
- Carta José A., Jaime González, Pedro Cabrera, Vicente J. Subiela, 2014, Preliminary experimental analysis of a small-scale prototype SWRO desalination plant, designed for continuous adjustment of its energy consumption to the widely varying power generated by a stand-alone wind turbine, Applied Energy, 137 , 222–239.
- Consejería de empleo, Industria y Comercio, Gobierno de Canarias, 2011, Anuario energético de Canarias, consultado el 07/12/2015 en <http://www.gobcan.es/ceic/energia/publicaciones/Anuario2011.pdf>
- Danfoss RO-Boost, consultada el 04/12/2015 en <file:///C:/Users/Sigrid/Downloads/DATA%20SHEET-INSTRUCTION%20-%20Danfoss.pdf>
- Danfoss, 2014, Energy recovery just got simple, consultada el 25/10/2015 en http://ro-solutions.danfoss.com/media/1138/521b1106_energy-recovery-just-got-simple.pdf
- Danfoss, consultada el 04/12/2015 en http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/C290C7DF-5058-44DE-BEB9-7C9492577CDC/0/521B1216_FichaT%C3%A9cnica_BombadeAguaMarinaconRecuperaci%C3%B3ndeEnerg%C3%ADaSWPE_ES_A4.pdf
- Danfoss, consultada el 04/12/2015 en: <http://high-pressurepumps.danfoss.com/products/energy-recovery-devices/isave-erd/>
- Data sheet, Energy Recovery Device iSave 21-40, Consultada el 03/12/2015 en: <file:///C:/Users/Sigrid/Downloads/Data%20sheet%20iSave%2021-40.pdf>

- Energy Recovery Inc, 2011, Highly Efficient Energy Recovery Devices , consultada en 25/10/2015 en <http://www.energyrecovery.com/wp-content/uploads/2014/12/White-PaperHigh-Efficiency-ERD.pdf>
- Energy Recovery Inc, consultada el 03/12/2015 en <file:///C:/Users/Sigrid/Downloads/80019-01-8%2065%20Series%20Manual.pdf>
- Energy Recovery Pressure Exchanger, consultada el 04/12/2015 en: [file:///C:/Users/Sigrid/Downloads/ERI_Product_Catalog_WEB3_01%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Sigrid/Downloads/ERI_Product_Catalog_WEB3_01%20(2).pdf)
- Flowserve, consultada el 18/12/15 en: http://www.flowserve.com/es_ES/Products/Energy-Recovery-Devices/Work-Exchangers
- Flowserve, consultada el 25/11/2015 en <http://www.flowserve.com/files/Files/Literature/ProductLiterature/Pumps/fpd-18-s.pdf>
- Forstmeiera Markus, Fredrik Mannerheima, Fernando D'Amatob, Minesh Shahb, Yan Liub, Michael Baldeab, Albert Stella, 2006, Feasibility study on wind-powered desalination, *Desalination*, 203, 463–470.
- García Latorre Francisco Javier, 2012, Análisis y simulación de la tecnología de ósmosis inversa con fuentes energéticas no convencionales, Universidad de las Palmas de Gran Canaria, consultada el 07/12/2015 en http://acceda.ulpgc.es/bitstream/10553/9742/4/0675367_00000_0000.pdf
- Gleick, P.H., 2006. *The World's Water 2006–2007, The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island Press, Chicago.
- Gobierno de Canarias, 2015, Plan de Ecogestión en la producción y distribución de agua de Canarias, consultada el 25/10/2015 en : http://oic.itccanarias.org/files/PLAN_ECOGESTIoN_DEL_AGUA.pdf
- Henthorne, L., 2003. Desalination today. *Southwest Hydrology*, 12–13.
- Ian B. Cameron, Rodney B. Clemente, 2007, SWRO with ERI's PX Pressure Exchanger device — a global survey, *Desalination*, 221,136–142.
- ISOBARIX, consultada el 04/12/2015 en <http://www.isobarix.com/products>
- Jiayi Sun, Wang Yue, Xu Shichang, Wang Shichang, 2008, Energy Recovery Device with a Fluid Switcher for Seawater Reverse Osmosis System, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 16, 329-332.
- Kah Peng Lee, Tom C. Arnot, Davide Mattia, 2010, A review of reverse ósmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential, *Journal of Membrane Science* 370, 1–22.

- Kay Paulsen, Frank Hensel, Introduction of a new Energy Recovery System— optimized for the combination with renewable energy, 2005, *Desalination*, 184, 211–215.
- Lauren F. Greenlee, Desmond F. Lawler, Benny D. Freeman, Benoit Marrot, Philippe Moulin, 2009, Reverse ósmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges, *Water Research*, 43, 2317 – 2348.
- Loeb, S., Sourirajan, S., 1963. Seawater demineralization by means of an osmotic membrane. *Advances in Chemistry Series 38*, 117–132.
- Mageed Jean Guirguis, 2011, Energy Recovery Devices in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants with Emphasis on Efficiency and Economical Analysis of Isobaric versus Centrifugal Devices, consultada el 18/12/2015 en : <http://scholarcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4330&context=etd>
- Manth Thomas, Michael Gabor, Eli Oklejas, 2003, Minimizing RO energy consumption under variable conditions of operation, *Desalination*, 157, 9-21.
- Nauti Expo, consultada el 25/10/2015 en <http://www.nauticexpo.es/prod/spectra/product-22056-204777.html>
- Nidal Hilal, 2012, The International of Science and Technology of desalting and water purification, *Desalination*, 285,ii.
- Nieves Cifuentes, consultada el 26/11/2015 en: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45515/componente45513.pdf
- OSMOREC Innovative Reverse Ósmosis Energy Recovery Technology, consultada el 20/10/2015 en <http://osmorec.com/product/technology>
- Papapetrou Michael , Marcel Wieghaus , Charlotte Biercamp, 2010, Roadmap for the development of desalination powered by renewable energy, consultada el 07/12/2015 en : http://www.prodes-project.org/fileadmin/Files/ProDes_Road_map_on_line_version.pdf
- Peñate Suarez B., J.A. de la Fuente a, M. Barreto, 2009, Operation of the RO Kinetic energy recovery system: Description and real experiences, *Desalination*, 252, 179–185.
- Peñate Baltasar, Fernando Castellano, Alejandro Bello, Lourdes García-Rodríguez, 2010, Assessment of a stand-alone gradual capacity reverse osmosis desalination plant to adapt to wind power availability: A case study, *Energy*, 36, 4372-4384.
- Peñate Baltasar, Lourdes García-Rodríguez, 2011, Current trends and future prospects in the design of seawater reverse ósmosis desalination technology, *Desalination*, 284, 1–8.

- Peñate Suarez B., Fuente-Bencomo J.A. (2009). Proyecto tecnológico Recudesal. (p. 8). Las Palmas de Gran Canaria: Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.
- Peñate Suarez B., Lourdes García-Rodríguez, 2010, Energy optimisation of existing SWRO (seawater reverse ósmosis) plants with ERT (energy recovery turbines): Technical and thermoeconomic assessment, Energy, 36, 613-626.
- Salino Pressure Center, consultada el 04/12/2015 en: <http://www.ksb.com/salino-en/>
- SalTec DT, 2006, consultada el 18/12/2015 en : http://www.tulumbapompa.com.tr/KSB_Urun_Dokuman/SaltecDT.pdf
- Schallenberg Julieta , 2000, Las energías renovables en canarias: implementación, estrategias y perspectivas, consultada el 05/12/2015 en http://jrguezs.webs.ull.es/tecnologia/tema5/eneren_can.pdf
- Schallenberg-Rodríguez Julieta, José Miguel Veza, Ana Blanco-Marigorta, 2014, Energy efficiency and desalination in the Canary Islands, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40,741–748.
- Segura Acosta Lidia y Ignacio de la Nuez Pestana, 2008, Estudio del comportamiento de un sistema de recuperación de energía en una planta de ósmosis inversa en condiciones de funcionamiento de régimen variable, fundamentado en el empleo de un sistema PX, Universidad de las Palmas de Gran Canaria, consultada el 04/12/2015 en : http://acceda.ulpgc.es/bitstream/10553/6636/1/0231633_00031_0001.pdf
- Smart Energy (Energy-Efficient Flow Solutions by Design) consultada el 27/11/2015 en <http://www.blackmersmartenergy.com/comparativedata/centrifugal-pumps-vs-positive-displacement-pumps.html>
- Stover Richard L. Stover, 2004, Development of a fourth generation energy recovery device. A 'CTO's Notebook', Desalination, 165, 313-321.
- Stover Richard L. Stover, 2006, Seawater reverse osmosis with isobaric energy recovery devices, Desalination, 203, 168.
- Subiela V.J. Subiela, J.A. de la Fuente, G. Piernavieja, B. Peñate, 2008, Canary Islands Institute of Technology (ITC) experiences in desalination with renewable energies, Desalination and water treatment ,7 , 220–235.
- Valbjørn, 2008, ERD for small SWRO plants, Desalination, 248, 636–641A.
- Van der Bruggen, B., Vandecasteele, C., 2002. Distillation vs. membrane filtration: overview of process evolutions in seawater desalination. Desalination 143, 207–218.

- Veza J.M. (2002). Introducción a la Desalación del Aguas (p. 343). Las Palmas de Gran Canaria: Servicio de Publicaciones y Producción Documental de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

ANEXO I: Cálculos.

Los cálculos realizados en este trabajo son los correspondientes al diagrama Sankey para poder analizar la evolución del consumo específico en la planta desaladora (nº2, Anexo II) sin ningún sistema de recuperación, con una turbina Pelton y con un sistema de cámara isobárica.

- Planta desaladora sin recuperador de energía.

Tabla 13: Datos de una planta sin recuperador de energía (Elaboración propia).

Parámetros	Abreviaturas	Datos
Caudal de alimentación	Q_{alim}	594 m ³ /h
Caudal de producto	Q_{prod}	259 m ³ /h
Caudal de salmuera	Q_{sal}	334 m ³ /h
Conversión	%	43%
Rendimiento motor	η_{motor}	95%
Rendimiento de la bomba de alta presión	η_{BAP}	81,7%
Densidad media de agua de mar	ρ_{am}	1025 kg/m ³
Densidad media de salmuera	ρ_{sal}	1030 kg/m ³
Densidad agua producto	ρ_{prod}	1000 kg/m ³
Presión osmótica	π	27,91 bar
Presión alimentación	p_{alim}	64,9 bar
Presión salmuera	p_{sal}	63,5 bar
Gravedad	g	10 m/s ²
Modelo elemento de membrana		SW30HR-380
Número de tubos de presión		72
Número de elementos por tubo de presión		7
Número de etapas y pasos		1
Potencia	P	

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de alimentación} &= Q_{alim} \times p_{alim} \times \rho_{AM} \times g \\
 &= 594 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 \text{ seg}} \times 64,9 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1025 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} \\
 &= 1119,57 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de desalación} &= Q_{prod} \times \pi \times \rho_{prod} \times g \\
 &= 259 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 \text{ seg}} \times 27,91 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} \\
 &= 204,81 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de la salmuera} &= Q_{sal} \times p_{sal} \times \rho_{SAL} \times g \\
 &= 334 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 \text{ seg}} \times 63,5 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1030 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} \\
 &= 618,95 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de pérdida de carga en las membranas} &= Q_{sal} \times (p_{alim} - p_{sal}) \\
 &= 334 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 \text{ seg}} \times (64,9 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1025 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} \\
 &\quad - 63,5 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1030 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2}) = 10,58 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de pérdidas hidráulicas} &= P_{alim} - P_{pérdida \text{ carga membrana}} - P_{sal} - P_{prod} \\
 &= 1119,57 - 10,58 - 618,95 - 204,81 = 285,23 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de la bomba de alta presión} &= Q_{alim} \times p_{alim} \times \rho_{am} \times g \times \frac{1}{\eta_{BAP}} \\
 &= 594 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 \text{ seg}} \times 64,9 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1025 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} \times \frac{1}{0,817} \\
 &= 1370,35 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de pérdidas en la bomba de alta presión} &= P_{BAP} \times (1 - \eta_{motor}) \\
 &= 1370,35 \times (1 - 0,817) = 250,77 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia del motor de la bomba de alta presión} \\
 &= Q_{alim} \times p_{alim} \times \rho_{am} \times g \times \frac{1}{\eta_{BAP}} \times \frac{1}{\eta_{motor}} = \\
 &= 594 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 \text{ seg}} \times 64,9 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1025 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} \times \frac{1}{0,817} \\
 &\quad \times \frac{1}{0,95} = 1442,47 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de pérdidas en el motor de la bomba de alta} &= P_{BAP} \times (1 - \eta_{motor}) \\
 &= 1442,47 \times (1 - 0,95) = 72,12 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Potencia del motor de BAP = Potencia requerida para realizar la OI

$$\begin{aligned}
 \text{Consumo específico} &= \frac{\text{Potencia requerida para realizar la OI}}{Q_{producto}} = \frac{1442,47 \text{ kW}}{259 \text{ m}^3/h} \\
 &= 5,57 \text{ kWh/m}^3
 \end{aligned}$$

- Planta desaladora con turbina Francis como recuperador de energía.

Tabla 14: Datos de una planta con recuperador de energía tipo Turbina Francis (Elaboración propia).

Parámetros	Abreviaturas	Datos
Caudal de alimentación	Q_{alim}	594 m ³ /h
Caudal de producto	Q_{prod}	259 m ³ /h
Caudal de salmuera	Q_{sal}	334 m ³ /h
Conversión	%	43%
Rendimiento motor	η_{motor}	95%
Rendimiento de la bomba de alta presión	η_{BAP}	81,7%
Rendimiento de la turbina	η_{turb}	76%
Densidad media de agua de mar	ρ_{am}	1025 kg/m ³
Densidad media de salmuera	ρ_{sal}	1030 kg/m ³
Densidad agua producto	ρ_{prod}	1000 kg/m ³
Presión osmótica	π	27,91 bar
Presión alimentación	p_{alim}	64,9 bar
Presión salmuera	p_{sal}	63,5 bar
Gravedad	g	10 m/s ²
Modelo elemento de membrana		SW30HR-380
Número de tubos de presión		72
Número de elementos por tubo de presión		7
Número de etapas y pasos		1
Potencia	P	

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de alimentación} &= Q_{alim} \times p_{alim} \times \rho_{AM} \times g \\
 &= 594 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 \text{ seg}} \times 64,9 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1025 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} \\
 &= 1119,57 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de desalación} &= Q_{prod} \times \pi \times \rho_{prod} \times g \\
 &= 259 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 \text{ seg}} \times 27,91 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} \\
 &= 204,81 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de la salmuera} &= Q_{sal} \times p_{sal} \times \rho_{SAL} \times g \\
 &= 334 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 \text{ seg}} \times 63,5 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1030 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} \\
 &= 618,95 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de pérdida de carga en las membranas} &= Q_{sal} \times (p_{alim} - p_{sal}) \\
 &= 334 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 \text{ seg}} \times (64,9 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1025 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} \\
 &\quad - 63,5 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1030 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2}) = 10,58 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de pérdidas hidráulicas} &= P_{alim} - P_{pérdida \text{ carga membrana}} - P_{sal} - P_{prod} \\
 &= 1119,57 - 10,58 - 618,95 - 204,81 = 285,23 \text{ k}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de la bomba de alta presión} &= Q_{alim} \times p_{alim} \times \rho_{am} \times g \times \frac{1}{\eta_{BAP}} \\
 &= 594 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 \text{ seg}} \times 64,9 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1025 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} \times \frac{1}{0,817} \\
 &= 1370,35 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de pérdidas en la bomba de alta presión} &= P_{BAP} \times (1 - \eta_{BAP}) \\
 &= 1370,35 \times (1 - 0,817) = 250,77 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia recuperada por la turbina Francis} &= \text{Potencia de la salmuera} \times \eta_{Turbina} \\
 &= 618,95 \text{ kW} \times 0,76 = 470,40 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia perdida en la turbina Francis} &= \text{Potencia de la salmuera} \times (1 - \eta_{Turbina}) \\
 &= 618,95 \text{ kW} \times (1 - 0,76) = 148,55 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia del motor de la bomba de alta} &= (P_{BAP} - P_{Turb}) \times \frac{1}{\eta_{motor}} \\
 &= (1370,35 - 470,40) \times \frac{1}{0,95} = 947,32 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de pérdidas en el motor de la bomba de alta} &= P_{motor \text{ BAP}} \times (1 - \eta_{motor}) \\
 &= 947,32 \times (1 - 0,95) = 47,37 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Potencia del motor de BAP = Potencia requerida para realizar la OI

$$\begin{aligned}
 \text{Consumo específico} &= \frac{\text{Potencia requerida para realizar la OI}}{Q_{producto}} = \frac{947,32 \text{ kW}}{259 \text{ m}^3/h} \\
 &= 3,66 \text{ kWh/m}^3
 \end{aligned}$$

- Planta desaladora con cámaras isobáricas del tipo ERI-PX como recuperador de energía.

En este caso, los datos se obtuvieron mediante una simulación del proceso, ya que el gestor correspondiente además de realizar el *retrofitting* de turbinas a cámaras isobáricas, también aumentó la producción de la misma, por lo que se obtenía un consumo específico similar con cámaras isobáricas y turbinas. Por ello se llevó a cabo una simulación con el programa LG Nano H₂O para ver qué consumo específico se obtenía si manteníamos la producción original y si hibridábamos membranas de dos tipos (2 LG SW 400 SR y 5 LG SW 400 R).

En la figura 14 se pueden ver los datos introducidos en el programa, tales como la concentración de sólidos totales disueltos en el agua de mar (ppm), el caudal de permeado requerido y el caudal de alimentación utilizado en unidades de m³/h. Otros datos que se deben introducir son, si la planta dispone de un recuperador de energía (indicar que tipo) y datos referidos al propio recuperador, como la pérdida de presión en el mismo, el porcentaje de mezcla de salmuera en el agua de alimentación del proceso y el porcentaje de fugas, debido a que una pequeña parte de la salmuera que entra al dispositivo a alta presión se pierde antes de realizar el trabajo y sale junto con la salmuera a baja presión. En nuestro caso el ERI-PX tiene una pérdida de presión de 1 bar, el porcentaje de mezcla, al no disponer de pistones separadores, es del 6% y el porcentaje de fugas en el recuperador es del 2% (datos son tomados de la bibliografía⁹⁵).

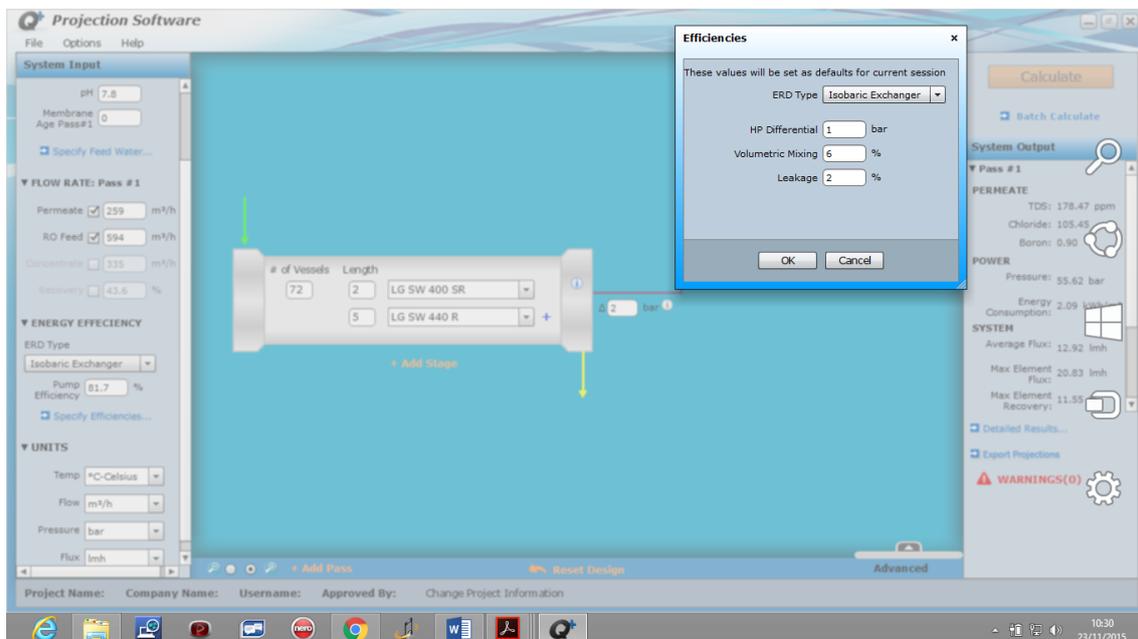


Figura 20: Imagen del programa LG Nano H₂O.

⁹⁵ Richard L. Stover, 2004, o.c.

Una vez realizada la simulación, los datos obtenidos se muestran en el siguiente documento, donde se puede ver los datos del proceso de OI, tales como la presión de alimentación, la presión de la salmuera, la presión osmótica, el número de elementos empleados, el consumo específico obtenido, etc. No obstante el programa tiene en cuenta el rendimiento de la bomba de alta presión pero no tiene en cuenta el rendimiento de la bomba booster, por lo que el valor del consumo específico obtenido es erróneo. Estos datos se utilizarán para realizar el diagrama Sankey correspondiente.

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

NanoH₂O Q1 Projection Software Rev 2110-2014-2015

Project Name:	Water Type: H ₂ O (Defined) by TDS	Membrane Age: 0
Company Name:	Flux Loss per Year: 2.00 %	Safety Factor: 1
Username:	Approved By:	Salt Passage Increase: 5.00 %

Pass 1

System - Pass 1

Permeate Flow: 259.00 m ³ /h	Average Flux: 12.92 lmh	Temperature: 25.00 °C
RO Feed Flow: 594.00 m ³ /h	Water Source: Seawater-Open Intake (SDI<5)	Average NDP: 11.86 bar
Concentrate Flow: 335.00 m ³ /h	Feed TDS: 38,095 ppm	Specific Energy: 2.09 kWh/m ³
Recovery: 43.60 %	Osmotic Pressure Feed: 27.91 bar	Feed Pressure: 55.62 bar
Number Of Elements: 504	Osmotic Pressure Concentrate: 49.37 bar	Permeate TDS: 178.47 ppm
ERD Type: Isobaric Exchanger	Pump Efficiency: 81.70 %	Fouling Factor: 1

	# of Vessels	# of Elements	RO Feed Flow	Permeate Flow	Concentrate Flow	RO Feed Pressure	Concentrate Pressure	Vessel Pressure Drop	Boost Pressure	Permeate Back Pressure	Average Flux	Permeate TDS
			m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	bar	bar	bar	bar	bar	lmh	ppm
Stage 1	72	7	594.00	258.89	335.11	55.62	54.38	1.24	0.00	2.00	12.92	178.47

Water Analysis - Pass 1

Species	Raw Water	Adj. Feed	Concentrate Stage 1	Permeate Stage 1
Ammonium	0.00	0.00	0.00	0.00
Sodium	11,045	11,557	20,436	63.75
Potassium	502.37	525.68	929.19	3.39
Magnesium	1,353	1,416	2,509	1.70
Calcium	430.37	450.33	797.84	0.54
Strontium	7.36	7.70	13.64	0.01
Barium	0.04	0.04	0.07	0.00
Fluoride	1.29	1.35	2.39	0.01
Chloride	19,850	20,771	36,737	105.45
Sulfate	3,052	3,194	5,660	1.61
Nitrate	0.00	0.00	0.00	0.00
Carbonate	2.52	2.64	4.67	0.00
Bicarbonate	154.80	161.98	286.28	1.10
Boron	4.78	5.00	7.78	0.90
Bromide	0.00	0.00	0.00	0.00
Silica	0.00	0.00	0.00	0.00
TDS	36,407	38,095	67,385	178.47
pH	7.80	7.80	7.79	6.71

Disclaimer: LG NanoH₂O Design is intended to be used by persons having the requisite technical skill, at their own discretion and risk. The projections and specific energy calculations obtained with LG NanoH₂O Design are the expected system performance measures based upon the average, nominal element-performance and are not automatically guaranteed. When using LG NanoH₂O Design, it is the user's responsibility to make provisions against fouling, scaling and chemical attacks, to account for piping- and valve pressure losses, feed pump suction pressure and permeate backpressure. LG NanoH₂O shall not be liable for any error or miscalculation in results obtained by using LG NanoH₂O Design. Further, LG NanoH₂O does not assume any obligation or liability for results obtained or from damages incurred from information produced by LG NanoH₂O Design. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, users are responsible for determining whether products are appropriate for their use.

For questions please contact us at: info@nanoh2o.com

Figura 21: Datos obtenidos en la simulación con el programa LG Nano H2O.

Finalmente los datos a emplear para los cálculos de las potencias consumidas en el proceso son:

Tabla 15: Datos de una planta con recuperador de energía del tipo ERI-PX (Elaboración propia).

Parámetros	Abreviaturas	Datos
Caudal de alimentación	Q_{alim}	594 m ³ /h
Caudal de producto	Q_{prod}	259 m ³ /h
Caudal de salmuera	Q_{sal}	335 m ³ /h
Conversión	%	43,60%
Rendimiento de bomba de alta presión	η_{BAP}	81,7%
Rendimiento del motor de la bomba de alta presión	$\eta_{motor\ BAP}$	95%
Rendimiento de la bomba booster	η_{BB}	76%
Rendimiento motor la bomba booster	$\eta_{motor\ BB}$	95%
Rendimiento de cámara isobárica (ERI-PX)	η_{CIP}	96,3%
Densidad media de agua de mar	ρ_{am}	1025 kg/m ³
Densidad media de salmuera	ρ_{sal}	1030 kg/m ³
Densidad agua producto	ρ_{prod}	1000 kg/m ³
Presión osmótica	π	27,91 bar
Presión alimentación	p_{alim}	55,62 bar
Presión salmuera	p_{sal}	54,38 bar
Gravedad	g	10 m/s ²
Modelo elemento de membrana		2 x Qfx SW400SR +5 x Qfx SW400 R
Número de tubos de presión		72
Número de elementos por tubo de presión		7
Número de etapas y pasos		1
Potencia	P	
Pérdida de carga en la membrana	Δp	1 bar
Porcentaje de mezcla	M	6%
Porcentaje de fuga	F	2%

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de alimentación} &= Q_{alim} \times p_{alim} \times \rho_{AM} \times g \\
 &= 594 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600\ seg} \times 55,62\ bar \times \frac{10,2\ mca}{1\ bar} \times \frac{1025\ kg}{m^3} \times \frac{10\ m}{s^2} \\
 &= 959,49\ kW
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia de desalación} &= Q_{prod} \times \pi \times \rho_{prod} \times g \\
 &= 259 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600\ seg} \times 27,91\ bar \times \frac{10,2\ mca}{1\ bar} \times \frac{1000\ kg}{m^3} \times \frac{10\ m}{s^2} \\
 &= 204,81\ kW
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia de la salmuera} &= Q_{sal} \times p_{sal} \times \rho_{SAL} \times g \\ &= 335 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 \text{ seg}} \times 54,38 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1030 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} \\ &= 531,64 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia de pérdida de carga en las membranas} &= Q_{sal} \times (p_{alim} - p_{sal}) \\ &= 335 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 \text{ seg}} \\ &\times \left(55,62 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1025 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} - 54,38 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \right. \\ &\left. \times \frac{1030 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} \right) = 9,48 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia de pérdidas hidráulicas} &= P_{alim} - P_{pérdida \text{ carga membrana}} - P_{sal} - P_{prod} \\ &= 959,49 - 9,48 - 531,64 - 204,81 = 213,56 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia resultante tras pasar por el ERI-PX} &= \text{Potencia de la salmuera} \times (\eta_{CIP}) \\ &= 531,64 \times 0,963 = 511,97 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia perdida en el ERI-PX} &= P_{salmuera} \times (1 - \eta_{CIP}) = 531,64 \times (1 - 0,963) \\ &= 19,67 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Presión resultante tras pasar por el ERI-PX} &= p_{sal} - \Delta p = 54,38 \text{ bar} - 1 \text{ bar} \\ &= 53,38 \text{ bar} \end{aligned}$$

$$\text{Presión a aumentar en la bomba booster} = p_{alim} - p_{CIP} = 55,62 - 53,38 = 2,24 \text{ bar}$$

$$\begin{aligned} \text{Caudal resultante tras pasar por el ERI-PX} &= Q_{sal} + (Q_{sal} \times M) - (Q_{sal} \times F) = \\ &= 335 \frac{m^3}{h} + \left(335 \frac{m^3}{h} \times 0,06 \right) - \left(335 \frac{m^3}{h} \times 0,02 \right) = 348,40 \frac{m^3}{h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia requerida por la bomba booster para alcanzar la presión de la BAP} \\ &= Q_{sal} \times p_{sal} \times \rho_{sal} \times g \times \frac{1}{\eta_{BB}} \times \frac{1}{\eta_{motor \text{ BB}}} \\ &= 348,40 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 \text{ seg}} \times 2,24 \text{ bar} \times \frac{10,2 \text{ mca}}{1 \text{ bar}} \times \frac{1025 \text{ kg}}{m^3} \times \frac{10 \text{ m}}{s^2} \\ &\times \frac{1}{0,95} \times \frac{1}{0,76} = 31,39 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia motor bomba booster} &= P_{salida \text{ CIP}} - P_{requerida \text{ bomba booster}} = 511,97 - 31,39 \\ &= 480,58 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia perdida en el motor bomba booster} &= P_{motor \text{ BB}} \times (1 - \eta_{motor \text{ BB}}) \\ &= 480,58 \times (1 - 0,95) = 24,03 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$Potencia\ bomba\ booster = P_{motor\ BB} \times \eta_{motor\ BB} = 480,58 \times 0,95 = 456,55\ kW$$

$$Potencia\ perdida\ en\ la\ bomba\ booster = P_{BB} \times (1 - \eta_{BB}) = 456,55 \times (1 - 0,76) = 109,57\ kW$$

$$Potencia\ recuperada = P_{BB} \times \eta_{BB} = 456,55 \times 0,76 = 346,98\ kW$$

$$Potencia\ de\ la\ bomba\ de\ alta\ presión = (P_{alimentación} - P_{recuperada}) \times \frac{1}{\eta_{BAP}} \\ = (959,49 - 346,98) \times \frac{1}{0,817} = 749,71\ kW$$

$$Potencia\ perdida\ en\ la\ bomba\ de\ alta\ presión = P_{BAP} \times (1 - \eta_{BAP}) \\ = 749,71 \times (1 - 0,817) = 137,20\ kW$$

$$Potencia\ del\ motor\ de\ la\ bomba\ de\ alta\ presión = P_{BAP} \times \frac{1}{\eta_{motor\ BAP}} = 749,71 \times \frac{1}{0,95} \\ = 789,17\ kW$$

$$Potencia\ perdida\ en\ el\ motor\ de\ la\ bomba\ de\ alta\ presión \\ = P_{motor\ BAP} \times (1 - \eta_{motor\ BAP}) = 789,17 \times (1 - 0,95) = 39,46\ kW$$

Potencia del motor de BAP = Potencia requerida para realizar la OI

$$Consumo\ específico = \frac{Potencia\ requerida\ para\ realizar\ la\ OI}{Q_{producto}} = \frac{789,17\ kW}{259\ m^3/h} \\ = 3,05\ kWh/m^3$$

$$Caudal\ de\ salmuera\ permitido\ por\ cada\ cámara\ isobárica\ (ERI-PXQ300) \\ = 300\ gpm \times \frac{1\ m^3/h}{4,4\ gpm} = 68,18\ \frac{m^3}{h}$$

$$Cámaras\ isobáricas\ necesarias\ (ERI-PXQ300) \\ = \frac{Caudal\ Agua\ de\ Mar\ +\ Mezcla\ -\ Fuga}{Caudal\ de\ salmuera\ permitido\ por\ cada\ cámara\ isobárica} = \\ = \frac{348,40}{68,18} = 5\ ERI-PXQ300$$

Para obtener todos los datos recolectados en unidades de consumo específico (kWh/m³), se debe dividir la potencia entre el caudal de producto.

ANEXO II: Entrevistas realizadas.

Las plantas visitadas se nombran numéricamente debido a la política de privacidad de las empresas.

TOMA DE DATOS		
Planta: 1		
Emplazamiento: Gran Canaria		Fecha:24/07/2015
Parámetros	Datos en planta actuales	
Recuperador de energía utilizado en la planta	ERI-PX 90S	iSave ERDs 21
Año de puesta marcha	2003	2010
Capacidad de Producción (m3/d)	400	400
Días funcionamiento al año %	80	81
Caudal Producto (m3/h)	16,67	16,67
Factor Conversión (%)	38	40
Conductividad de Producto ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	500	360
Consumo específico kWh/m ³	2,1	2,1
Observaciones	<p>- Esta planta no ha funcionado nunca sin recuperador de energía. Comenzó con un sistema ERI-PX y luego se cambiaron por iSave.</p> <p>- El agua producto se utiliza tanto para consumo como demás usos del Artillero.</p> <p>- La planta trabaja 24 horas al día excepto cuando el agua producto alcanza el nivel máximo (medido por una boya muelle), en cuyo caso la planta se para automáticamente.</p> <p>- Presenta un consumo específico de 3 kWh/m³ si tenemos en cuenta la bomba de pozo, la bomba dosificadora de antiincrustante, 2 bombas dosificadoras de productos químicos para el postratamiento y una bomba de recirculación.</p>	

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

BOMBA ALTA PRESIÓN BAP		
Marca /Modelo	2 Bombas de alta presión marca CAT de pistones, modelo 2541 que aportan 55 bar para el proceso de ósmosis, aunque la presión máxima que puede aportar es de 85 bar.	2 Bombas de alta presión marca CAT de pistones, modelo 2541 (las mismas que se utilizaban con los sistemas ERI-PX). Estas trabajan a 55 bar para el proceso de OI, pero pueden alcanzar una presión máxima de 85 bar.
Potencia (kW)/ Consumo eléctrico (kWh)	18,5/12	18,5/12
Mantenimiento	El mantenimiento se realiza cada cierto tiempo como ponerle aceite una vez al mes, cambio de válvulas cada 3-6 meses, cambio de retenes cada 3-6 meses etc.	El mantenimiento se realiza cada cierto tiempo como ponerle aceite una vez al mes, cambio de válvulas cada 3-6 meses, cambio de retenes cada 3-6 meses etc.
Complejidad de la operación/ Averías	No presenta complejidad en la operación ya que las bombas disponen de variadores de frecuencia. Averías por desgaste del cierre mecánico, rodamientos, aros rozantes de los impulsores y corrosión en algunos puntos.	No presenta complejidad en la operación. Las bombas disponen de variadores de frecuencia. Averías por desgaste del cierre mecánico, rodamientos, aros rozantes de los impulsores y corrosión en algunos puntos.
Servicio técnico (buena respuesta ante repuestos o paradas).	Tienen un buen servicio técnico, siempre tratan con los mismos proveedores y también disponen de repuestos. El tiempo de espera de repuestos es de 24 horas. En el caso de que una de las bombas de alta presión falle, disponen de otra para suplir las necesidades de agua.	Tienen un buen servicio técnico, siempre tratan con los mismos proveedores desde hace tiempo y también disponen de repuestos. El tiempo de espera de repuestos es de 24 horas. En el caso de que una de las bombas de alta presión falle, disponen de otra para suplir las necesidades de agua.
Estado Actual / Fotos		

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHOS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

BOMBA BOOSTER		
Marca/Modelo	Grundfos BM 304 R	Viene incorporada en el iSave ERDs 21
Potencia (kW)/ Consumo eléctrico (kWh)	5,5/5,5	
Mantenimiento	Reposición de aceite, engrase motor, cambio de retenes, cambio de juntas tóricas etc.	Reposición de aceite, cambio de retenes, cambio de juntas tóricas etc.
Complejidad de la operación /Averías	Bastante, dio varios problemas como derivación por corrosión, estriado de los ejes. Problemas en el rotor de la bomba booster, cambiándose de uno de 4 a 6 pulgadas, también se produjo un cambio en el eje mayor y un cambio a aletas más gruesas.	No ha presentado problemas o averías
Servicio técnico	Servicio técnico bueno y bastante rápido.	No ha hecho falta usarlo
RECUPERADOR DE ENERGÍA		
Marca /Modelo	2 x ERI PX 90S	iSave ERDs 21
Potencia (kW) / Consumo (kWh)	5,5/ 5,5	5,5/ 5,5
Mantenimiento	Ningún mantenimiento llevado a cabo desde su instalación.	Cambio o reposición de aceite, cambio de retenes, junta tórica, sellos y engrasado motor.
Complejidad de la operación / Averías	No presenta complejidad de la operación pero dio problemas de mezcla, para contrarrestarlo le introdujo un mayor caudal de agua de alimentación a baja presión, aunque al ser la bomba de alta de desplazamiento positivo siempre aportará la presión necesaria, en este caso 55 bar, aunque como consecuencia aumentará el consumo de la bomba.	En los 5 años de funcionamiento no ha tenido problemas con el dispositivo.
Servicio técnico	No le hizo falta solicitar repuestos y además disponen de repuestos.	No le ha hecho falta solicitar repuestos.
Estado Actual / Fotos	Recuperador de energía iSave ERDs 21	

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

		
<p>MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA</p>		
<p>Marca /Modelo</p>	<p>Hidranautic SWC 4 + LD</p>	<p>Hidranautic SWC 4 + LD</p>
<p>Fecha Instalación</p>	<p>En 2003.</p>	<p>En 2008 se cambiaron las membranas colocadas en la última posición (con mayor colmatación debido a la salmuera) y el último cambio fue en 2012.</p>
<p>Tubos OI. Configuración ¿Hibridación?</p>	<p>No hibridación. Configuración de 7 x 5, es decir 7 membranas (de 8 pulgadas) en cada tubo de presión (marca SMO 254) para un total de 5 tubos de presión.</p>	<p>No hibridación. Configuración de 7 x 4, es decir 7 membranas (de 8 pulgadas) en cada tubo de presión (marca SMO 254) para un total de 4 tubos de presión. Existe un tubo de presión sin funcionar debido a que la demanda no lo requiere.</p>
<p>Estado Actual / Fotos</p>		

INFORMACIÓN GENERAL	
Históricos de averías/paradas no programadas y duración de tiempo en parada.	
<p style="text-align: center;">Recuperador de energía ERI-PX 90S</p> <ul style="list-style-type: none"> - Corrosión de la bomba de captación hasta llegar a romperla, porque le quitaron el ánodo de sacrificio o la protección catódica que impiden la corrosión galvánica. Colocaron varias bombas de captación, la primera le duró 6 años, la segunda 1 año, las demás meses hasta que se dieron cuenta, por lo que tras analizar varias veces que ocurría se dieron cuenta del problema. Cada vez que analizaban la bomba paraban la planta. - Parada debida a fallo en la bomba de alta por desgaste, rotura, al ponerle aceite etc, el tiempo de parada depende del tiempo en que se tarde en solventar el problema, generalmente dura poco tiempo, un par de días ya que deben cumplir con la producción. - Paradas debido también a fallos en la instrumentación por corrosión mayoritariamente. 	<p style="text-align: center;">Recuperador de energía iSave ERDs 21</p> <ul style="list-style-type: none"> - Paradas por corte de luz, ya que no tienen un grupo electrógeno para abastecer energía en esos casos. El tiempo de parada son aproximadamente 2-3 horas. - Paradas debido a un fallo en el variador de frecuencia de arranque ya que había un fallo y tuvo que cambiar el tiempo de respuesta. La parada se dio 6 veces en el actual año. El pasado hubo un mayor número de paradas casi el triple por esta causa. - Paradas debido también a fallos en la instrumentación por corrosión mayoritariamente la última fue debido a una picada de 0,5 pulgadas en una válvula
Históricos de paradas programadas (mantenimiento preventivo y correctivo)	
<ul style="list-style-type: none"> - El mantenimiento preventivo se realiza todos los días para asegurar el buen funcionamiento de la planta, para ello revisa y repara los equipos que presenten problemas, por ejemplo revisar paletas, cierre mecánico, junta tórica, acoplamiento de la bomba etc. - El mantenimiento correctivo lo realiza cada vez que sea necesario aunque el tiempo estimado para llevarlo a cabo es cada mes. Por ejemplo cada 3-6 meses cambio de retenes, juntas tóricas, cierre mecánico etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - El mantenimiento preventivo se realiza todos los días para asegurar el buen funcionamiento de la planta, para ello revisa y repara los equipos que presenten problemas, por ejemplo revisar paletas, cierre mecánico, junta tórica, acoplamiento de la bomba etc. - El mantenimiento correctivo lo realiza cada vez que sea necesario aunque el tiempo estimado para llevarlo a cabo es cada mes. Por ejemplo cada 3-6 meses cambio de retenes, juntas tóricas, cierre mecánico etc.

Protocolo de arranques y paradas programadas.	
<ul style="list-style-type: none"> - El protocolo de parada de la planta es automático, depende del nivel del agua producto alcanzado en el depósito. Para ello se utiliza una boya muelle. - El protocolo de arranque de la planta es gracias a un equipo autómatas que contiene un variador de frecuencia con una capacidad de respuesta de 30 segundos. 	<ul style="list-style-type: none"> - El protocolo de parada es automático, depende del nivel del agua producto alcanzado en el depósito. Para ello se utiliza una boya muelle. - El protocolo de arranque de la planta es gracias a un equipo autómatas que contiene un variador de frecuencia con una capacidad de respuesta de 30 segundos.
Evolución de los consumos específicos.	
<p>Cuando se instaló el recuperador de energía ERI PX 90S en 2003 las membranas eran nuevas, por lo que se llegó a alcanzar un 2 kWh/m³ de consumo específico (línea de alta presión), luego con el tiempo aumento hasta 2,1 kWh/m³.</p>	<p>Cuando se instaló el recuperador de energía ¡Save en 2010 (gentileza de la empresa Danfoss), las membranas estaban recién cambiadas (2008), por lo que se llegó a alcanzar un 1,95 kWh/m³ de consumo específico (línea de alta presión), luego con el tiempo aumento hasta 1,98 y actualmente el consumo específico es de 2,1 kWh/m³.</p>
Fotos de la planta	
<p>Tanque de arena</p> 	<p>Filtros de cartucho especiales y pretratamiento (antiincrustante)</p> 
<p>Controlador del ¡Save 21 Controladores bombas de alta presión</p>	
	

Vista de la planta (tamaño contenedor)



Tipos de recuperadores de energía que conoce.

ERI PX, R-O kinetic, Peltón, ¡Save, Salino pressure center, Aqualyng, Dweer Calder, Osmorec, SWPE Danfoss APP/APM y Turbocharger.

Tipos de recuperadores de energía con los que ha trabajado en sus instalaciones.

El ERI PX en primero lugar (2003) y luego se implantó el ¡Save 21 en (2010).

Tipos de recuperadores de energía que le han dado mejores resultados y por qué.

El ¡Save , porque facilita la operación ya que no hay tantas tuberías, válvulas, caudalímetro de alta presión etc. Es compacto, ocupa poco espacio y es poco ruidoso. Sin embargo la bomba booster del ERI PX dio mucho problema.

Tipos de recuperadores de energía que son más eficientes, robustos, llevan un mejor mantenimiento, menos averías, ciclos de vida, etc. (Opinión personal).

El ¡Save hasta el momento no le ha dado problema, no ha tenido que hacerle mantenimiento ni nada y al ERI PX tampoco, el equipo que más problema le dio fue la bomba booster. Con respecto a consumo específico con ambos recuperadores se puede conseguir un 2,1 kWh/m³ pero con el ¡Save te ahorras espacio al ser mucho más compacto y es cómodo realizarle mantenimiento porque el despiece del equipo es bastante accesible.

Tipos de recuperadores de energía son más costosos, rentables, y los tiempos de amortización que conllevan.

El coste de un ERI PX es de aproximadamente 16000 € modelo ¡Save 21 y 31000€ modelo ¡Save 40 , sin embargo un ERI de 750 m³/d puede costar 32000€ y aparte debes tener en cuenta la bomba booster marca Grundfos que puede costar 20000€. Aunque si compras la bomba booster a la marca ERI puedes conseguir ambos equipos por 30000€ (descuento). No obstante en el caso del ERI PX también tienes que tener en cuenta el montaje, tuberías, mantenimiento, válvulas etc. Por lo que como conclusión es más rentable un ¡Save.

En el caso en que se instale un recuperador de energía en una planta desaladora que trabajaba sin ningún recuperador previamente, la amortización es a corto plazo debido a que el ahorro energético es considerable. Sin embargo si se realiza un *retrofitting* a dicha planta desaladora, es decir previamente la planta trabajaba con un sistema de recuperación y se le cambia el sistema de recuperación por otro que te permite conseguir un mayor ahorro energético, la amortización es a corto-medio plazo (entre 3-5 años). Este corto-medio plazo también es debido a que normalmente la instalación inicial va con la desaladora.

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

TOMA DE DATOS IDAM					
Planta: 2					
Emplazamiento: Fuerteventura			Fecha:27/07/2015		
Parámetros	Datos de planta actuales				
Planta	Planta III línea 1 y 2	Planta III línea 3 (ampliación)	Planta IV línea 1 y 2	módulo 2500	Planta IV línea 3 y 4 (ampliación)
Recuperador de energía utilizado en la planta	Turbina Francis	Turbina Francis	Turbina Francis	ERI-PX 220	ERI-PQ 300
Año de puesta marcha	1991	1996	1998	2009	2015
Capacidad de Producción (m3/d)	Línea 1-2= 2500 c/una	Línea 3= 2200	Línea 1-2= 6500 c/una	2500	Línea 3-4= 7000 c/una
Días funcionamiento al año %	Reserva	20	Reserva	95	95
Caudal Producto (m3/h)	Línea 1= 103 Línea 2=113	Línea 3= 93	Línea 1= 255 Línea 2=271	114	Línea 1-2= 292 c/una
Factor Conversión (%)	45	45	43	40	42
Conductividad de Producto ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1500 (conductividad media planta III)	1500 (conductividad media planta III)	Línea 1= 1100 Línea 2=500	550	390
Consumo específico (kWh/m ³)	4,08 (Consumo medio planta III)	4,08 (Consumo medio planta III)	3,53 (medio)	2,98	Línea 3: 2,22 Línea 4: 2,21
Observaciones	Actualmente se une el agua producto de las 3 plantas que están en funcionamiento (Planta III línea 3, planta IV línea 3-4 de 14000 m3/d y el módulo de 2500 m3/d), dando una conductividad final de 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$.				
BOMBA ALTA PRESIÓN BAP					
Marca /Modelo/Tipo	2 x IDP 4x11 DA-7	IDP 4x11 DA-7	2x IDP 6x13 DA-5, Multicelular centrífuga de Cámara Partida.	Sulzer MBN 80-MB N80-255-7	KSB MTC-RO-A 125/6
Potencia eléctrica (kW)	Línea 1= 415 Línea 2= 410	Línea 3= 392	Línea 1 y 2= 950	342 kW (consumo de la Bomba de alta y la booster).	Línea 3= 615 Línea 4= 609
Mantenimiento	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor y cambio de aros rozantes y juntas tóricas	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor y cambio de aros rozantes y juntas tóricas	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor y cambio de aros rozantes y juntas tóricas.	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor y cambio de aros rozantes y juntas tóricas	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor y cambio de aros rozantes y juntas tóricas
Complejidad de la operación /Averías	No, pero hubo averías en el cierre mecánico,	No, pero presentó averías en el cierre	No, presenta complejidad. Averías en el cierre	No, presenta complejidad. Averías en cierre	No, ya que las bombas son nuevas y se instalaron en este año.

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

	rodamientos, aros rozantes de los impulsores, corrosión en algunos puntos, etc.	mecánico, rodamientos, aros rozantes de los impulsores, corrosión en algunos puntos, etc.	mecánico, rodamientos, aros rozantes de los impulsores, corrosión en algunos puntos.	mecánico, rodamientos, aros rozantes de impulsores, corrosión y fallo por aumento de temperatura en un rodamiento.	
Servicio técnico	Ingersoll Dresser Pump y era bueno. Luego paso a mano de ellos, tienen varios repuestos disponibles.	Ingersoll Dresser Pump y era bueno. Luego paso a mano de ellos, tienen varios repuestos disponibles.	Ingersoll Dresser Pump y era bueno, repuestos disponibles en 24 horas. Luego paso a mano de ellos.	Bueno, pero antes era mejor porque tenían contratos con los proveedores Ahora lo llevan ellos (por la crisis).	Bueno, poco uso hasta el momento. Planta nueva. También tienen repuestos disponibles.
Estado Actual / Fotos	<p>Planta III, línea 1-2 y línea 3(ampliación).</p>  <p>Planta IV, línea 1 y 2</p>  <p>Plata módulo 2500.</p> 				

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.



BOMBA BOOSTER					
Marca/ Modelo	No dispone	No dispone	No dispone	Inda BR-1010-2	KSB RPH-RO 150-230 A
Potencia (kW)				342 kW (consumo de la Bomba de alta y la booster).	Línea 3=33 Línea 4=35
Mantenimiento				Reposición de aceite, cambio de retenes, aros rozantes etc.	Reposición de aceite, cambio de retenes, aros rozantes etc.
Complejidad de la operación/ Averías				No complejidad. Averías debido al aumento de temperatura en un rodamiento, picaduras por corrosión en algunos puntos.	Por el momento no le ha dado problemas, se instaló recientemente en 2015.
Servicio técnico				Era bueno, pero ahora lo llevan ellos.	Todavía no ha hecho uso de él.



ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

RECUPERADOR DE ENERGÍA					
	Planta IV, línea 3 y 4 (ampliación).				
					
Marca /Modelo	2xIDP 3x8 DAT-6 Multicelular centrífuga	IDP 3x8 DAT-6 Multicelular centrífuga	IDP 4x11 DAT-6 Multicelular centrífuga	4 x ERI-PX 220	14 x ERI-PQ 300 (7 cada línea)
Mantenimiento	Cambio retenes, reponer aceite, lubricación del motor, aros rozantes, juntas tóricas etc	Cambio retenes, reponer aceite, lubricación del motor, aros rozantes, juntas tóricas etc	Cambio retenes, reponer aceite, lubricación del motor, aros rozantes, juntas tóricas etc	Ver que no hay obstrucción dentro del rotor y asegurar una buena lubricación	Ver que no hay obstrucción dentro del rotor y asegurar una buena lubricación.
Complejidad de la operación /Averías	No, control de la planta mediante curvas de consumo, caudal y calidad de producto. Aumento de la salinidad en el agua producto.	No, control de la planta mediante curvas de consumo, caudal y calidad de producto. . Aumento de la salinidad en el agua producto.	No, control mediante curvas de consumo, caudal y calidad de producto. Avería debido a incremento de la salinidad en el producto de líneas antiguas, por ello mezclan el agua producto de todas las plantas.	No presenta complejidad de la operación. El control de la planta es mediante curvas de consumo, caudal y calidad de producto.	No presenta complejidad en la operación y no ha tenido averías, poco tiempo de uso.
Servicio técnico	Al principio el servicio técnico lo llevaba IDP (Ingersoll Dresser Pump) y era bueno pero luego paso a mano de ellos, por lo que tenían disponibilidad de repuestos.	Al principio el servicio técnico lo llevaba IDP y era bueno pero luego paso a mano de ellos, por lo que tenían disponibilidad de repuestos.	Al principio el servicio técnico lo llevaba IDP y era bueno pero luego el servicio técnico paso a mano de ellos, por lo que tenían varios repuestos disponibles.	Era bueno, pero antes era mejor porque tenían contratos con los proveedores. Ahora ese contrató se cerró debido a la crisis y paso a mano de ellos.	Bueno, poco uso hasta el momento. Planta nueva. También tienen repuestos disponibles.
Estado Actual / Fotos					

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

Planta III, línea 1-2 y línea 3(ampliación).



Planta IV, línea 1-2.



Módulo 2500



Planta IV, línea 3-4 (ampliación).



ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA					
Marca /Modelo	Línea 1= FILMTEC™ SW30HR-380 de 8 pulgadas. Línea 2= Fluid Systems Premium TFC 2822 SS Y Fluid Systems Magnum TFC 2832 SS.	Línea 3= FILMTEC™ SW30HR-380 de 8 pulgadas.	Línea 1= FILMTEC™ SW30HR-380. Línea 2= 2 x Qfx SW 400 SR+ 5 x Qfx SW400R.	FILMTEC™ SW 30 HR-400 de 8 pulgadas.	Línea 3-4= FILMTEC™ SW 30 XHR-440 (con alto rechazo al boro) y FILMTEC™ SW 30 XHR-440 (alto rechazo y bajo consumo de energía).
Fecha Instalación	Línea 1= 2004.	Línea 3= 2004.	Línea 1= 2007 Línea 2= 2013.	2009	2015
Tubos OI. Configuración ¿Hibridación?	Línea 1-2 = 40 tubos /línea. (Configuración 26-14 de dos etapas) con 6 elementos cada tubo (480 elementos en total). Hibridación en línea 2.	Línea 3= 32 tubos de presión. (Configuración 20-12) con 6 elementos cada tubo (192 elementos en total). No hay hibridación.	Línea 1= 72 tubos de presión y 7 elementos por tubo (504 membranas). No hay hibridación. Línea 2= 54 tubos de presión y 7 elementos por tubo (378 elementos). Si hay hibridación.	36 tubos de presión con 7 elementos en cada tubo de presión (252 elementos en total). No hay hibridación.	Línea 3-4 = 74 tubos / línea. 7 elementos cada tubo (1036 elementos en total). Si hay Hibridación en ambas líneas.
Estado Actual / Fotos	<p style="text-align: center;">Planta III, línea 1-2 y línea 3(ampliación).</p>  <p style="text-align: center;">Planta IV, línea 1-2.</p> 				

Módulo 2500



Planta IV, línea 3-4 (ampliación).



INFORMACIÓN GENERAL

Históricos de averías/paradas no programadas y duración de tiempo en parada.

Avería en aros rozantes de los impulsores debido a la calidad del material. La avería duro 24 horas aproximadamente.

Avería debido a la subida de temperatura en un rodamiento. La sustitución se dio aproximadamente 12 horas.

Avería por corrosión en algunos puntos. Duración de la parada 12 horas aproximadamente.

Históricos de paradas programadas (mantenimiento preventivo y correctivo)

Generalmente se realizaba un mantenimiento preventivo en verano y después de verano (en Octubre aproximadamente). Aunque también se realiza en función de si ven algún problema en la planta. El mantenimiento correctivo lo realizan cada vez que sea necesario, en función de la línea en la que se diera el problema.

Protocolo de arranques y paradas programadas.

Las plantas con turbinas Francis no tienen variadores de frecuencia por lo que el protocolo de arranque y parada de las turbinas es mediante una secuencia de arranque. En el caso de las plantas más nuevas con sistemas Eris, si tienen variadores de frecuencia.

Evolución de los consumos específicos.

El aumento de los consumos específicos con el paso del tiempo en las turbinas Francis fue de 0,3-0,4 kWh/m³ aproximadamente, es decir, la planta recién instalada tenía un consumo de 3,68 kWh/m³. Aunque actualmente se une el agua producto de las 3 plantas que estaban en funcionamiento (Fv IV líneas 3-4 de 14000m³/d, Fv III línea 3 de 2200 m³/d y el módulo de 2500 m³/d), dando un consumo específico global de 3,6 kWh/m³.

Antes de la entrada en servicio de las 2 líneas nuevas 3-4 de la planta Fv IV con ERIs el consumo específico de la planta del CAAF en Puerto del Rosario era de 5,1 kWh/m³ (incluye el bombeo del agua producto hacia los depósitos).

Fotos de la planta

Emplazamiento de la planta y tanques de arena.



Bomba de captación
(común para todas las plantas)



Bombas para el transporte de agua potable a ciudad
(Mezcla de todas las aguas producto)



Filtros de cartucho y los tanques dosificadores de antiincrustante como pretratamiento y tanque de cloración como post-tratamiento.



Container módulo 2500



Tipos de recuperadores de energía que conoce.

ERI PX, R-O kinetic, Turbina Francis y Peltón, ¡Save, Aqualyng, Dweer Calder, Osmorec, Siemag, Turbocharger.

Tipos de recuperadores de energía con los que ha trabajado en sus instalaciones.

En 1991 se construyó una planta III con 2 líneas de producción total de 5000 m³/d y un sistema de recuperación de energía de turbina Francis. En 1996 se amplió la planta III con 1 línea de producción de 2200 m³/d y también un sistema de recuperación de energía de turbina Francis. Luego en 1998 se construyó otra planta IV con 2 líneas y una producción total de 13000 m³/d. Más tarde en el 2009 se montó otra planta denominada Módulo 2500, pero con un sistema de recuperación de energía de cámara isobárica por rotación denominado ERI-PX y con una capacidad de producción de 2500 m³/d. Finalmente en el 2015 se amplió la capacidad de la planta IV, en 14000 m³/d (7000 m³/d cada línea) con recuperadores Eris.

Tipos de recuperadores de energía que le han dado mejores resultados y por qué.
El Eri PX por su modularidad a la hora de aumentar la capacidad de producción, por el momento no ha presentado problemas, requiere de poco espacio y es poco ruidoso.
Tipos de recuperadores de energía que son más eficientes, robustos, llevan un mejor mantenimiento, menos averías, ciclos de vida, etc. (Opinión personal).
En su opinión el ERI-PX porque es el sistema de recuperación que mejor resultado le ha dado, no ha tenido averías por el momento, ya que llevan relativamente poco tiempo en funcionamiento.
Tipos de recuperadores de energía más costosos, rentables y los tiempos de amortización que conllevan.
<p>De los sistemas de recuperación de energía instalados en la planta de Fuerteventura, los ERIs (que han estado en funcionamiento durante 6 años) son los sistemas 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, como las Turbinas Francis y Pelton.</p> <p>De tal modo que el tiempo de amortización de la inversión de un módulo de desalación existente y que le vas a realizar una mejora de eficiencia energética con sustitución de turbina Francis a recuperadores ERIs, en nuestro caso real, es de 4 años aproximadamente, debido al ahorro energético obtenido como consecuencia del menor consumo de energía de la planta.</p> <p>Un dato de interés es que el dinero invertido en ampliar la planta IV de Fuerteventura con recuperadores ERIs fue de 406,000€.</p> <p>Por otro lado también se quiere hacer un <i>retrofitting</i> a la línea 2 de la planta IV para ampliar su capacidad de producción de 6500 a 7500 m³/d, cambiando la turbina Francis a un ERI-PX.</p>

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHOS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

TOMA DE DATOS IDAM	
Planta: 3	
Emplazamiento: Gran Canaria Fecha:27/08/2015	
Parámetros	Datos en planta actuales
Año de puesta marcha	2010
Capacidad de Producción (m3/d)	2 x 36
Horas/día funcionamiento % horas puesta en carga	70% La planta se para según el nivel del aljibe (80 m ³).
Caudal Producto (m3/h)	2 x 1,5
Factor Conversión (%)	43
Conductividad de Producto (µS/cm)	Línea 1: 1000 + Línea 2: 15 (2º Paso) = 400 (es la media).
Consumo específico kWh/m³	3,2
RECUPERADOR DE ENERGÍA	
Marca /Modelo	2 x Danfoss 2.5 APP & 1.8 APM
Fecha Instalación	2010
Mantenimientos	Cambio de pistones, puerto de entrada, desgaste de junta tórica
Complejidad de la operación/ Averías	No presenta complejidad de la operación y son bastantes manipulables. No han presentado averías importantes.
Servicio técnico	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en dos días (lo lleva él).
Estado Actual / Fotos	

MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA	
Marca /Modelo	Toray TM 810 de 4 in
Tubos OI. Configuración ¿Hibridación?	Hay 4 tubos, 2 x 2 en serie con 4 elementos de 4'' cada uno con su recuperador correspondiente. Luego pasan a otro tubo de presión con una configuración de un paso con 8 elementos más para poder reducir la cantidad de Boro en el agua producto, por lo que hay un total de 24 elementos. No existe hibridación.
Estado Actual / Fotos	
INFORMACIÓN GENERAL	
Históricos de averías/paradas no programadas y duración de tiempo en parada.	
Paradas por cambios de mareas, ya que hay mucha turbidez en el agua de alimentación y puede colmatarse los filtros.	
Históricos de paradas programadas (mantenimiento preventivo y correctivo)	
Generalmente se realiza un mantenimiento preventivo cada año, pero realmente el mantenimiento se hace día a día en función de si se observan cambios en la conductividad, caudal etc. Con respecto al mantenimiento correctivo lo realiza cada vez que sea necesario.	
Protocolo de arranques y paradas programadas.	
El protocolo de parada de la planta, es mediante una boya que mide el nivel del aljibe (80 m3) de modo que cuando alcanza el nivel máximo se para la planta. Por el contrario el protocolo de arranque de la planta es de modo automático, con una rampa de aceleración para evitar golpes de presión y cuando se para se hace flushing.	
Evolución de los consumos específicos.	
En este caso ha pasado poco tiempo (5 años) por lo que el consumo específico de esta planta no ha variado mucho pasó de 3,0 a 3,2 kWh/m3 (aproximadamente).	

Tipos de recuperadores de energía que conoce.
ERI PX, R-O kinetic, Turbina Francis y Peltón, Danfoss, iSave, Aqualyng, Dweer Calder, Osmorec, Siemag, Turbocharger, KSB SalTec DT, Osmorec
Tipos de recuperadores de energía con los que ha trabajado en sus instalaciones.
RO-Kinetic, Danfoss y ERIs.
Tipos de recuperadores de energía que le han dado mejores resultados y por qué.
El RO-Kinetic tiene un mantenimiento bajo, aprovecha la energía cinética, no necesita válvulas electromecánicas solo necesita válvulas reductoras y por otro lado la bomba Danfoss también funciona muy bien porque no lleva mucho mantenimiento y es un sistema muy compacto.
Tipos de recuperadores de energía que son más eficientes, robustos, llevan un mejor mantenimiento, menos averías, ciclos de vida, etc.
En su opinión la bomba Danfoss, es un sistema robusto, lleva poco mantenimiento, ha tenido muy pocas averías y es bastante eficiente.
Tipos de recuperadores de energía más costosos, rentables y los tiempos de amortización que conllevan.
La bomba Danfoss es cara pero es fiable, dura bastante tiempo y tiene 6 años de amortización aproximadamente. Con el sistema RO-Kinetic se obtienen buenos resultados en términos de consumo específico pero el material no es tan bueno como el de la bomba Danfoss (<i>Super Dúplex</i>).

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

TOMA DE DATOS IDAM			
Planta: 4			
Emplazamiento: Gran Canaria		Fecha:16/09/2015	
Parámetros	Datos en planta actuales		
Año de puesta marcha	En 1995 entró en servicio la Turbina Francis	En 2003 se realizó un <i>retrofitting</i> con Turbinas Pelton	En el 2008 se realizó otro <i>retrofitting</i> con ERI-PX-220
Capacidad de Producción (m3/d)	4000	2x 5000	2x7500
Horas/día funcionamiento %	95	95	95
Caudal Producto (m3/h)	167	2 x 208,33	2x 312,5
Factor Conversión (%)	45	45	45
Conductividad de Producto (µS/cm)	1000 (media)	650 (media)	350 (media)
Consumo específico kWh/m³	5,15	3,85	2,6
BOMBA DE ALTA PRESIÓN			
Marca /Modelo	2 turbobombas Ingersoll Dresser Pump, 6x 110 A-5 de cámara partida. (Una bomba en modo reserva).	3 Turbobombas A, B, C de la marca Ingersoll Dresser Pump (Flowserve). A,B: modelo 6 x13 DA-5 (Cámara partida). C: modelo 6X13 CS.5. (Segmentada) La B en modo reserva.	3 bombas A, B, C de la marca Flowserve. A, B: marca 6 x13 DA-5 (cámara partida). C: 6X13 CS-5 (Segmentada) La B está en modo reserva con una turbina Pelton acoplada.
Potencia (kW)	Bomba A, B = 850	Bomba A,B, C = 850	Bomba A,B, C = 850
Mantenimientos	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas.	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas.
Complejidad de la operación/Averías	No, son bastantes manipulables. Avería en cierre mecánico, juntas tóricas y aros rozantes.	No, son bastantes manipulables. Avería en cierre mecánico, juntas tóricas y aros rozantes.	No, son bastantes manipulables. Avería en cierre mecánico, juntas tóricas y aros rozantes.
Servicio técnico	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en 24 horas.	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en 24 horas.	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en 24 horas.

Bomba segmentada con turbina Pelton desacoplada (C).



Turbina Pelton



Estado Actual /
Fotos

Bomba de cámara partida con turbina Pelton desacoplada (B).



Bomba de cámara partida con turbina Pelton desacoplada (A)



ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

BOMBA BOOSTER			
Marca/ Modelo	No dispone	No dispone	2 X Flowserve HHPX (Centrífugas)
Potencia (kW)			75
Mantenimientos			Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas.
Complejidad de la operación/Averías			No presenta complejidad. Averías por sellos mecánicos y fugas.
Servicio técnico			Bueno, repuestos 24-72 horas.
Estado actual/ Fotos			
RECUPERADOR DE ENERGÍA			
Marca /Modelo	2xTurbinas Francis Flowserve 8 HHPX-15C	3 x Turbina Pelton CALDER RO 350-80-2	2X 10 x ERIS-PX 220
Mantenimientos	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas.	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas.
Complejidad de la operación/Aveías	No, manipulables. Averías en el cierre mecánico, rodamientos, aros rozantes de los impulsores y corrosión en algunos puntos etc	No, son bastantes manipulables. Averías en el cierre mecánico, rodamientos, aros rozantes de los impulsores y corrosión en algunos puntos etc	No, y no requieren de válvulas ni sistemas de control. Averías por introducción de cuerpos extraños como trozos de gomas de válvulas.
Servicio técnico	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en 24 horas.	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en 24 horas.	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en 24 horas.

Línea A con ERI-PX



Línea C con ERI-PX



Línea B con Turbina Pelton en modo reserva



Estado Actual /
Fotos

MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA			
Marca /Modelo	Permetec 8''	Permetec 8''	FilmTec SW 30XHR-400i WET
Fecha Instalación	1995	2003	2008
Tubos OI. Configuración ¿Hibridación?	Línea A= 65 Tubos de presión (7membranas), 455 membranas. No hay hibridación.	Línea A= 65 Tubos de presión (7membranas/tubo), 455 membranas. Línea B= 80 Tubos de presión (7membranas/tubo), 560 membranas. No hay hibridación.	Línea A= 68 Tubos de presión (7membranas/tubo), 476 membranas. Línea B= 83 Tubos de presión (7membranas/tubo), 581 membranas. No hay hibridación.
Estado Actual / Fotos			
INFORMACIÓN GENERAL			
Históricos de averías/paradas no programadas y duración de tiempo en parada.			
En la bomba de alta presión se dieron averías en el cierre mecánico, juntas tóricas, retenes, cierres mecánicos, pero el tiempo en parada no duraba más 72 horas.			
Históricos de paradas programadas (mantenimiento preventivo y correctivo)			
El mantenimiento preventivo lo realizan para 3 meses para hacer cambios de aceites, limpieza general del conjunto, limpieza de cajeras, etc). En el caso de cambio o reposición de aceite, lo llevan a cabo cada año aproximadamente (tanto en la bomba de alta presión como la bomba booster). Con respecto al mantenimiento correctivo lo realiza cada vez que sea necesario, en función de la línea en la que tenga el problema.			
Protocolo de arranques y paradas programadas.			
No hay variadores de frecuencia y la planta se pone en marcha mediante una secuencia de arranque.			

Evolución de los consumos específicos.

La evolución del consumo específico depende de varios factores, del ensuciamiento de las membranas, de las condiciones de trabajo etc. Por lo que en 8 años que estuvo en funcionamiento la planta con turbinas Francis pudo aumentar su consumo en 0,2-0,3 kWh/m³, pasando de 4.85 a 5.15 kWh/m³ (valores estimados). Por otro lado al pasar a Turbinas Pelton se instaló una nueva línea con nuevas membranas y del paso de Pelton a ERI-PX paso sólo 5 años por lo que el consumo no aumento significativamente pasando de 3,85 a 4 kWh/m³ (valores estimados). Finalmente el consumo actual de la planta (en la línea de alta) es de 2.60 kWh/m³ aproximadamente con sistemas ERI-PX.

Complejidad de la operación en general.

Las turbinas Francis no daban problemas normalmente salvo el mantenimiento pertinente por desgaste y reposición de elementos. Los ERI-PX requieren de un mínimo mantenimiento, ocupan poco espacio y son muy modulares. De tal modo que si uno se avería se hace un bypass y no se para la línea y por lo tanto tampoco la producción.

Fotos de la planta

Captación de agua de mar.



Filtro de arena



Filtros de cartucho



Tipos de recuperadores de energía que conoce.
ERI PX, R-O kinetic, Turbina Francis y Peltón, Dweer Calder.
Tipos de recuperadores de energía con los que ha trabajado en sus instalaciones.
Turbina Francis, Pelton y cámara isobárica de rotación ERI PX.
Tipos de recuperadores de energía que le han dado mejores resultados y por qué.
El ERI-PX por su modularidad a la hora de aumentar la capacidad de producción, por el momento no ha dado muchos problemas, solo parada por introducción de cuerpos extraños al ERI, pero la solución de la avería fue relativamente sencilla, desmonte y limpieza, además requiere de poco espacio.
Tipos de recuperadores de energía que son más eficientes, robustos, llevan un mejor mantenimiento, menos averías, ciclos de vida, etc. (Opinión personal).
En su opinión el ERI-PX porque es el sistema de recuperación que mejor resultado le ha dado en términos de eficiencia energética.
Tipos de recuperadores de energía más costosos, rentables, y los tiempos de amortización que conllevan.
No maneja el tema económico pero en su opinión el tiempo de amortización del ERI-PX es relativamente corto 2-3 años, debido a que se consiguen bajos consumos específicos y no requiere de un coste de mantenimiento tan elevado como en otros sistemas de recuperación de energía.

TOMA DE DATOS IDAM	
Planta: 5	
Emplazamiento: Gran Canaria Fecha:13/10/2015	
Parámetros	Datos en planta actuales
Año de puesta marcha	2010 (Fecha de instalación de la planta) 2014 (Fecha de puesta en marcha)
Capacidad de Producción (m3/d)	2 x 8000
Horas/día funcionamiento %	98
Caudal Producto (m3/h)	Línea 1= 338,1 Línea 2 = 335,9
Factor Conversión (%)	Línea 1 y 2= 45
Conductividad de Producto (μS/cm)	Línea 1(506,3) + Línea 2(379,4) = 442,85 (media).
Consumo específico kWh/m³	Línea 1= 2,65 Línea 2= 2,66
BOMBA DE ALTA PRESIÓN	
Marca /Modelo	2 x Sulzer MB150-360/4 (Centrífugas, Segmentadas y con 4 rodetes)
Potencia (kW)	Línea 1 y 2= 855
Mantenimientos	Engrase del motor, medir vibraciones, mirar si el cojinete está tocado, medir trazas de metales pesados en el aceite de la bomba (se manda al laboratorio), cambio de pistones, puerto de entrada, desgaste de junta tórica.
Complejidad de la operación/ Averías	No presenta complejidad de la operación y no han presentado averías importantes.
Servicio técnico	Bueno, disponibilidad de repuestos desde 72 horas hasta un 1 mes y medio, dependiendo de la pieza requerida.
Estado Actual / Fotos	

BOMBA BOOSTER	
Marca /Modelo	2 x Sulzer HXR 500LN2 (Centrífugas, Segmentadas y con 4 rodetes)
Potencia (kW)	Línea 1 = 41,24 Línea 2 = 41,31
Mantenimientos	Engrase del motor, medir vibraciones, mirar si el cojinete está tocado, medir trazas de metales pesados en el aceite de la bomba (se manda al laboratorio), cambio de pistones, puerto de entrada, desgaste de junta tórica.
Complejidad de la operación/ Averías	No presenta complejidad de la operación y no se han dado averías ya que se puso en marcha recientemente (2014).
Servicio técnico	A pesar de tener las Bombas de alta y las booster de la marca Sulzer, el servicio técnico lo lleva Flowserve, por la fiabilidad que ofrece. Buen servicio técnico y disponibilidad de repuestos desde 72 horas hasta un 1 mes y medio, dependiendo de la pieza requerida.
Estado Actual / Fotos	
RECUPERADOR DE ENERGÍA	
Marca /Modelo	Línea 1 = 10 ERI-PX 220 Línea 2 = 10 ERI-PX 220
Mantenimientos	Estar atento a que no haya obstrucción en los ERIs (si lo hay suena menos) y asegurar el flujo de lubricación, etc.
Complejidad de la operación/ Averías	No presenta complejidad de la operación. Las averías dadas fueron debidas a la mala construcción del colector de los ERIs, lo que ocasionaba que se produjeran fugas, otra de las averías fue debida al ensuciamiento del rotor de uno de los ERI .
Servicio técnico	Bueno, llevan a cabo la revisión de la planta una vez al año porque está en garantía y Energy Recovery Inc ofrece un curso de formación sobre el funcionamiento y desmonte del ERI. Disponibilidad de repuestos desde 72 horas hasta un 1 mes y medio, dependiendo de la pieza requerida.
Estado Actual / Fotos	

MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA	
Marca /Modelo	Hydranautics SWC4 MAX 8''
Tubos OI. Configuración ¿Hibridación?	Línea 1= 9 tubos de presión (7 membranas por tubo), 63 membranas. Línea 2= 9 tubos de presión (7 membranas por tubo), 63 membranas. No existe hibridación, ni dobles etapas.
Estado Actual / Fotos	
INFORMACIÓN GENERAL	
Históricos de averías/paradas no programadas y duración de tiempo en parada.	
<p>Avería producida en el recuperador de energía por la mala construcción del colector de los ERIs, lo que ocasionaba que se produjeran fugas, el tiempo que duro la avería de 24 aproximadamente.</p> <p>Averías debida al ensuciamiento del rotor de uno de los ERIs que provocó su atascamiento, no hizo falta cambiar el rotor sino limpiarlo únicamente. En este caso se colocó un tapón en la tubería de entrada al ERI y se bajó la producción solo durante 24 horas.</p>	
Históricos de paradas programadas (mantenimiento preventivo y correctivo)	
<p>Generalmente se realiza un mantenimiento preventivo cada 3 meses, pero realmente el mantenimiento se hace día a día en función de si escuchan ruidos raros del motor o ERI (indicativo principal de avería).</p> <p>Cada mes y medio mandan muestras del aceite del motor en busca de trazas de metales pesados, con el objetivo de proceder a cambiar el aceite o simplemente reponerlo.</p> <p>Con respecto al mantenimiento correctivo lo realizan cada vez que sea necesario.</p>	
Protocolo de arranques y paradas programadas.	
<p>La puesta en marcha de la planta es mediante un arranque en rampa, ya que la bomba de alta presión no tiene variador de frecuencia.</p>	
Evolución de los consumos específicos.	
<p>En este caso ha pasado poco tiempo (1 año) por lo que el consumo específico de esta planta no ha disminuido significativamente.</p>	

Tipos de recuperadores de energía que conoce.
ERI PX, R-O kinetic, Turbina Francis y Peltón, Dweer Calder.
Tipos de recuperadores de energía con los que ha trabajado en sus instalaciones.
Con el ERI PX.
Tipos de recuperadores de energía que le han dado mejores resultados y por qué.
El ERI-PX por su modularidad a la hora de aumentar la capacidad de producción, por el momento no ha dado muchos problemas, solo parada por introducción de cuerpos extraños al ERI, pero la solución de la avería fue relativamente sencilla, desmonte y limpieza, además requiere de poco espacio.
Tipos de recuperadores de energía que son más eficientes, robustos, llevan un mejor mantenimiento, menos averías, ciclos de vida, etc. (Opinión personal).
En su opinión el ERI-PX porque es el sistema de recuperación que mejor resultado le ha dado en términos de eficiencia energética, además no ha presentado casi averías y lleva un mantenimiento prácticamente nulo.
Tipos de recuperadores de energía más costosos, rentables, y los tiempos de amortización que conllevan.
No maneja el tema económico pero en su opinión el tiempo de amortización del ERI-PX es relativamente corto 2-3 años, debido a que se consiguen bajos consumos específicos y no requiere de un coste de mantenimiento tan elevado como en otros sistemas de recuperación de energía.

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

TOMA DE DATOS IDAM			
Planta: 6			
Emplazamiento: Gran Canaria			Fecha:01/11/2015
Parámetros	Datos en planta actuales		
Año de puesta marcha	En 1993 entró en servicio la Turbina Francis	En 1999 se realizó un <i>retrofitting</i> con Turbinas Pelton	En el 2002 se modificó el proceso añadiendo un doble paso y una doble etapa.
Capacidad de Producción (m3/d)	10000	25000	Línea A, B=7000 Línea A2, B2=9500 Total 33000
Horas/día funcionamiento %	95	95	Línea A=30 Línea B=98 Línea A2=70 Línea B2=98
Factor Conversión (%)	45	42	55
Conductividad de Producto (μS/cm)	-	-	400 (media)
Consumo específico (kWh/m ³)	-	-	3
BOMBA DE ALTA PRESIÓN			
Marca /Modelo		6 x Flowserve, Bomba A, B, A2, B2= IDP 8 x 13 DA-5 2x reserva= IDP 8 x 13 DA-5	6 x Flowserve, Bomba A, B, A2, B2= IDP 8 x 13 DA-5 2 x reserva= IDP 8 x 13 DA-5
Potencia (kW)	-	Bomba A,B=950 Bomba A2,B2= 1100 1 reserva=950 1 reserva=1100	Bomba A,B=950 Bomba A2,B2= 1100 1 reserva=950 1 reserva=1100
Mantenimientos	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas.	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas.
Complejidad de la operación /Averías	No, son bastantes manipulables. Avería en cierre mecánico, juntas tóricas y aros rozantes.	No, son bastantes manipulables. Avería en cierre mecánico, juntas tóricas y aros rozantes.	No, son bastantes manipulables. Avería en cierre mecánico, juntas tóricas y aros rozantes.
Servicio técnico	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en 24 horas.	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en 24 horas.	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en 24 horas.

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

<p>Estado Actual / Fotos</p>			
<p>BOMBA BOOSTER</p>			
<p>Marca/ Modelo</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>4 X Flowserve multietapa IDP 6x13 CS (Centrífugas)</p>
<p>Potencia (kW)</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>Bomba A,B=350 Bomba A2,B2= 450</p>
<p>Mantenimientos</p>	<p>Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas.</p>	<p>Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas.</p>	<p>Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas.</p>
<p>Complejidad de la operación /Averías</p>	<p>No presenta complejidad. Averías por sellos mecánicos y fugas.</p>	<p>No presenta complejidad. Averías por sellos mecánicos y fugas.</p>	<p>No presenta complejidad. Averías por sellos mecánicos y fugas.</p>
<p>Servicio técnico</p>	<p>Buena, repuestos 24-72 horas.</p>	<p>Buena, repuestos 24-72 horas.</p>	<p>Buena, repuestos 24-72 horas.</p>
<p>Estado actual/ Fotos</p>			

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHO EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

RECUPERADOR DE ENERGÍA			
Marca /Modelo	-	2 x Calder RO-350-100-2 2 x Calder RO-350-80-2	2xCalder RO-350-100-2 2 x Calder RO-350-80-2
Mantenimientos	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas.	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas	Cambio retenes, reponer aceite, engrasado del motor, cambio de aros rozantes y juntas tóricas.
Complejidad de la operación /Averías	No, son bastantes manipulables. Averías en el cierre mecánico, rodamientos, aros rozantes de los impulsores y corrosión en algunos puntos etc.	No, son bastantes manipulables. Averías en el cierre mecánico, rodamientos, aros rozantes de los impulsores y corrosión en algunos puntos etc.	No, y no requieren de válvulas ni sistemas de control. Averías por introducción de cuerpos extraños como trozos de gomas de válvulas.
Servicio técnico	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en 24 horas.	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en 24 horas.	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en 24 horas.
Estado Actual / Fotos			

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHO EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA			
Marca /Modelo	Hydranautic 8''	Filmtec 8''	Filmtec 8''
Fecha Instalación	1993	1999	2002
Tubos OI. Configuración ¿Hibridación?	-	Bomba A,B=350 Bomba A2,B2= 450 Línea B= 80 Tubos de presión (7membranas/tubo), 560 membranas. No hay hibridación.	Línea B= 83 Tubos de presión (7membranas/tubo), 581 membranas. No hay hibridación.
Estado Actual / Fotos	Primer paso		
			
Estado Actual / Fotos	Segundo Paso		
			

INFORMACIÓN GENERAL
Históricos de averías/paradas no programadas y duración de tiempo en parada.
No se han producido averías importantes, sino más bien averías en el cierre mecánico, rodamientos, aros rozantes de los impulsores y corrosión en algunos puntos etc. Por lo que el tiempo de parada de la planta no suele ser mayor a 24 horas.
Históricos de paradas programadas (mantenimiento preventivo y correctivo)
Generalmente se realiza un mantenimiento cada mes, pero realmente el mantenimiento se hace día a día en función de si escuchan ruidos raros del motor o cualquier equipo (indicativo principal de avería). Con respecto al mantenimiento correctivo lo realizan cada vez que sea necesario.
Protocolo de arranques y paradas programadas.
La puesta en marcha de la planta es mediante un arranque en rampa, ya que la bomba de alta presión no tiene variador de frecuencia.
Evolución de los consumos específicos.
En este caso han pasado varios años (13) años por lo que el consumo específico de esta planta habrá podido disminuir en 0,2-0,3 kWh/m ³ . Actualmente el consumo específico de la planta es de 3 kWh/m ³ , pero hay que tener en cuenta de que realizan un segundo paso y una segunda etapa y además hibridan.
Tipos de recuperadores de energía que conoce.
ERI PX, Turbina Francis y Peltón, Dweer Calder.
Tipos de recuperadores de energía con los que ha trabajado en sus instalaciones.
Turbina Francis y Pelton.
Tipos de recuperadores de energía que le han dado mejores resultados y por qué.
La turbina Pelton porque lleva poco mantenimiento y tiene un menor consumo específico que la Francis.
Tipos de recuperadores de energía que son más eficientes, robustos, llevan un mejor mantenimiento, menos averías, ciclos de vida, etc. (Opinión personal).
En su opinión la Pelton, porque es el sistema de recuperación que mejor resultado le ha dado, no ha tenido averías importantes por el momento y además le ha permitido aumentar la producción sin problema.
Tipos de recuperadores de energía más costosos, rentables, y los tiempos de amortización que conllevan.
El tiempo de amortización de una Turbina Pelton es menor que el de una turbina Francis, ya que se consigue un menor consumo específico. Con respecto al precio, no tiene conocimiento de ello.

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHOS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

TOMA DE DATOS IDAM	
Planta: 7	
Emplazamiento: Sur de Tenerife Fecha:27/08/2015	
Parámetros	Datos en planta actuales
Año de puesta marcha	2007
Capacidad de Producción (m3/d)	200
Horas/día funcionamiento % horas puesta en carga	90 La planta se para según el nivel del aljibe.
Caudal Producto (m3/h)	6,5
Factor Conversión (%)	40
Conductividad de Producto (µS/cm)	250-300
Consumo específico kWh/m³	2,10
Bomba de alta presión	
Marca /Modelo	Danfoss 8.2 ó 10.2
Potencia kW	37
Complejidad de la operación/ Averías	Generalmente no presentó complejidad en la operación, pero dio fallos porque los respuestos no eran originales, por ejemplo con las juntas tóricas etc.
Mantenimientos	Cambio de aceite, cambio de junta tórica de retenes etc.
Servicio técnico	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en dos días (lo lleva él).
Estado Actual / Fotos	
Bomba booster	
Marca /Modelo	ERI 8503
Potencia kW	3,7
Complejidad de la operación/ Averías	No presentó complejidad en la operación, pero dio fallos con el cierre mecánico.
Mantenimientos	Cambio de aceite, cambio de junta tórica de retenes etc.
Servicio técnico	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en dos días (lo lleva él).

Recuperador de energía	
Marca /Modelo	RO-KINETIC TECNOVALIA k-200
Complejidad de la operación/ Averías	Sí, es un dispositivo complejo de desarmar, esto es debido a la válvula reductora. También presentó fallos porque los repuestos no eran originales. Se tuvo que llevar a cabo un cambio de material de acero 904 L por acero Duplex, porque estaba teniendo mucha corrosión intersticial, cambio de los retenes de las mancuernas porque se daba mucha pérdida de agua, cambio de sellos de gomas, etc.
Mantenimientos	Se realiza cada vez que se hace falta, por ejemplo cambio de los retenes, sellos de gomas, etc
Servicio técnico	Buen servicio, disponibilidad de repuestos en dos días (lo lleva él).
Estado Actual / Fotos	

MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA	
Marca /Modelo	-
Tubos OI. Configuración ¿Hibridación?	2 tubos de 7 elementos.
Estado Actual / Fotos	
INFORMACIÓN GENERAL	
Emplazamiento: Sur de Tenerife	Planta: 7
Fecha: 27/08/2015	
Históricos de averías/paradas no programadas, (Porque se paró, durante cuánto tiempo)	
<ul style="list-style-type: none"> - Avería porque los repuestos no eran originales (Duración parada de 3-5 días). - Avería en el recuperador por corrosión intersticial, se cambiaron tuberías de acero 904 L por acero Duplex (Duración parada 2-3 días). - Fugas por los retenes de las mancuernas (Duración parada 24 horas). 	
Históricos de paradas programadas (mantenimiento preventivo y correctivo)	
<p>Generalmente se realiza un mantenimiento preventivo una vez al año, pero realmente el mantenimiento se hace día a día en función de si se observan cambios en la conductividad, caudal etc. Con respecto al mantenimiento correctivo lo realiza cada vez que sea necesario.</p>	
Protocolo de arranques y paradas programadas.	
<p>El protocolo de parada de la planta, es mediante una boya que mide el nivel del algije del Hotel, de modo que cuando alcanza el nivel máximo se para la planta. Por el contrario el protocolo de arranque de la planta es de modo automático, con una rampa de aceleración para evitar golpes de presión.</p>	
Evolución de los consumos específicos.	
<p>En este caso el consumo específico de la línea de alta presión se mantuvo estable.</p>	
Tipos de recuperadores de energía que conoce.	
<p>ERI PX, R-O kinetic, Turbina Francis y Peltón, Danfoss, iSave, Aqualyng, Dweer Calder, Osmorec, Siemag, Turbocharger, KSB SalTec DT, Osmorec</p>	
Tipos de recuperadores de energía con los que ha trabajado en sus instalaciones.	
<p>RO-Kinetic, Danfoss y ERIs.</p>	
Tipos de recuperadores de energía que le han dado mejores resultados y por qué.	
<p>El RO-Kinetic tiene un mantenimiento bajo, aprovecha la energía cinética, no necesita válvulas electromecánicas solo necesita válvulas reductoras y por otro lado la bomba Danfoss también funciona muy bien porque no lleva mucho mantenimiento y es un sistema muy compacto.</p>	
Tipos de recuperadores de energía que son más eficientes, robustos, llevan un mejor	

mantenimiento, menos averías, ciclos de vida, etc.

En su opinión la bomba Danfoss, es un sistema robusto, lleva poco mantenimiento, ha tenido muy pocas averías y es bastante eficiente.

Tipos de recuperadores de energía más costosos, rentables y los tiempos de amortización que conllevan.

La bomba Danfoss es cara pero es fiable, dura bastante tiempo y tiene 6 años de amortización aproximadamente.

Con el sistema RO-Kinetic se obtienen buenos resultados en términos de consumo específico pero el material no es tan bueno como el de la bomba Danfoss (*Super Dúplex*).

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

TOMA DE DATOS IDAM					
Planta: 8					
Emplazamiento: Las Palmas de Gran Canaria				Fecha:27/07/2015	
Parámetros	Datos de planta actuales				
Planta	Líneas C,I,K y L	Líneas E,F y G.	Línea A	Línea B	Línea H
Recuperador de energía utilizado en la planta	3x Turbina Pelton	15 x 15 x 8 ERI-PX 220	2 x DWEER	7x ERI-PX 300	ERI-PQ 300
Año de puesta marcha	1998	2009	2011	2012	2013
Capacidad de Producción aproximada (m ³ /d)	24100	45600	16000	12000	12000
Días funcionamiento al año %	Reserva	90	90	90	90
Factor Conversión (%)	57	57	52	52	52
Consumo específico medio (kWh/m ³)	3,97	3,84	2,32	2,72	3,28
Observaciones	<p>Este es el estado actual de la planta. Pero la planta se instaló con turbinas Francis en 1989 con un total de 6 líneas y doble etapa, un consumo específico de 6,67 kWh/m³ y una capacidad de 36,000 m³/d.</p> <p>Luego en 1998 se realizó un <i>retrofitting</i> a Turbinas Pelton consiguiendo disminuir el consumo específico de la planta a 5,85 kWh/m³ y con una capacidad de producción de 36,000 m³/d.</p> <p>Después en el 2001 se instalaron bombas booster entre las dobles etapas consiguiendo disminuir el consumo específico en 5,11 kWh/m³ y se aumentó la capacidad de la planta a 50,000 m³/d.</p> <p>En el 2001 se añadió una séptima línea, aumentando la producción en 57800 m³/d.</p> <p>Más tarde en el 2003 también se añadió una octava línea, aumentando la producción en 66000 m³/d y disminuyendo el consumo específico en 4,76 kWh/m³.</p> <p>En el 2006 se instalaron dos líneas más hasta completar las diez, aumentando la producción en 80000 m³/d y disminuyendo el consumo específico en 4,63 kWh/m³.</p> <p>Luego en el 2007 se realizó un <i>retrofitting</i> a ERI-PX 220 en las líneas F y G</p>				

	<p>manteniendo la producción en 80000 m³/d y disminuyendo el consumo específico en 4,5kWh/m³.</p> <p>En el 2009 se realizó otro <i>retrofitting</i> a ERI-PX 220 en las líneas E y H aumentando la producción en 85000 m³/d y disminuyendo el consumo específico en 4,33 kWh/m³.</p> <p>En el 2011 se llevó a cabo otro <i>retrofitting</i> a DWEER en la línea A manteniendo la producción en 86500 m³/d y disminuyendo el consumo específico en 4,1 kWh/m³.</p> <p>En el 2011 se realizó otro <i>retrofitting</i> a ERI-PX 300 en la línea B manteniendo la producción en 86500 m³/d y disminuyendo el consumo específico en 4,0 kWh/m³.</p> <p>Finalmente en el 2013 se realizó otro <i>retrofitting</i> a ERI-PXQ 300 en la línea H manteniendo la producción en 86500 m³/d.</p> <p>Actualmente el consumo específico medio de las líneas de alta presión es de 4,151 kWh/m³.</p>
BOMBA ALTA PRESIÓN BAP	
Marca /Modelo/Tipo	En su mayoría utiliza bombas centrífugas 6x13 DAD-5/6 de la marca Flowserve, pero tiene alguna bomba del tipo segmentada también de la marca Flowserve. También han tenido alguna bomba de la marca KSB.
Potencia (kW)	1375 Kw (La mayoría)
Complejidad de la operación /Averías	No presentan complejidad en la operación aunque como máquinas que son presentaron averías en el cierre mecánico, rodamientos, aros rozantes de los impulsores debido a la calidad del material, corrosión en algunos puntos, fallo por aumento de temperatura en rodamientos.
Mantenimiento	Se realiza una parada anual para hacer el mantenimiento preventivo y el correctivo se hace cada vez que sea necesario.
Servicio técnico (buena respuesta ante repuestos o paradas).	Bueno, los repuestos le llegan en 24- 72 horas (dependiendo del tipo del repuesto), sin embargo el servicio técnico de KSB, era regular.
Estado Actual / Fotos	

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHOS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.

	
BOMBA BOOSTER	
Marca/ Modelo	La mayoría son de la marca Flowserve (segmentads) y una minoría de la marca KSB.
Potencia (kW)	315 kW (la mayoría).
Complejidad de la operación/ Averías	No presentan mucha complejidad y las averías que han tenido son debido al aumento de temperatura en un rodamiento, picaduras por corrosión en algunos puntos, problema en los cojinetes de empujes, desgaste de la bomba en algunos puntos sobre todo en aros rozantes.
Mantenimiento	Reposición de aceite, cambio de retenes, aros rozantes etc.
Servicio técnico (buena respuesta ante repuestos o paradas).	Bueno, los repuestos le llegan en 24- 72 horas (dependiendo del tipo del repuesto), sin embargo el servicio técnico de KSB, era regular.
Estado Actual / Fotos	



RECUPERADOR DE ENERGÍA

Marca /Modelo	Pelton	ERI-PX	DWEER
Complejidad de la operación/ Averías	No presenta complejidad, pero si averías como en el cierre mecánico, rodamientos, aros rozantes de los impulsores debido a la calidad del material, corrosión en algunos puntos.	No presenta complejidad, pero dio problemas por presencia de objetos extraños, ya que se atasca y deja de funcionar ese dispositivo. Afecta a la línea debido a un pequeño aumento de conductividad pero no provoca la parada de la planta.	Si, presenta complejidad de la operación, debido a que durante la instalación dejaron soldaduras mal acabadas. También presento fallos en la bomba de aceite y en la válvula solenoide del sistema hidráulico, por lo que se cambió el sistema de regulación hidráulico por uno eléctrico.
Mantenimiento	Cambio de aceite, cambio de retenes, juntas tóricas y sellos.	Ver que no hay obstrucción dentro de los ERIs, asegurar que el flujo de agua como lubricación es el correcto etc.	Requiere de mantenimiento en los muelles de válvulas de retención, juntas de los pistones y válvulas LINX, picaduras por corrosión, etc.
Servicio técnico	Bueno, los repuestos le llegan en 24- 72 horas (dependiendo del tipo del repuesto).	Bueno, aunque no ha hecho mucho uso del servicio técnico, porque prácticamente no necesita mantenimiento ni se han averiado, solo el ERI-PX que se obstruyó por objetos extraños.	Bueno, los repuestos le llegan en 24- 72 horas (dependiendo del tipo del repuesto).
Estado Actual / Fotos			

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y FIABILIDAD DE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA COMERCIALES BASADOS EN CÁMARAS ISOBÁRICAS INSTALADOS EN CANARIAS Y ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN DE DICHS EQUIPOS AL RÉGIMEN DE OPERACIÓN VARIABLE A DIFERENTES ESCALAS.



MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA

Marca /Modelo	Línea	Tubos en servicio		Membranas existentes con hibridación	
		1º E	2º E	1a E	2a E
	A-1	34	85	(2)SWC4B-LD/ (4)SWC4B MAX	SW30XHR-440i
	B-2	34	85	(2)SWC4B-LD/ (4)SWC4B MAX	(2)SWC4B-LD/ (4)SWC4B MAX
	C-3	70	40	SWC4+	SWC5
	E-4	68	58	SWC(4)4+(2) (5 tub+1 colum SWC3+)	SW30HR-LE400i
	F-5	75	35	(2)SWC4B-LD / (4)SWC4B MAX	SW30XHR-440i
	G-6	75	35	(2)SWC4B-LD / (4)SWC4B MAX	SW30XHR-440i
	H-7	88	58	(1)SW30HR-320/(1)SW30HR34i 370	(4)SW30HRLE400i
	I-8	60	60	(4)SW30XHR-400i/(2)SW30HRLE-400i	(4)SW30XHR-400i (2)SW30HRLE-400i
	K-10	72	40	SWC4B-MAX	SWC4B-MAX
	L-11	70	40	(4)SWC4+ (2)SWC5	SWC5

<p>Estado Actual / Fotos</p>	
<p align="center">INFORMACIÓN GENERAL</p>	
<p>Tipos de recuperadores de energía que conoce.</p>	
<p>ERI PX, R-O kinetic, Turbina Francis y Peltón, ¡Save, Aqualyng, Dweer Calder, Osmorec, Siemag, Turbocharger.</p>	
<p>Tipos de recuperadores de energía con los que ha trabajado en sus instalaciones.</p>	
<p>Turbinas Francias, Pelton , ERI-PX y DWEER.</p>	
<p>Tipos de recuperadores de energía que le han dado mejores resultados y por qué.</p>	
<p>El Eri PX por su modularidad a la hora de aumentar la capacidad de producción, por el momento no ha presentado muchos problemas, requiere de poco espacio y no requiere de mantenimiento.</p>	
<p>Tipos de recuperadores de energía que son más eficientes, robustos, llevan un mejor mantenimiento, menos averías, ciclos de vida, etc. (Opinión personal).</p>	
<p>En su opinión el ERI-PX porque es el sistema de recuperación que no le da muchos problemas y no tienen válvulas ni sistemas de control por lo que es muy autosuficiente.</p>	
<p>Tipos de recuperadores de energía más costosos, rentables y los tiempos de amortización que conllevan.</p>	
<p>No maneja el tema económico, pero supone que el más rentable es el sistema ERI-PX por los consumos específicos que da y debido a que con este sistema se pueden disminuir los costes de mantenimiento de la planta al no requerirlo.</p>	