



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

Programa de doctorado:

TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN E INGENIERÍA COMPUTACIONAL

Título de la Tesis Doctoral:

EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PLANTAS DE DESALINIZACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA DE AGUA DE MAR

Doctorando:

FEDERICO ANTONIO LEÓN ZERPA

LAS PALMAS DE GRAN CANARIA, A 19 DE OCTUBRE DE 2020



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

Programa de doctorado: TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN E INGENIERÍA COMPUTACIONAL
Unidad responsable del programa de doctorado: INSTITUTO UNIVERSITARIO DE SISTEMAS INTELIGENTES Y APLICACIONES NUMÉRICAS EN INGENIERÍA
Título de la Tesis Doctoral: EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PLANTAS DE DESALINIZACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA DE AGUA DE MAR
Doctorando: FEDERICO ANTONIO LEÓN ZERPA
Director: DR. ALEJANDRO RAMOS MARTÍN
LAS PALMAS DE GRAN CANARIA, A 19 DE OCTUBRE DE 2020

EL DIRECTOR

**RAMOS
MARTIN
ALEJAN
DRO -
5283548
5T**

Firmado digitalmente
por RAMOS MARTIN
ALEJANDRO -
52835485T
Nombre de
reconocimiento (DN):
c=ES,
serialNumber=IDCES-52
835485T,
givenName=ALEJANDR
O, sn=RAMOS MARTIN,
cn=RAMOS MARTIN
ALEJANDRO -
52835485T
Fecha: 2020.10.19
11:10:33 +01'00'

DR. ALEJANDRO RAMOS MARTÍN

EL DOCTORANDO

**LEON
ZERPA
FEDERICO
ANTONIO -
52837389H**

Digitally signed
by LEON ZERPA
FEDERICO
ANTONIO -
52837389H
Date:
2020.10.19[®]
10:52:16 +01'00'

FEDERICO ANTONIO LEÓN ZERPA

AGRADECIMIENTOS
A ALEJANDRO MI DIRECTOR,
POR SU APOYO Y DEDICACIÓN

EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PLANTAS DE DESALINIZACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA DE AGUA DE MAR.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. ANTECEDENTES.....	14
1.2. OBJETIVOS.....	20
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	21
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO DE LA DESALINIZACIÓN CON MEMBRANAS POR ÓSMOSIS INVERSA.....	24
2.1. INTRODUCCIÓN.....	24
2.2. ESTADO DEL ARTE DE LA DESALINIZACIÓN.....	25
2.3. MAGNITUDES Y PILOTAJES, CONSUMOS Y COSTES ENERGÉTICOS, HUELLA DEL CARBONO Y HUELLA ECOLÓGICA DE LA DESALINIZACIÓN POR ÓSMOSIS.....	32
2.3.1. MAGNITUDES Y PILOTAJES.....	32
2.3.2. CONSUMOS Y COSTES ENERGÉTICOS	34
2.3.3. HUELLA DEL CARBONO Y HUELLA ECOLÓGICA	34
2.4. CASO ESPECÍFICO DE LAS PLANTAS DESALINIZADORAS DE AGUA DE MAR EN CANARIAS.....	38

CAPÍTULO 3. MODELO Y METODOLOGÍA DE CÁLCULO.....	42
3.1. INTRODUCCIÓN.....	42
3.2. RELACIÓN DEL ENVEJECIMIENTO-PRODUCCIÓN DE PERMEADO.....	44
3.3. METODOLOGÍA PROPUESTA DE CÁLCULO PARA LA CALIDAD DE AGUAS.....	46
3.4. ANÁLISIS GENERAL DE COSTES DE ELEMENTOS Y OPERACIÓN.....	48
3.5. ANÁLISIS GENERAL DEL CONSUMO DE ENERGÍA EN LAS PLANTAS.....	51
3.6. VALORACIÓN MEDIO AMBIENTAL. FACTOR DE EMISIÓN DE CO ₂ (FACTOR MIX)	53
3.7. HUELLA ECOLÓGICA.....	55
3.8. ANÁLISIS POR NÚMERO DE HABITANTE ESPECÍFICO.....	56
3.9. UTILIZACIÓN DE PILOTAJES.....	57
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y APLICACIÓN PRÁCTICA.....	65
4.1. INTRODUCCIÓN.....	65
4.2. RESULTADOS GENERALES PARA EL CASO DE LA PLANTA DESALINIZADORA DEL CANAL DE ALICANTE 1.....	65
4.3. RESULTADOS GENERALES PARA EL CASO DE LA PLANTA DESALINIZADORA DE CARBONERAS.....	77
4.4. ANÁLISIS DE LOS DATOS DEL MIX ENERGÉTICO EN EL CASO DE CANARIAS	92
4.5. EXTENSIÓN DE RESULTADOS EN MEJORAS ENERGÉTICAS A LAS PLANTAS DE AGUA DE MAR DE CANARIAS.....	103
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	129

BIBLIOGRAFÍA.....	134
ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES.....	143
A1.1 INTRODUCCIÓN.....	143
A1.2 DATOS DE PARTIDA.....	143
ANEXO 2. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS Y DIFUSIÓN DE RESULTADOS.....	160
ANEXO 3. CÁLCULOS DE PROYECCIONES EN DISTINTOS ESCENARIOS.....	179

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1. ANTECEDENTES

La desalinización es el proceso para la eliminación de sales del agua del mar o agua salobre, con el objeto de obtener agua potable mediante plantas desalinizadoras.

El agua apta para el consumo humano en el mundo no llega al 1% y el 97,5% es agua de mar o alta salinidad.

El desarrollo de plantas desaladoras para desalinizar el agua de mar se muestra como una solución eficaz para solventar la necesidad de agua apta el consumo en el planeta. De estas instalaciones de desalinización de agua de mar se produce agua tanto para abastecimiento público como para regadío.

Inicialmente el proceso de desalinización de aguas tenía costes muy altos, tanto energética como económicamente, por lo que sólo se utilizaba en menor grado que en la actualidad. La desalinización del agua de mar en las plantas de tratamiento de agua ha evolucionado mucho en los últimos cinco decenios, en los que el proceso de desalinización y su tecnología han cambiado y se han vuelto cada vez más rentables y eficientes. Inicialmente, el proceso de desalinización de agua era un proceso térmico que ha ido cambiando con los avances científicos y tecnológicos hacia un proceso por ósmosis inversa, que domina el mercado actual [1-2].

Para producir una cantidad de agua de una planta de ósmosis inversa, se debe consumir una cantidad de energía eléctrica, y para la generación de esta energía, en una red eléctrica convencional, se emite una cantidad de emisiones en forma de gases que producen efecto invernadero. En relación con la dependencia territorial, las redes eléctricas suelen tener mezclas de energía que provocan mayores emisiones gaseosas, ya que suelen tener sistemas basados en tecnologías de menor rendimiento. Para reducir estas emisiones, es posible proponer la generación de energía eléctrica necesaria para la producción de agua en la misma instalación, a través de sistemas energéticos híbridos. Estos sistemas de energía híbridos pueden estar compuestos por varios tipos de tecnologías, en los que se tiende a integrar la mayor cantidad de energía procedente de fuentes renovables, con el apoyo de un sistema de almacenamiento de energía o de una tecnología convencional.

Los sistemas eléctricos de las islas son bastante diferentes de los sistemas continentales debido a que son sistemas aislados de pequeño tamaño, en el caso del

estudio de las Islas Canarias existen específicamente 6 subsistemas, uno para cada isla, excepto para Fuerteventura y Lanzarote interconectados por un cable de corriente continua, que dificulta el uso correcto de las energías renovables. Gran Canaria y Tenerife son las únicas que cuentan con unidades de vapor y de ciclo combinado, mientras que el resto de las islas se genera a partir de motores diésel. El modelo energético actual entra en conflicto con las exigencias medioambientales transmitidas por la Unión Europea. Entre ellas se encuentran la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en primer lugar, y en segundo lugar el aumento de la presencia de fuentes de energía renovables, en la línea de trabajo de la normativa internacional UNE-EN-ISO 14064 de emisiones de gases que producen efecto invernadero.

Debido a que el sistema de energía eléctrica es diferente en cada isla, se ocasiona que también exista diferencia en el factor de contaminación para la producción de agua. Por esta razón, se realiza una técnica para la estimación de un factor más adecuado a la realidad en cada isla. Una reducción del consumo energético va a repercutir directamente en una mejora medio ambiental por medio de la huella del carbono que producen estas plantas desalinizadoras y de la huella ecológica de las mismas. Del mismo modo, el m³ de agua producido en una isla determinada produce una huella ecológica diferente a la de otra isla, debido a que sus factores de contaminación también lo son.

En la actualidad hay más de cien millones de habitantes que consumen agua desalinizada y un caudal producto diario de casi veinticinco millones de metros cúbicos. En España se instaló la planta desaladora más temprana en 1965, fue situada en Lanzarote (sistema MSF, 2500 m³/día), y actualmente existen cientos de ellas en todo el país [1-2].

El agua consumida a nivel mundial se ha multiplicado por tres en la segunda mitad del siglo XX hasta la actualidad que se abastecen más de 4300000 hm³/año. En total el caudal de agua consumida se multiplicó por 6 a nivel global desde principios a finales del siglo pasado [1].

A causa de que el agua contaminada es también un problema que ocasiona muchas enfermedades y la escasez de agua potable, la ONU fijó como objetivo para la cobertura de saneamiento en un 75% de acceso para la población en todo el mundo, cifra que a día de hoy no se ha alcanzado, pero se ha mejorado, alcanzando un valor del 69% frente al 54% que tenía la población en el año 1990 [1, 2].

Como aportación necesaria para alcanzar este objetivo de la ONU para el acceso al agua potable y de saneamiento de la población, añadido al aumento del consumo de agua en la industria, nos encontramos el proceso de desalinización de aguas de mar y salobres de pozo para cubrir las necesidades.

En España se instaló la primera planta desalinizadora de agua de mar en 1964 en Lanzarote [1], con un sistema de compresión de vapor. El consumo energético era muy elevado, entre 15 y 18 kWh/m³, y su producción de 500 m³/día, por lo que el permeado obtenido tenía un alto coste económico, más de 1,2 EUR/m³.

Las reservas de agua a nivel mundial se están reduciendo debido al crecimiento de la población y al cambio climático. La Universidad de California ratifica todo ello con estudios que demuestran que un tercio de las aguas subterráneas de la Tierra se han agotado entre 2003 y 2013 debido al consumo humano [3-4].

Hasta ahora, en el siglo XXI, los esfuerzos de investigación en la desalinización de agua se han centrado en los avances en las membranas de ósmosis inversa, con mayor superficie y menor consumo de energía, así como en los sistemas de recuperación de energía para recuperar la presión de la salmuera e introducirla en el sistema reduciendo el consumo de energía del proceso de desalinización. Se ha estudiado detalladamente el funcionamiento, mantenimiento y manejo de las membranas por su importancia en el ahorro de energía, mostrando cómo optimizar todos los procesos en los que intervienen para mejorar la eficiencia energética [1-4].

En una planta para el tratamiento de aguas potables el consumo energético está entre 0,1 y 1 kWh/m³ [5-6]. En una planta desaladora por ósmosis inversa (OI) dicho consumo es el mayor coste de operación, siendo éste en torno al 70% de los costes de la explotación [7]. Por tanto, debido a que el consumo de una planta desalinizadora es más elevado en que en una ETAP convencional, se justifican los esfuerzos investigadores en la reducción del mismo. El consumo energético existente en las instalaciones desaladoras de OI tuvo una evolución reciente muy cambiante en los últimos 10-20 años.

De hecho, ha habido un gran salto del paso de las tecnologías térmicas hacia la OI en desalinización de agua de mar, introduciendo tecnologías de membrana de menor consumo pasando de consumos entre 20 y 25 kWh/m³ en 1970 a 4 y 5 kWh/m³ en 2005 [5, 8-9].

Entre los procesos de desalinización de aguas industrialmente más importantes podemos destacar los siguientes:

- Compresión de Vapor (CV) / Destilación Súbita Flash (MSF) / Destilación Multiefecto (MED): (Agua de mar)
 - Consumo Energético 15 – 20 kWh/m³ de agua producida
- Electrodialisis Reversible / EDR: (Agua salobre)
 - Consumo Energético en agua salobre depende de la salinidad de alimentación
- Ósmosis Inversa: (Agua de mar y salobre)
 - Consumo Energético 2,5 - 4 kWh/m³ de agua producida, dependiendo de la salinidad de alimentación

La presión osmótica, fenómeno resultante de la diferencia de concentración de sales a través de una membrana semi-permeable, debe ser compensada antes de poder producir permeado en el sistema.

En la actualidad se ha conseguido reducir el consumo energético en las plantas introduciendo nuevas tecnologías de membranas de bajo consumo energético, mayor superficie de las mismas y con recuperación de la energía de la salmuera hasta llegar a valores inferiores a los 3 kWh/m³. Dicho consumo energético varía en función de distintos parámetros, tales como la temperatura del agua de alimentación, la salinidad de la misma, el envejecimiento de los elementos de OI, etc. Debido a ello, la inclusión o no de bombes de agua de alimentación a la instalación o del permeado a depósitos de agua potable influyen en la variabilidad de estudios y resultados de consumos energéticos publicados. De todas formas, estudios sobre algunas de las mayores plantas desalinizadoras del mercado confirman consumos de entre 3,52 y 4,30 kWh/m³ [10], para plantas de tamaño intermedio de entre 4 y 6 kWh/m³ [11]. Finalmente, artículos más recientes confirman el continuo descenso del consumo energético desde valores de entre 3 y 4 kWh/m³ [12] hasta consumos de 2,5 kWh/m³ [5] en la actualidad.

El ahorro energético lo podemos conseguir también a corto plazo modernizando las plantas desalinizadoras actuales, con recuperadores de energía, que sustituyen a las turbinas francis o pelton de plantas antiguas. De esta manera conseguimos reducir el consumo de la desalinización de agua de mar considerablemente haciéndolo cada vez

más competitivo, que asegure el abastecimiento a la población, ya que el 98% del agua a nivel mundial se encuentra en los océanos y se convierten en fuente prácticamente inagotable reserva de agua para la población [13-15].

Por otro lado, en las Islas Canarias muchas instalaciones turísticas con plantas desaladoras para su propio consumo que pueden introducir todas estas mejoras y repercutir en la economía local de forma considerable desde el punto de vista energético y medioambiental.

En este sentido, se estudia la eficiencia energética de estos sistemas teniendo en cuenta el mix energético actual, las emisiones de CO₂ producidas, la huella ecológica y la concienciación del destinatario [16-17].

Las aplicaciones más significativas de los procesos de desalinización son los siguientes:

- Desalinización de agua de mar para abastecimiento público y regadío.
- Desalinización de agua salobre para abastecimiento público y regadío.
- Desalinización en terciarios de depuración de aguas residuales para regadío.
- Potabilización de aguas para consumo humano.
- Procesos Industriales: Concentrado de glucosa, café, vino, zumo, etc...
- Procesos sanitarios: agua destilada, diálisis, etc...

Todas estas aplicaciones se llevan a cabo con membranas de ósmosis inversa, y el mayor consumo de energía aparece en la desalinización de agua del mar que es objeto de la presente tesis. Dependiendo de cada aplicación hay membranas de ósmosis inversa más adecuadas para cada caso, por lo que debemos realizar una serie de acciones para la toma de decisión sobre la membrana más adecuada asociada a la eficiencia energética de la instalación, principalmente si se trabaja con agua de mar. Por ello debemos disponer de una instrumentación adecuada y hacer pilotajes en cada planta para poder escoger la membrana idónea, ya que es un coste muy alto el que representa el cambio de membranas en una instalación y repercute aún más en la reducción del coste energético de la misma, influenciado directamente por el tipo de membrana escogida, siempre que se cumpla con la calidad requerida de agua producto [16-17].

Se nos plantea el problema del envejecimiento de las membranas en una planta desalinizadora, lo que supone un aumento de la presión de trabajo, y por tanto del consumo energético, un empeoramiento de la calidad y/o disminución del caudal de permeado con el tiempo [16].

En este sentido, el envejecimiento de las membranas y la degradación de las mismas afecta a la producción de agua desalinizada, la calidad de ésta, el rechazo de boro que es muy exigente en la legislación actual vigente en la Unión Europea y de una manera importante al consumo energético de la instalación. Por ello, se debe tener presente la elección adecuada de las membranas para no equivocarse en una inversión tan importante para la planta, que supone un coste muy alto en la misma y las herramientas de toma de decisión son complicadas.

Es importante estudiar los avances tecnológicos en las membranas de ósmosis inversa ya que están en un continuo proceso de I+D+i y cada vez son más las ventajas que nos ofrecen estos modelos de última generación. Actualmente ya se suministran membranas de bajo consumo energético para agua de mar, que mantienen el rechazo de sales y boro necesario para cumplir los requisitos de calidad de agua, y pueden suponer un ahorro muy considerable de costes de operación para la instalación, sobre todo en cuanto al consumo energético de la misma [17-20].

La operación con elementos de OI de alto rechazo a altas presiones de trabajo supone un mayor consumo energético del sistema y por tanto un aumento del coste económico. El coste y la energía requerida en el proceso dependen de la calidad exigida y del tipo de membrana utilizada. El estudio de elementos estándar de OI para una instalación desaladora de agua del mar ayuda a escoger un elemento de ósmosis inversa que disminuya el consumo energético, y por ende los costes operativos de la planta ya que la energía es lo más costoso de la misma. Dentro del coste total de la producción de agua lo que más influye es la energía consumida y el tipo de membrana de ósmosis inversa escogida [16-17].

De esta manera se plantea la cuestión de cambiar las membranas, aunque no hayan llegado al final de su vida útil, si el cambio de las mismas supone una mejora considerable y disminuyen de forma importante los costes energéticos, lo cual hace más rentable cambiar las membranas antes de tiempo que dejarlas operando por un período más. La toma de decisión sobre realizar este cambio o no, incluso antes del final de la vida útil de las membranas, se refleja en los resultados a pequeña escala en un pilotaje insitu, con el agua de alimentación de la planta diferente en cada caso, para hacer después la inversión a gran escala de la planta, una vez se haya comprobado el buen funcionamiento de las membranas y lo positivo del cambio en las mismas, evitando riesgos de equivocarnos en una inversión de tal magnitud. De hecho, existen en el mercado diferentes fabricantes de elementos de OI de agua marina a contrastar, entre

otros los más importantes son Dow Filmtec recientemente absorbida por Dupont, Hydranautics, LG y Toray. Por ello es importante hacer pilotajes, si es posible con distintos modelos de membranas para elegir con certeza sin aventurarnos a una elección potencialmente errónea, y probarlas el tiempo que se considere necesario para tomar la decisión más adecuada sobre el cambio de las mismas [17].

1.2. OBJETIVOS

Se desarrolla un método para la valoración de la eficiencia energética en las plantas desalinizadoras. Se utiliza una serie de dimensiones: energía, huella de carbono, huella ecológica, calidad de agua y pilotajes para evaluar la operación de nuevas membranas u otros elementos de la planta.

Por tanto, se pueden considerar los dos objetivos principales de esta tesis para la toma de decisión de actuaciones asociadas con la Eficiencia Energética.

Objetivo 1: Metodología de análisis de la eficiencia energética de las plantas desalinizadoras, desde el punto de vista de las emisiones producidas, la huella de carbono y ecológica del sistema, donde se desarrolla un modelo para ello.

Se trata de introducir mejoras energéticas en los procesos de OI para plantas desalinizadoras de agua marina que sea válido para cualquier instalación de agua de mar del mundo.

Este estudio puede servir para la toma de decisiones en los procesos relacionados con la mejora de la eficiencia energética en las plantas de ósmosis inversa de agua de mar. Se estudian las mejoras en la desalinización del agua de mar, basadas en la reducción del consumo de energía en la producción de agua dulce. En consecuencia, el proceso de OI es el más adecuado por tener un consumo de energía más bajo por metro cúbico de agua producida, por lo que ocupa una posición privilegiada en el sector.

Mediante el análisis del factor mix de emisiones se puede establecer una metodología de cálculo para el cálculo de la huella de carbono del mix energético en un período de tiempo de referencia, teniendo en cuenta la sumatoria de las energías de cada tecnología y el factor mix de emisiones de cada una de ellas.

Dentro de la metodología propuesta se ha establecido la determinación de la producción de agua por isla en función del factor de emisiones de cada territorio y teniendo en cuenta que se trata de sistemas eléctricos aislados.

El factor de contaminación asociado a la producción de agua es diferente en cada isla debido a que se trata de sistemas eléctricos aislados y el mix energético del sistema de energía eléctrica es distinto. Por ello, se ha establecido una metodología asociada a cada isla.

Objetivo 2: Diseño e implementación de pilotajes en plantas desalinizadoras, de forma sistemática, para evaluar las mejoras energéticas en los procesos de desalinización de aguas.

En este sentido, se propone la realización de pilotajes a medida según la situación para la toma de decisión acertada y la ejecución de la inversión con el mínimo riesgo. Por ello se lleva a cabo en estos pilotajes una valoración del Boro, calidad de aguas, un análisis diagnóstico de la energía, huella del carbono, huella ecológica, sostenibilidad ambiental y costes de operación y mantenimiento.

El envejecimiento de las membranas es un factor decisivo con respecto a la energía que se consume en la planta, al caudal de agua permeada y a las emisiones producidas. Por ello, se establece una metodología de estudio para tomar decisiones sobre ello.

La toma de decisión del cambio de membranas es muy importante para la vida útil de las instalaciones y se deben tener en cuenta múltiples variables para ello, tales como la presión de trabajo, la calidad del agua de alimentación y de permeado del sistema de ósmosis inversa, la conversión, la temperatura, etc.

Con la introducción de membranas de última generación de bajo consumo energético y alto rechazo de sales podemos producir agua con la calidad requerida en condiciones más eficientes y sostenibles que con membranas estándar.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La estructura esta tesis es la que se muestra a continuación:

Capítulo 2 – “MARCO TEÓRICO DE LA DESALINIZACIÓN CON MEMBRANAS POR ÓSMOSIS INVERSA” se hace una introducción del capítulo, seguidamente se describe el estado del arte de la desalinización, se desarrollan los principales parámetros para el funcionamiento, mantenimiento y manipulación de membranas.

Capítulo 3 –“MODELO Y METODOLOGÍA DE CÁLCULO” en primer lugar una introducción del mismo, se muestran los datos de partida, la descripción del modelo, metodología de cálculo y simulación de membranas de ósmosis inversa utilizadas.

Capítulo 4 – “RESULTADOS Y APLICACIÓN PRÁCTICA” breve introducción, simulación de los distintos escenarios previstos junto con los resultados obtenidos y experiencias prácticas de lo establecido en el modelo.

Capítulo 5 – “CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS” sintetiza las conclusiones de este trabajo de investigación, al igual que las ventajas que tienen las aportaciones realizadas, así como las líneas futuras.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO DE LA DESALINIZACIÓN CON MEMBRANAS POR ÓSMOSIS INVERSA

2.1. INTRODUCCIÓN

La desalinización de agua marina en plantas potabilizadoras ha evolucionado mucho en las últimas cinco décadas, en las cuales ha cambiado el proceso de desalinización y su tecnología siendo cada vez más rentable y eficiente. Inicialmente el proceso de desalación de aguas era un proceso térmico que ha ido cambiando con los avances científicos tecnológicos hacia un proceso por ósmosis inversa que domina el mercado actual.

En primer lugar, mostramos en este capítulo el estado del arte de la desalinización de aguas y la evolución que ha tenido desde el ámbito regional canario hasta el nacional e internacional, por medio de distintos procesos como son la Compresión de Vapor (CV), Destilación Multiefecto (MSF), Destilación Multietapa (MED) y la ósmosis inversa que significa en la actualidad el 65% del total.

El objetivo primordial de las mejoras estudiadas en la desalación de agua de mar se basa en la reducción del consumo energético en la producción agua dulce. En consecuencia, la ósmosis inversa es el proceso más adecuado debido a su menor consumo energético por cada metro cúbico de agua producto, por lo que ocupa una posición de privilegio en el sector. En lo que llevamos de siglo XXI los esfuerzos de investigación en la desalinización de aguas se han centrado en el avance en las membranas de ósmosis inversa, de mayor superficie y menor consumo energético, al igual que en los intercambiadores de presión como recuperadores de la energía de presión de la salmuera o rechazo del proceso de desalinización de aguas.

Más adelante estudiamos el funcionamiento, mantenimiento y manipulación de las membranas en detalle, debido a la importancia de éstas en el ahorro energético, mostrando cómo optimizar todos los procesos donde se vean involucradas con el objetivo de mejorar de forma continua la eficiencia de las mismas.

Del mismo modo analizaremos datos de diferentes plantas desalinizadoras de agua de mar, todas ellas visitadas, tomando datos en muchos casos de miles de horas de operación. Hemos desarrollado técnicas para la mejora energética en las membranas de las plantas desalinizadoras de agua de mar cumpliendo estrictamente los requisitos de calidad de agua según las normas nacionales e incluso internacionales como la OMS.

Se han tenido en cuenta todos estos avances para este trabajo de investigación, haciendo uso de los parámetros necesarios actualmente vigentes.

La eficiencia energética en las plantas desalinizadoras está ligada directamente a la calidad de agua permeada exigida. En este caso en España según el Real Decreto 140/2003, para aguas potables, el Boro es el cuello de botella de todos los iones ya que se pide que sea inferior a 1 ppm lo cual exige o un segundo paso, es decir prácticamente duplicar la planta en número de membranas si el segundo paso es total volviendo a pasar el permeado por una nueva ósmosis inversa de afino, lo cual resulta muy costoso, o trabajar con membranas de alto rechazo en un solo paso pero con presiones más altas, por tanto consumiendo más energía cuyo coste también es de los más significativos de los costes variables de la instalación.

La OMS sin embargo es más flexible con las exigencias del Boro para aguas potables y permite 2,4 ppm como máximo. Esta regulación internacional es la que se sigue en muchos países del mundo donde la Desalinización de aguas es muy importante y entre otros podemos comentar Chile donde los diseños de planta consumen menos energía porque se trabaja a presiones inferiores ya que el Boro no tiene que ser inferior a 1 ppm sino inferior a 2,4 ppm; o en otras zonas del planeta como el norte de África, Oriente Medio, etc., donde también se están adaptando a esta normativa.

Por ello, nos sirve como estudio de referencia las membranas utilizadas en la Planta Desalinizadora del Canal de Alicante 1 donde en unos trenes trabajamos con una membrana de menor consumo energético para estar por debajo de los 2,4 ppm y en otros trenes tenemos una membrana de mayor rechazo para estar por debajo de 1 ppm en el permeado. En la actualidad, los elementos convencionales de OI para agua marina y de alto rechazo de boro llegan a un corte del 96% a pH 8 (considerando 5 mg/l de Boro en la alimentación) y una media de aproximadamente un 99,86% en rechazo de sales. Esto nos ayuda a ver los dos escenarios posibles, el actual para estar por debajo de 1 ppm de Boro en el agua producto o posiblemente el futuro que se pretende cambiar según fuentes ministeriales a partir del 2020 a 2,4 ppm de Boro y trabajar con menores consumos energéticos.

2.2. ESTADO DEL ARTE DE LA DESALINIZACIÓN

La desalinización de aguas aparece por primera vez en el año 1500 a.c., en el viejo testamento (Vetus, M. Dc XXVIII – Éxodo) y en otros libros como los de Thales de Mileto (640-546 A.C) y Aristóteles (384-322 A.C.) [18-19].

Las primeras desalinizadoras industriales se instalaron a mitad del siglo XX (1950) en Oriente Medio (Kuwait) con un proceso de destilación y caudal producto de 450 m³/d; posteriormente en 1960 y 1962, se construyen dos desalinizadoras en EE.UU., la primera de ellas en Tejas mediante un proceso MED y caudal producto 3785 m³/d y la segunda por EDR en Dakota del Sur para una producción de 950 m³/d. En 1963 también en EE.UU. se construyó otra desalinizadora mediante compresión de vapor en Nuevo Méjico. Al mismo tiempo en Florida, se estudió el funcionamiento una planta desalinizadora de aguas por congelación, aunque fue inviable económicamente [20]. Finalmente, en las islas Bermudas se lleva a cabo la primera planta desalinizadora por ósmosis inversa para un caudal de 40 m³/d [21].

En 1964, mediante un sistema MSF en Lanzarote se construye la primera desalinizadora europea para un caudal de 2300 m³/d, mientras que por ósmosis inversa fue también en Canarias, en este caso en Fuerteventura, donde se lleva a cabo la primera desalinizadora de agua salobre en 1979 para producir 80 m³/d; y la primera de ósmosis inversa de agua de mar fue en Lanzarote en 1983 con 500 m³/d de producción [22]. Desde entonces la desalinización de agua de mar por ósmosis inversa ha ido creciendo hasta la actualidad donde hay plantas con la Desalinizadora de Magtaa en Argelia con capacidad de 500000 m³/d [23] llegando a una producción mundial en continuo ascenso en las últimas 3 décadas de más de 86,5 hm³/d [24]. España ha seguido el mismo crecimiento desde el año 2000, pasando de producir 1,2 hm³/d hasta 2,8 hm³/d, después del Plan Agua del Gobierno de España donde se construyeron 21 plantas en el Mediterráneo, siendo nuestro país uno de los de mayor capacidad de agua desalinizada de agua de mar por ósmosis inversa de todo el mundo [25].

El proceso MSF es aquel donde calentamos el agua de alimentación a la planta a baja presión para provocar una evaporación rápida de la misma, repitiendo todo ello en varias etapas a la vez que disminuye a la presión [22-24].

En el proceso MED se realiza una evaporación del agua de mar sobre los tubos en un evaporador que dispone de diversos efectos operando a presiones y temperaturas que van decreciendo en el tiempo, hasta que comienza de nuevo el proceso [22-24].

De esta manera, en el siglo XXI, la ósmosis inversa desbanca a los procesos MSF, MED y Compresión de Vapor (CV) superando su capacidad a la de todos ellos [23, 26-27] salvo en países como en Oriente Medio donde el coste energético es menor; copando la ósmosis inversa el 65% de la producción mundial.

En el siglo XVIII, JA Nollet, realiza unos estudios preliminares de ósmosis con un diafragma [28], hasta llegar a la teoría de Donnan en 1911 referente al equilibrio de membrana con electrolitos [29] y ya en los años 60 se produce la fabricación de las primeras membranas comerciales para ósmosis inversa con acetato de celulosa por medio de Loeb y Sourirajan [30]. En la actualidad existen múltiples marcas de membrana, pero por encima del 80% de las plantas desalinizadoras de agua de mar tiene membranas de Dow, Toray, Hydranautics o LG [31]. Estas membranas se componen de una capa superior fina, una intermedia activa y un sustrato inferior más resistente [32], y permiten desarrollarse variando su morfología en función del rechazo de sales, flujo de permeado deseado y demás [33-35]. Las membranas más utilizadas son de 8" de diámetro, aunque existen ya membranas de diámetro 16" y longitud 40", con lo se reduce considerablemente el número de éstas y se compacta el sistema, aunque los costes y la necesidad de maquinaria específica para su manejo hacen que todavía en plantas pequeñas y medianas las membranas utilizadas actualmente sean de 8" de diámetro x 40" de longitud [36].

Sin embargo, en plantas grandes como la de Sorek construida en 2013 en Israel, con capacidad de 624000 m³/d [37] y la de Busan en Corea del Sur con caudal de permeado de 45460 m³/d sí tienen membranas de 16" [38]. En cuanto a la superficie de la membrana se ha aumentado de 370-380 pies cuadrados de superficie en las membranas comerciales hasta 400 pies cuadrados [39] y actualmente un máximo de 440 pies cuadrados en un mismo elemento de 8" de diámetro y 40" de largo. En cuanto a rechazo de sales en las membranas de ósmosis inversa también se ha ido superando los valores iniciales de 99,1% hasta 99,8% a día de hoy [40-44]. Por último, referente al caudal de permeado de membranas para agua de mar, partiendo de valores de 9900 gpd [40], en este momento ya en 12000 y 17000 gpd [41-43]. De esta manera vemos la evolución de las membranas a lo largo del tiempo según sus diferentes variables hasta la actualidad [40, 46-47].

Además, recientemente se están mejorando algunas membranas con la introducción de nanopartículas de zeolita [48-50] que aumentan la producción de éstas y consecuentemente disminuyen el consumo energético de las mismas. El inconveniente es que todavía no existen muchas referencias a largo plazo en plantas grandes con estas membranas por lo que no sabemos su evolución exacta con el tiempo, pero están dando buenos resultados [51-53].

Del mismo modo, los sistemas híbridos de membranas pueden ayudar a optimizar el diseño con diferentes tipos de membranas un mismo tubo de presión de distinta

superficie, con el objeto de alcanzar un flujo equilibrado, continuo y menor ensuciamiento en las primeras membranas, operando a presiones diferentes y obteniendo calidades diferentes [54-55].

Igualmente, en los últimos años ha habido una evolución en los sistemas de recuperación energética, mejorando el rendimiento y el consumo de energía de éstos, destacando los principales sistemas siguientes: Bombas inversas, turbinas Francis y turbinas de contrapresión [22]; Turbinas Pelton, Turbochargers e Intercambiadores de presión [56-60].

Los rendimientos de estos elementos van desde el 70% de las turbinas Francis aumentado respectivamente hasta el 95 y el 98% de los intercambiadores de presión principales DWEER y ERI, aunque también existen otros como el Osmorec, RO Kinetic o Aqualing. En estos casos la energía de la salmuera empuja el agua de alimentación bien por contacto directo o mediante un pistón por lo que en algunos casos se produce mezcla de salmuera y alimentación que varía del 0% al 6% según el suministrador del equipo [9, 61-67].

En cuanto a la calidad de aguas la desalinización en España juega un papel importante. Alrededor de 106 hectómetros cúbicos fueron desalinizados en España en 2010, cerca del 3% de la demanda total de agua. Hay algunas regiones en España, donde el agua desalada es clave para el suministro y el riego siendo muy importante la calidad de aguas. Las islas Canarias y Valencia son buenos ejemplos, donde la capacidad de producción de agua desalada alcanza el 38% y el 14% del país respectivamente.

Con respecto a dicha calidad de agua producida para cumplir requisitos de agua potable, debemos cumplir la Normativa Española para agua de consumo humano [66], la norma europea de aguas potbles [67] y la Guía de la OMS para la calidad de agua potable [23, 68], donde como más significativo se destaca que la conductividad debe ser inferior a 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, unos 1250 mg/l [69], Cloruros menores de 250 mg/l y Sodio inferior a 200 mg/l. La normativa europea y española requieren también un valor de Boro en el permeado inferior a 1 mg/l sin embargo la OMS solo exige que éste sea inferior a 2,4 mg/l [68, 70].

Por tanto, un problema importante en la desalación de ósmosis inversa de agua marina (SWRO) es el rechazo de boro y como se ha comentado anteriormente la OMS estableció una cantidad de este elemento de 2,4 mg/L como límite para el agua potable en 2011, pero la UE todavía tiene una concentración de 1,0 mg/L como límite. Por consiguiente, la legislación española fijó un límite para la concentración de boro de 1,0

mg/L para el agua potable. Esta restricción se ha convertido en una de las cuestiones más difíciles que el fabricante de la membrana ha tenido que afrontar. Los efectos del boro pueden producir problemas de salud para los seres humanos.

En el agua de mar, el boro está generalmente presente como ácido bórico (H_3BO_3), un ácido débil cuya disociación depende del logaritmo negativo de la constante de disociación ácida (pK_a). El rechazo de especies por membranas de ósmosis inversa (RO) depende principalmente de sus cargas. El estado iónico del boro depende fuertemente del pH, por lo que su rechazo también depende del pH del agua de alimentación.

En la última década han sido propuestos muchos procesos de separación en adición del RO para conseguir una mayor eliminación de Boro de soluciones acuosas. Procesos tales como intercambio de iones, electrocoagulación, absorción o procesos híbridos. Post-tratamientos como el intercambio de iones o un segundo pase con ajuste de pH aumentan el coste específico entre 0,04 y 0,09 €/m³. Es posible establecer una concentración de Boro adecuada en el permeado con solo un pase. El control del pH es el principal problema debido a su relación con el ajuste y depuración del Boro, a pesar del uso de condiciones de trabajo y membranas apropiadas.

Los fabricantes de membranas proveen el rechazo de Boro en condiciones estándar. Las cuales están normalmente alejadas de las condiciones reales de trabajo, así como de la ratio de rechazo del Boro. La evaluación del efecto de los parámetros principales de trabajo tales como temperatura (T), presión (p), concentración (C) y pH en el rechazo del Boro es esencial en las plantas SWRO de desalinización a gran escala. Hoon Hyung et al. desarrolló un modelo predictivo mecánico para el rechazo del Boro. Probaron seis membranas SWRO comerciales en condiciones variables de pH, T y p manteniendo la concentración de alimentación (C_{fb}) constante. Obtuvieron el coeficiente de dependencia de la temperatura de la permeabilidad del Boro (B_b) en iones de ácido bórico y borato. Seung-Hyeon Moon et propusieron una herramienta computacional para predecir el transporte de Boro a través de membranas RO usando el modelo de solución-difusión. Separaron el transporte de Boro como ácido bórico y como metaborato centrándose en el pH y la constante de disociación de ácido (pK_a). Otros autores también han trabajado en el modelado del rechazo del Boro, pero únicamente considerando el coeficiente de dependencia de la permeabilidad del Boro. Este trabajo busca proponer un modelo predictivo para el B_b como ácido bórico en función del coeficiente de permeabilidad del Boro a condiciones iniciales (B_{b0}), T, p_f , C y tiempo de trabajo (t).

Hay varios métodos donde poder usar la energía solar para desalinizar agua, se ha elegido explicar el caso de la destilación por colectores, que, aunque tiene un coste de energía cero y poca inversión no es muy rentable debido a la baja producción por metro cuadrado de esta planta, es decir, requiere de mucha superficie de instalación junto con un clima adecuado [71-74].

Esta técnica en un principio fue pensada para ser usada por marineros que trabajaban en climas fríos para poder tener agua dulce a bordo. Se dieron cuenta que cuando el agua de mar se congelaba, todas las impurezas, incluidas la sal, se concentraban en el centro del bloque de hielo, y que el exterior estaba compuesto por agua de gran pureza. Por ello, deshelandolo solo la capa externa del bloque congelado ellos podían tener agua para consumo humano sin necesidad de reponer en alguna fuente de suministro. En el proceso donde se realiza la congelación las sales que están disueltas son excluidas en la formación de cristales y consecuentemente se separa el hielo de la salmuera. Sin embargo, el hielo naturalmente congelado contiene bolsillos de salmuera, por ejemplo: el agua salina atrapada en el hielo durante el proceso de congelación, lo cual quiere decir, que el hielo obtenido de agua de mar es más puro que el agua de mar, pero no es agua dulce en su totalidad. Una solución que contiene metileno (tinte azul) fue congelada en un vaso metálico unas dos horas en un congelador estándar. El proceso si es lento consigue una separación muy buena del tinte y el agua. Prácticamente toda el agua pura es obtenida en el borde del bloque de hielo, mientras que el concentrado es obtenido en medio. Esta solución del centro puede ser drenada hacia el exterior para dejar el hielo mucho más puro. Sin embargo, como se observa el hielo con el agua pura también arrastra levemente parte del tinte.

Así pues, para obtener un producto más puro de agua, los bolsillos de tinte arrastrados tienen que ser eliminados lavando el hielo y después el hielo puede ser derretido para obtener el agua producto. Este experimento simple ilustra los tres procesos principales requeridos en cualquier proceso de separación por congelación. Estos pasos son: formación de hielo por eliminación de calor, separación de la salmuera del hielo y fusión del hielo [75-76].

Se muestran los componentes básicos de todos los procesos de desalinización por congelación. El congelador es un depósito de algún tipo donde se forman los cristales de hielo.

Esta es la parte principal del proceso y define el tipo de proceso de congelación que es realizado. Una vez que los cristales se han formado, la mezcla de salmuera y hielo es transferida a una unidad de separación de hielo. Aquí los cristales de hielo y salmuera

se separan, por lo general la unidad utilizada para ello está compuesta por una prensa, drenaje por gravedad, una centrifugadora y un filtro o columna de lavado. Muy a menudo esta unidad se usa también como unidad de lavado, donde se limpia el agua que se utiliza para eliminar la salmuera arrastrada con los cristales del hielo. La unidad final es la unidad donde se derriten los cristales y se obtiene el agua producto. La recuperación de energía es una parte importante del proceso y la unidad donde se derriten los cristales es donde esta energía puede ser recuperada. Se han revisado la mayoría de los procesos de congelación, los cuales se han clasificado basándose en el proceso de congelación utilizado, los cuales pueden ser: 1) congelación por contacto directo, 2) congelación por vacío, 3) congelación por contacto indirecto y 4) separación eutéctica [76-78].

La destilación por membranas es el proceso conocido como “Membrane Distillation” (MD, a partir de ahora) en terminología inglesa, es una tecnología emergente que difiere de otras tecnologías de membranas en que lo que produce la desalinización es la diferencia de presión en la membrana. Las membranas para MD son hidrofóbicas, lo que hace factible el paso del vapor, aunque no permite el del agua en estado líquido. El gradiente de presión se produce al aumentar la temperatura del agua de alimentación, con lo que también aumenta la presión de vapor. El mayor requerimiento energético es el de energía térmica de baja temperatura (inferior a 90°C), [74].

Aunque la MD fue patentada en 1963, desde un punto de vista comercial aún no está implantada, debido a que necesita un mayor requerimiento energético que la ósmosis inversa, la destilación súbita flash (MSF) y la multiefecto (MED); y también debido al efecto “wetting” o penetración de impurezas en los poros que sufren las membranas, que forman depósitos que contaminan la superficie de los elementos de OI y dificultan el paso del vapor, perdiendo las membranas su capacidad de separación. Es una tecnología destinada para pequeños suministros, poblaciones aisladas y sistemas autónomos, idónea para su integración con sistemas solares térmicos de baja-media temperatura, pero al no estar comercializada los costes de inversión son elevados [74].

El proceso de OI es predominante en nuestro país con respecto a otras tecnologías, en concreto en la comunidad autónoma de Canarias es del orden del 89%, principalmente por su menor consumo energético, porque tiene mayor facilidad ante una posible ampliación de la planta en el futuro si la demanda aumenta y también porque la inversión inicial es menor que en las tecnologías de destilación. Teniendo en cuenta la importancia de este sistema de desalinización y teniendo en cuenta que la ubicación donde se centra nuestro estudio es la Isla de Gran Canaria y en ella casi la totalidad de plantas tienen

instalada OI, por lo que en el próximo capítulo ampliaremos la información de la ósmosis inversa, dando un mayor número de detalles al respecto [79-85].

Para el estudio del dimensionamiento de la huella de CO₂ en la desalinización para la disminución de lo G.E.I., se ha tomado como referencia una planta de gran producción, es decir, de más de 10000 m³/día de agua desalinizada. Una vez dentro de las plantas de mayor producción, se ve claramente como las plantas de 15000 m³ son las más comunes en el grupo, por esa razón se prevé trabajar con alguna de ella: Bocabarrando Agragua, Arucas-Moya o Salinetas.

2.3. MAGNITUDES Y PILOTAJES, CONSUMOS Y COSTES ENERGÉTICOS, HUELLA DEL CARBONO Y ECOLÓGICA DE LA DESALINIZACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA

En esta sección se desarrolla el marco teórico de las magnitudes principales a tener en cuenta en los procesos de desalinización de aguas en plantas de ósmosis inversa. Entre ellas se pueden destacar el caudal de permeado, que nos indica la producción nominal de la planta a que queremos llegar para abastecer una demanda de agua determinada, y la calidad de agua permeada o el rechazo de sales adecuado para cada aplicación bien sea agua potable, para regadío o industrial.

Otros parámetros como la presión de trabajo, la temperatura o la salinidad de alimentación son también importantes porque en función de ellos se tendrá un determinado consumo energético y consecuentemente unos costes derivados de los mismos, además de una influencia definitiva en la calidad de agua producida. Por ejemplo, una mayor salinidad de alimentación incrementa la presión de trabajo, los costes de operación y puede empeorar la calidad de agua obtenida. La temperatura del agua de alimentación es inversamente proporcional al consumo energético, cuanto menor sea ésta mayor será el coste de producción de agua y en consecuencia la presión de trabajo.

Del mismo modo, se hará una propuesta de análisis para las Islas Canarias de estas magnitudes de trabajo, consumos y costes energéticos, al igual que para la huella de carbono y huella ecológica.

2.3.1. MAGNITUDES Y PILOTAJES

Las dos magnitudes más importantes para describir el rendimiento de separación en los procesos de ósmosis inversa son el caudal de permeado y el rechazo de sales. Ambas

magnitudes se ven influenciadas principalmente por los siguientes parámetros: presión, temperatura, conversión y concentración de sales en la alimentación.

A continuación, se muestra por separado la influencia teórica de cada uno de los parámetros sobre el caudal del permeado, Q_p y el coeficiente de rechazo, R (factor de rechazo de sales). Para ello, cada uno de los otros tres parámetros se considerará como valor constante. En la práctica este no es el caso, ya que generalmente se superponen dos o más efectos.

Presión

El caudal del permeado aumenta con un aumento de la presión de alimentación. Sin embargo, la concentración de la sales, en el permeado, se ve reducida con el incremento de la presión de alimentación. Esto corresponde a un aumento del coeficiente de rechazo.

Temperatura

La temperatura es otro factor muy importante porque afecta directamente a la operación del sistema de OI. Cuando la temperatura baja se produce una disminución en el caudal de permeado y al contrario cuando la temperatura sube hay un aumento en la producción de agua permeada. El coeficiente de rechazo, R , sin embargo, disminuye con un aumento de la temperatura. Esto significa que por la membrana pasan más sustancias disueltas.

Pilotajes

La realización de pilotajes con membranas de ósmosis inversa de última generación en grandes plantas desalinizadoras es cada vez más común, ya que se experimenta a pequeña escala la operación de membranas de nueva generación con un mejor rechazo de sales y menor consumo energético, buscando la mejora calidad de agua necesaria para cada caso al menor coste posible.

De esta manera se están realizando pilotajes antes de la toma de decisiones de cambiar o no las membranas de ósmosis inversa, ya que representa una inversión importante y minimizamos el riesgo de equivocarnos para asegurarnos los mejores resultados en consumo energético, costes de operación y en cuanto a aminorar el impacto medioambiental cumpliendo con la calidad de aguas exigida [16-17].

2.3.2. CONSUMOS Y COSTES ENERGÉTICOS

En este apartado se plantea la necesidad de establecer dos variables distintas. Por un lado se tiene el coste derivado de la energía eléctrica por kWh que se consume, en función del mercado y de las instalaciones de la desaladora, y por otro lado el consumo de energía por metro cúbico de agua producto en kWh/m³. En función de estos parámetros se puede calcular el precio por metro cúbico de agua producto de la desaladora.

El consumo de energía de la planta desalinizadora proviene principalmente de la bomba de alta presión, la bomba de captación de agua de mar, bombeos intermedios y de distribución de agua potable.

Han aumentado las eficiencias de los sistemas de bombeo y la de los recuperadores de energía, por lo que los consumos actuales en las nuevas plantas se ven reducidos constantemente.

Los consumos energéticos se valoran en kWh/m³ de agua producida. La determinación de estos coeficientes energéticos se realiza conforme al siguiente procedimiento:

El coeficiente energético, al depender de la altura neta y en consecuencia de las pérdidas de carga, puede variar apreciablemente con el caudal transportado en la conducción. Por ello, habrá que tener en cuenta en cada caso estas pérdidas y calcular como afectan al consumo energético final por este concepto. Así pues, el consumo energético del bombeo de transporte presenta una casuística muy diversa, por lo que es de difícil determinación y escapa a los objetivos de esta tesis doctoral, aunque en el epígrafe 3.4 se expone una estimación aproximada del coste que supone este consumo de energía.

2.3.3. HUELLA DEL CARBONO Y HUELLA ECOLÓGICA

Se define la huella del carbono como «la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto». A continuación, detallaremos los distintos conceptos necesarios para entender el concepto de huella de carbono [93, 94, 97].

- **Gas de efecto invernadero** : es un gas que se encuentra en la atmósfera y su radiación se emite dentro del rango infrarrojo. Esta es la causa de que se produzca el efecto invernadero. En el tratamiento de aguas desalinizadas, los gases de invernadero más preocupantes son los de la combustión del fuel-oil

para la producción de la energía consumida, es decir, el CO₂, CO, NO_x y derivados del azufre. Otros gases de invernadero que se incluyen en los métodos estándar para la contabilización de las emisiones de gases de efecto invernadero son el SF₆, los HFC y los PFC. Así también el vapor de agua emitido en la estratosfera (por los aviones) [98-99].

- **Potencial del calentamiento global:** Se trata del calentamiento que se produce a lo largo del tiempo que se lleva a cabo en este momento una liberación momentánea de 1kg de un gas de efecto invernadero comparándolo con el que ocasionaría el CO₂. A continuación se muestran los diferentes efectos de los gases en la tabla 2.1.

G.E.I.	Fórmula	GWP	Tiempo de permanencia
Dióxido de Carbono	CO ₂	1	100 años
Metano	CH ₄	25	14 años
Dióxido de Nitrógeno	N ₂ O	298	120 años
Hidrofluorocarburos	C _n H _m F _p	124 a 14800	30 y 300 años
Perfluorocarburos	C _n F _{2n+2}	7390 a 12200	Varios miles de años
Clorofluorocarburos	C _n Cl _m F _p	4750 a 14400	1000 años
Hexafluoruro de azufre	SF ₆	22800	Varios miles de años

Tabla 2.1. Efectos de los gases

- **Emisiones de carbono:** Puede ser utilizado como sinónimo de la huella de carbono. También se puede utilizar para describir las partes componentes de la huella de carbono de los gases individuales (por ejemplo, la emisión de carbono del óxido nitroso), o diferentes elementos dentro de la huella de carbono.
- **CO₂ equivalente (unidad de medida):** Las emisiones de los gases de efecto invernadero se expresan kg equivalente de CO₂ (kg eq. CO₂) o en kg equivalente de Carbono (kg eq. C). La conversión entre el carbono (C) y el dióxido de carbono (CO₂) se basa en la relación entre las masas. La masa del CO₂ es 12 + 16 + 16 = 44 g/mol y la masa del Carbono es 12 g/mol. Por lo tanto, tenemos que 1 kg eq.C= 44/12 Kg eq. CO₂ o 1 kg eq. CO₂= 12/44 eq.C. Así, 1 kg de C= 44/12 = 3,67 kg de CO₂
- **Análisis de Ciclo de Vida (ACV):** El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) o “Ecobalance” es una evaluación medioambiental multicriterio de un servicio, producto o proceso durante toda vida útil (desde su diseño hasta su destrucción, “de la cuna a la tumba”). Es decir que, para cada fase del ciclo de vida (fabricación, transformación, utilización y destrucción) se calculan sus impactos. El ACV es una herramienta de ayuda a la toma de decisiones normaliza (serie

de Normas ISO 14040). Según la ISO, se trata de la “Compilación y evaluación de los consumos de energía, de la utilización de materias primas y de las emisiones al medio ambiente, así como la evaluación de los impactos medioambientales potenciales asociados con un producto, proceso o servicio durante toda su vida útil”

- **Mix energético:** Reparto y ponderación de las diferentes fuentes de energía (energía fósil, nuclear, renovable) necesarias para dar respuesta a las necesidades de una entidad determinada (país, empresa...)
- **Huella ecológica:** Se trata de un índice que se refiere a una demanda específica de la naturaleza de una organización o población. Es decir, la huella ecológica de una población determinada es el área de medio natural necesaria para producir los recursos que consume y absorber los desechos que genera. Cuando el área necesaria es superior al área ocupada por dicha población se deduce que existe un déficit en el que se consumen más recursos de los que de forma natural se pueden producir y se generan más residuos de los que de forma natural se pueden absorber.

Se ha realizado también una revisión de los procedimientos actuales para afrontar el cálculo de la huella ecológica (HE) de las plantas desalinizadoras, cuya concepción se refiere principalmente al cálculo en ámbitos territoriales (países, ciudades, etc.), si bien se considera desde un origen la aplicación en el ámbito de las empresas o centros de producción.

La huella ecológica permite conocer cuanta capacidad biológica del planeta es requerida por una determinada población humana, en relación a sus consumos de recursos, producción de bienes y provisión de servicios. Es por esto que el método desarrollado en la actualidad consiste en esencia en determinar la cantidad de terreno biológicamente productivo que es requerido para producir lo que la referida población consume y para absorber los residuos que la misma genera.

Se puede considerar que la componente de carbono de la huella ecológica, denominada también huella de carbono, en contraprestación al concepto “Huella de Carbono” a secas, aporta una mejor comprensión de la situación descrita al utilizar unidades físicas de hectáreas equivalentes frente a las referidas unidades de toneladas de un material en estado gaseoso. Esto último de muy difícil comprensión para los seres humanos. No obstante, una interesante discusión al respecto de estos dos conceptos fue desarrollada

por la universidad de Santiago de Compostela en su documento sobre la utilidad de la huella de carbono y ecológica [90].

Con el fin de adquirir la capacidad de evaluar los resultados de aplicación de la presente propuesta metodológica, es preceptivo incluir algunos datos de referencia de carácter absoluto que ayuden a comprender con facilidad la utilidad del indicador HE y sus escalas.

Se ha planteado profundizar en los datos a escala global (internacional), nacional y en concreto para la comunidad autónoma de Canarias. Se aprovechará también para contrastar los valores de los tres ámbitos para así disponer de capacidad de evaluación ante los resultados de la aplicación de la propuesta metodológica objeto de este documento.

La huella ecológica de la demanda de la humanidad a nivel mundial en el año 1961 fue estimada en 0,7 planetas y su cálculo actualizado al año 2008 dio como resultado el valor de 1,5 planetas. Es decir, en menos de 50 años el valor se ha duplicado y además ha superado la barrera de lo sostenible. Esta situación se ve agravada por la eclosión de nuevas industrializaciones en países emergentes [91]. En este contexto los países del G20 para el año 2015 que ocupan una superficie muy significativa del globo terrestre y se definen como la plataforma premier para los retos de la economía y finanzas globales, presididos por Turquía, en su agenda de 2015 han presentado entre sus tres pilares de actuación el denominado "Buttressing Sustainability". [92]

En cuanto a la huella ecológica de España son varias, aunque no muchas, las referencias que existen relacionadas con el cálculo de la huella ecológica en territorio español o sus comunidades [91-92], si bien la principal fue promovida por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino del Gobierno de España en el año 2008 [93] donde se aborda el cálculo para todo el territorio español organizado por comunidades.

Como se explica en el caso de la HE de Andalucía [94], uno de los principales retos para el correcto abordaje del cálculo estriba en la calidad de los datos existentes. Normalmente los grandes ámbitos territoriales (p.ej: países) disponen de cantidad y calidad de datos mientras que los casos de ámbitos más pequeños, como ciudades o poblaciones, disponen de menos recursos a este respecto.

En referencia al indicado estudio para España, se obtiene que la huella ecológica por habitante en el año 2005 se sitúa en 6,4 hectáreas globales de territorio productivo anual. Entre los años 1995 y 2005 ha existido un aumento del 19% con un ritmo de aumento de 0,1 hectáreas al año.

La HE es un indicador que nace con vocación territorial si bien desde su concepción se contempla su aplicación a cualquier ámbito. Desde su aparición en 1996 han sido múltiples sus aplicaciones presentes en un importante número de publicaciones científicas de reconocido prestigio.

Subvenciones para la diversificación y ahorro de energía

Además, desde el Ministerio de Transición Ecológica, el IDAE promueve una serie de subvenciones para la eficiencia y reducción del consumo de energía en plantas desalinizadoras.

Entre otras actuaciones para la mejora de la eficiencia energética en plantas desalinizadoras está también la introducción de variadores de frecuencia o de velocidad, lo que supone trabajar en cada momento en el punto óptimo para el ahorro energético de la instalación tanto con membrana nueva como con membrana envejecida.

En plantas desalinizadoras sin variador de frecuencia, desde el arranque de la planta con membrana nueva se produce una estrangulación de la válvula de alimentación a la misma para reducir la presión nominal de la bomba y producir el caudal de permeado estipulado. De esta manera estamos tirando energía y aumentando nuestra huella de carbono. La introducción de un variador de frecuencia evitará este estrangulamiento, bajando las revoluciones por minuto de la bomba, reduciendo el consumo energético y por consiguiente aumentando la eficiencia energética de la instalación desde el arranque de la misma hasta que se produzca el envejecimiento de las membranas donde haya que disponer de la bomba trabajando a su máximo nivel. Esto puede suponer varios años de operación ahorrando energía e incluso puede prolongarse en el tiempo si realizamos limpiezas químicas periódicas y la planta recupera la producción sin tener la bomba trabajando al máximo y actuando de nuevo el variador de frecuencia. Una vez la bomba no pueda dar más presión para mantener el caudal de permeado nominal el variador de frecuencia deja de ser fundamental en la eficiencia energética, y es entonces cuando se toma la decisión sobre el cambio de membranas para poder recuperar la producción del agua necesaria.

2.4. CASO ESPECÍFICO DE LAS PLANTAS DESALINIZADORAS DE AGUA DE MAR EN CANARIAS

Respecto a la producción de las plantas desalinizadoras de agua de mar, se pueden confirmar los siguientes caudales de permeado: Gran Canaria (220870 m³/d), Tenerife (106034 m³/d), Fuerteventura (90755 m³/d) y Lanzarote (87480 m³/d). Esto produce una

huella de carbono significativa respecto al global de cada isla sobre todo en Fuerteventura y Lanzarote. En este sentido las energías renovables pueden ser una gran aportación, principalmente eólica y solar fotovoltaica. Por ejemplo, Fuerteventura y Lanzarote son islas ventosas y de alta irradiación solar durante todo el año que además disponen de grandes extensiones de terreno llano apto para estas instalaciones, bien para el consumo de plantas desalinizadoras públicas como privadas, normalmente más pequeñas, que también pueden autoabastecerse por ejemplo con energías renovables y un motor diésel por seguridad de abastecimiento eléctrico en todo momento sin recurrir a la red insular como puede ser el caso de los hoteles o zonas aisladas donde no llega la red eléctrica. En Gran Canaria y Tenerife también se puede actuar de esta manera, aunque la orografía sea más complicada, pero durante todo el año en las zonas costeras donde están las plantas desaladoras de agua de mar la irradiación solar y los vientos son bastante significativos sobre todo en los meses de verán de junio a septiembre con días más soleados y los vientos alisios. Por ello se estudia la posibilidad de la introducción de energías renovables para el suministro de energía eléctrica en las plantas desaladoras de agua de mar de Canarias para reducir la huella del carbono y la huella ecológica del sector y por su influencia también de todo el archipiélago considerablemente.

Los sistemas eléctricos de Canarias son bastante diferentes de los sistemas continentales debido a los siguientes aspectos:

- Sistemas aislados de pequeño tamaño, específicamente seis subsistemas, uno en cada isla, excepto en Lanzarote y Fuerteventura que disponen de un cable de corriente continua que las interconecta.
- Esto, unido a la escasez de recursos convencionales, genera una alta dependencia externa que, a su vez, aumenta la vulnerabilidad del sector ante los continuos cambios en el precio del petróleo, sobre todo para los combustibles más ligeros (gasóleo), más caros que los combustibles pesados (fuel oil).
- Las islas de la capital son las que disponen de unidades de vapor y de ciclo combinado, mientras que el resto de las islas se generan a partir de motores diésel.
- El modelo energético actual entra en conflicto con las exigencias medioambientales transmitidas por la Unión Europea. Entre ellas se encuentran la reducción de GEI y el aumento de la presencia de fuentes de energía renovables
- El alto costo de la generación de electricidad convencional que lleva a un aumento del ya alto déficit tarifario, compensado por los impuestos a nivel estatal.

- La falta de coordinación entre los agentes competentes en materia de energía, medio ambiente y territorio y la escasa colaboración entre el Gobierno Central, el Gobierno Autónomo y las islas.

Para producir una cantidad de agua de una desaladora se debe consumir un valor determinado de energía eléctrica, y para la producción de ésta, en una red convencional, se emiten de gases de invernadero. La magnitud de estas emisiones depende del conjunto de tecnologías que conforman el conjunto de producción de energía de la red eléctrica a la que está conectada la planta de producción de agua. La energía producida por este conjunto suele denominarse mezcla energética, que tiende a depender en gran medida del territorio y de la política energética. En relación con la dependencia territorial, las redes eléctricas suelen tener mezclas energéticas que provocan mayores emisiones, ya que suelen tener sistemas basados en tecnologías de menor rendimiento. Estas tecnologías de producción de energía eléctrica pueden clasificarse, principalmente, en dos tipos: convencionales y renovables. Dentro de las tecnologías convencionales se pueden considerar varias: motores diésel, turbinas de gas, ciclos combinados, turbinas de vapor, que suelen tener diferentes rendimientos y cantidad de emisiones, y por otro lado hay tecnologías basadas en energías renovables, como: solar fotovoltaica, eólica, de olas, etc... Por otro lado, con el objeto de disminuir las emisiones de efecto invernadero, es posible proponer la generación de energía eléctrica necesaria para producir agua en la misma instalación, mediante sistemas energéticos híbridos. Estos sistemas de energía híbridos pueden estar compuestos por varios tipos de tecnologías, en los que se tiende a integrar la mayor cantidad de energía procedente de fuentes renovables, con el apoyo de un sistema de almacenamiento de energía o de una tecnología convencional, como un motor diésel [95-107].

CAPÍTULO 3. MODELO Y METODOLOGÍA DE CÁLCULO

3.1. INTRODUCCIÓN

Con el objeto de proponer un método integral de cálculo para el análisis de la eficiencia energética de las plantas desaladoras de agua marina, la huella de carbono, la huella ecológica y la implementación de pilotajes en las mismas como herramienta para ello, se describe a continuación los parámetros iniciales de partida y finales a los que se pretende llegar.

Para ello se estudia las posibles mejoras en el proceso de desalinización de agua marina, mediante la tecnología de OI, no sólo para determinados casos muy concretos, como se muestra en las plantas desalinizadoras de Carboneras y del Canal de Alicante 1 [16-17], sino que se realiza el estudio con un intervalo de validez muy grande en cuanto a la temperatura de agua marina en instalaciones, salinidad o incluso a nivel de un conjunto de instalaciones en un territorio como es el caso de estudio que se trata de las Islas Canarias.

Se debe consumir una cantidad de energía eléctrica para producir un caudal determinado de agua en una planta de ósmosis inversa, y consecuentemente para generar esta energía se producen emisiones gaseosas de efecto invernadero. Las redes eléctricas suelen estar formadas por sistemas híbridos de energía, basados en tecnologías de menor rendimiento que provocan mayores emisiones, y dependen de la localización geográfica de las mismas.

Los sistemas eléctricos en Canarias son bastante diferentes de los sistemas continentales debido a que son sistemas aislados de pequeño tamaño, y esto complica el correcto uso de las energías renovables. Gran Canaria y Tenerife tienen turbinas de vapor y de ciclo combinado, mientras que el resto de las islas se generan a partir de motores diésel. El modelo energético actual entra en conflicto con las exigencias medioambientales transmitidas por la Unión Europea. Entre ellas se encuentran la disminución de los gases de invernadero y el incremento de la presencia de fuentes de energía renovables.

Esta tesis se centra en plantas desalinizadoras de agua de mar con salinidades comprendidas entre 30000 y 45000 mg/l para el agua de captación. Además, se trata de aportar propuestas para optimizar la operación de las plantas incidiendo en los consumos de energía, la calidad de aguas, los costes y las emisiones, con lo cual se hace más eficiente y sostenible la operación de las mismas. La optimización indicada se tratará de conseguir a partir de la incidencia en diferentes parámetros de diseño de la planta o de operación, tales como los elementos convencionales de OI para agua marina y alto rechazo en boro como se indica en el capítulo 2, la profundidad de la toma de agua, la temperatura, presión de trabajo, la conversión y la producción de las plantas. Especial mención, en la línea propuesta de esta tesis, es la utilización de herramientas o sistemas de pilotajes en plantas. Todo ello, cumpliendo los parámetros para la calidad del permeado, que deben estar dentro de lo permitido en cuanto a los requisitos de potabilidad de aguas exigidos y de la OMS.

Se desarrolla una metodología, mediante un modelo integral, fig. 3.1., para el estudio de la eficiencia energética y potabilidad del agua en las instalaciones desaladoras públicas (urbanas) y privadas (hoteles y agrícolas), teniendo en cuenta también los parámetros de calidad del permeado en relación al rechazo de boro, en España el Real Decreto 140/2003, y el consumo energético a través de pilotajes a gran escala con la instrumentación necesaria y monitorización de los datos para su estudio hasta 2000 días de operación. Todo ello con el objeto de reducir los consumos energéticos de las instalaciones, la huella de carbono, la huella ecológica y sus costes de operación.

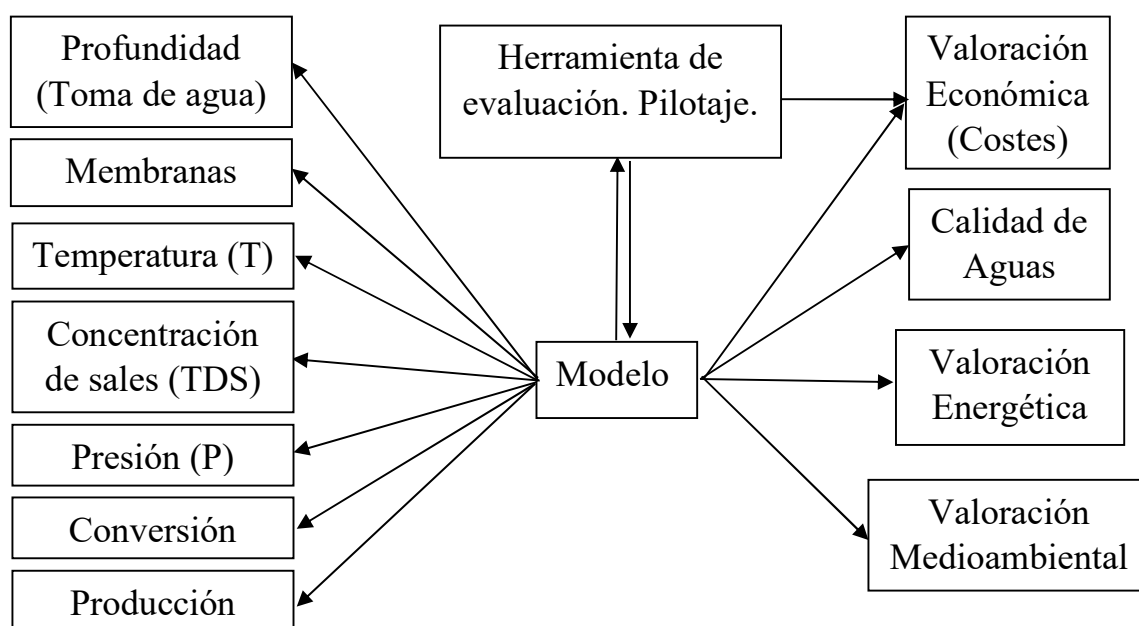


Figura 3.1. Diagrama de bloques del modelo integral

Se utiliza el programa de cálculo Toray DS, como software para diseñar procesos de OI y metodología de estudio siguiendo lo expresado en la ecuación (3.1), con objeto de realizar proyecciones en diferentes escenarios. Se obtiene una herramienta de cálculo para conseguir todos los elementos para diseñar los procesos de desalinización de aguas de ósmosis inversa.

Se introduce en dicho software los siguientes parámetros: tipo de toma, modelo de membranas, temperatura del agua de alimentación, concentración de sales de alimentación, conversión y producción. Se obtiene la presión de entrada al sistema de ósmosis inversa, la calidad de permeado y una valoración energética (potencia y energía consumida) que se utiliza para calcular la huella de carbono y ecológica.

3.2. RELACIÓN DEL ENVEJECIMIENTO-PRODUCCIÓN DE PERMEADO

El envejecimiento de la membrana está asociado matemáticamente a la expresión de la siguiente ecuación (3.1) de forma aproximada y empírica. Se calcula la altura manométrica de la bomba, según la edad media de la membrana desde el primer año de operación hasta el quinto, siguiendo esta ley de comportamiento considerando el caudal de permeado fijo, la temperatura constante y la conversión de trabajo también

invariable. A partir de este modelo de comportamiento se realizan las proyecciones en los diferentes escenarios.

$$h_{b(\text{año } 1-5)} = (a \times t_m + b) + h_{b(\text{año } 0)} \quad (3.1)$$

En este caso, a y b se obtienen empíricamente en función del tipo de membrana. Esto lo debe de aportar el fabricante o por ensayo en planta con datos de operación, donde:

- t_m es la edad de la membrana
- h_b es la altura manométrica de la bomba (m)

De todas formas es necesario cumplir la calidad de aguas requerida para el uso de la misma como agua potable, por tanto es posible optimizar nuestro consumo energético con membranas de última generación pero siempre que se cumpla con los requisitos de calidad de permeado, como se indica en el apartado 3.1 específicamente para el boro permitido en el permeado, que según el Real Decreto 140/2003 debe ser inferior a 1 ppm mientras que la Organización Mundial de la salud (OMS) permite 2,4 ppm como máximo. Además, al subir la temperatura del agua de alimentación baja el consumo energético y la presión de trabajo, pero empeora el rechazo de sales por lo que debemos tener en cuenta los diferentes escenarios para cumplir con los requisitos de agua permeada.

Por ello, antes de hacer una inversión considerable en membranas, se propone la realización de pilotajes a pequeña escala de una membrana o un tubo de membranas, en las condiciones de trabajo de cada planta, para asegurarnos el buen funcionamiento de éstas y el éxito cuando se vaya a llevar a cabo a nivel industrial en la instalación evaluando energética y económicamente previamente el sistema.

Por tanto, la toma de decisión del cambio de membranas es un factor muy importante en la vida de la instalación y se deben tener en cuenta múltiples variables para ello, tales como la presión de trabajo, calidad del agua de alimentación y salida del sistema de ósmosis inversa, conversión, temperatura, etc.

De esta manera, introduciendo membranas de bajo consumo energético y mayor permeabilidad se pretende más agua producto a una presión de trabajo inferior, lo que repercute en una disminución del consumo de energía (kWh) por metro cúbico de agua

producida, y por tanto, mejorando la oferta económica del agua producida. Por ello, en condiciones de temperatura y conversión de trabajo constantes, las membranas de bajo consumo energético producirán el mismo caudal de agua a menor presión de operación, consiguiendo un consumo energético más bajo.

Del mismo modo, la subida en la temperatura de entrada del agua, sobre todo en invierno, con tomas de agua más profundas, como ocurre en las plantas que se estudiarán en los siguientes capítulos, repercute también en un menor consumo energético para mantener la misma producción o un incremento de ésta si mantenemos la presión de alimentación a los elementos de forma constante.

La profundidad de la toma de agua de mar también supone un parámetro o variable para la valoración energética y económica del sistema, ya que a mayor profundidad de la toma más estable es el rango de temperatura del agua de alimentación [16, 115]. Esto supone que la temperatura de la captación no sube tanto en verano y se pueden introducir membranas de bajo consumo energético cumpliendo la calidad de aguas exigida en el permeado, que con anterioridad a más altas temperaturas sólo conseguíamos con membranas de alto rechazo y mayor consumo energético.

3.3 METODOLOGÍA PROPUESTA DE CÁLCULO PARA LA CALIDAD DE AGUAS (BORO)

En este apartado se propone una metodología de cálculo para la calidad de aguas teniendo en cuenta el rechazo de boro en el permeado, dentro de unos rangos de operación, debido a la importancia de éste como se explicó en el capítulo 2.

Las características de trabajo de cualquier instalación desalinizadora por OI tales como presión, recuperación de flujo y condiciones del agua de alimentación pueden variar, causando que el flujo de permeado y rechazo de sales cambien. Es necesario comparar los datos de flujo de permeado y rechazo de sales bajo las mismas condiciones de trabajo, así que el método utilizado para la estandarización de los datos de funcionamiento de la OI fue el ASTM [17]:

Estandarización del Flujo de Permeado,

$$C_{fb} = C_f \ln[1/(1-Y)]/Y \quad (3.2)$$

donde C_{fb} es la concentración de la alimentación de salmuera en mg/L NaCl e Y es la recuperación de agua fraccional.

$$\pi_{fb} = 0.2654 C_{fb} (T + 273.15) (1000 - C_{fb} / 1000) \quad (3.3)$$

donde π_{fb} es la presión osmótica.

$$A = (p_{fs} - \Delta p_{fbs} / 2 - p_{ps} - \pi_{fbs} + \pi_{ps}) \cdot TCF_s \quad (3.4)$$

donde p_{fs} , Δp_{fbs} , π_{fbs} , π_{ps} y TCF_s son presión de alimentación, caída de presión osmótica media de la alimentación de salmuera, factor de corrección de presión osmótica y temperatura en condiciones estándar respectivamente. Las condiciones estándar están tomadas por la muestra estándar, que es la más cercana a las medidas en términos de temperatura, conductividad, presión y pH del agua de entrada, etc.

$$B = (p_{fa} - \Delta p_{fba} / 2 - p_{pa} - \pi_{fba} + \pi_{pa}) \cdot TCF_a \quad (3.5)$$

donde p_{fa} , Δp_{fba} , p_{pa} , π_{fba} , π_{pa} y TCF_a son presión de alimentación, caída de presión osmótica media de la alimentación de salmuera, factor de corrección de presión osmótica y temperatura en condiciones reales respectivamente.

$$Q_{ps} = Q_{pa} \cdot A \cdot TCF_s / B \cdot TCF_a \quad (3.6)$$

donde Q_{ps} y Q_{pa} son flujos de permeado en condiciones estándar y reales respectivamente.

Modelo propuesto

$$\%SP_s = EPF_a \cdot \%SP_a \cdot B \cdot C_{fbs} \cdot C_{fa} / EPF_s \cdot A \cdot C_{fba} \cdot C_{fs} \quad (3.7)$$

donde EPF_a , EPF_s , SP_s , SP_a , C_{fbs} , C_{fba} , C_{fa} y C_{fs} son el flujo medio permeado de elementos, paso de sales, concentración media de la salmuera de alimentación y la concentración de alimentación en condiciones estándar y reales respectivamente.

La filosofía del modelo propuesto, en la ecuación (3.7), está basada en un modelo previo para el coeficiente de permeabilidad iónica (B), el cual no fue posible de implementar a los datos experimentales debido a su baja adaptabilidad. El modelo propuesto muestra la dependencia de B no sólo en temperatura, sino también en concentración, presión,

tiempo de operación y cuatro parámetros (α , β , γ , δ , ϵ , ζ y θ). Los parámetros están relacionados con la influencia de C_{fb} , P_f y TF_b en P_B . Los parámetros d y e están relacionados con el tiempo de trabajo t en días.

$$P_B = P_{B0} \cdot \left(\frac{P_f}{P_{f0}}\right)^\Phi \cdot \left(\frac{C_f}{C_{f0}}\right)^\Psi \cdot \exp(0,0298 \cdot (T-273,15)) \cdot t^f \quad (3.8)$$

$$P_B = P_{B0} \cdot [\gamma \cdot \exp(\delta \cdot (p_f - p_{f0})) + \epsilon \cdot \exp(\zeta \cdot (T_{fb} - T_{fb0})) + \zeta \cdot \exp(\theta \cdot t)] \quad (3.9)$$

Este modelo se apoya en que el ahorro energético de una planta desalinizadora de agua de mar para producir agua de consumo humano depende absolutamente de la calidad de agua exigida, basado en la ecuaciones anteriores y en este sentido podemos aportar a este modelo otros parámetros como se ha descrito anteriormente en la figura 3.1.

3.4. ANÁLISIS GENERAL DE COSTES DE ELEMENTOS Y OPERACIÓN

Tal y como se indicó en la introducción de este capítulo, se trabaja con membranas de ósmosis inversa de alto rechazo en boro que suelen operar a altas presiones, lo que supone un mayor consumo energético del sistema y por tanto un aumento del coste económico. Estos parámetros son directamente proporcionales y aparecen igualmente en la figura 3.1 debido a la importancia de éstos.

Por tanto, el coste y la energía requerida en el proceso dependen de los requisitos de calidad de aguas y del tipo de membrana utilizada.

El 62% del coste económico de un m^3 de agua producida en una instalación desaladora de agua marina proviene del consumo energético de los bombes (bomba alta presión y bomba booster).

A modo de ejemplo, la bomba de alta presión puede estar en unos $2,64 \text{ kWh}/m^3$ y la bomba booster en $0,11 \text{ kWh}/m^3$ [8, 22, 81, 107].

Si consideramos un precio de $0,16 \text{ EUR}/\text{kWh}$ el consumo será de $0,16 \text{ EUR}/m^3$ para la bomba de alta presión y $0,01 \text{ EUR}/\text{kWh}$ para la bomba booster, en total $0,17 \text{ kWh}/m^3$ de agua producida.

La elección de la membrana adecuada puede optimizar el consumo de energía de los bombes, sobre todo en alta presión, lo que representa el 94% de éste. Una membrana de última generación de alto caudal y baja presión de trabajo puede reducir hasta un

20% este consumo, lo que supone un ahorro económico, energético y medioambiental notorio.

Como se puede apreciar en la figura 3.2, el estudio de membranas estándar de OI para una planta desaladora de agua marina ayuda a escoger un elemento de ósmosis inversa que disminuya el consumo energético y por ende los costes operativos de estas plantas, ya que la energía es lo más costoso de la misma.

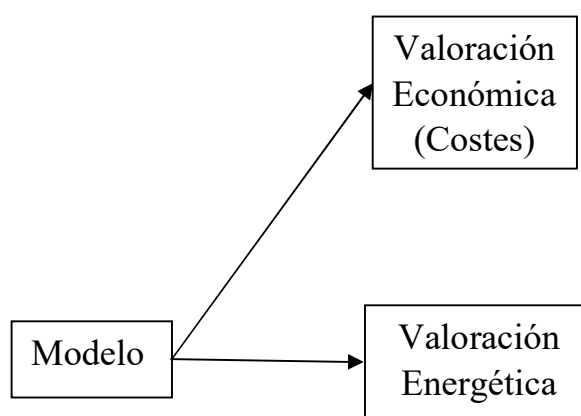


Figura 3.2. Diagrama de bloques energético y económico

Para realizar el análisis general de costes de los componentes o elementos de la planta y la operación de ésta se necesita conocer los costes directos, costes indirectos y otros gastos considerables al efecto.

Entre los costes directos podemos destacar el coste de adquisición de los elementos, tanto iniciales como de reemplazo, y entre los gastos más significativos los relacionados con la inversión de capital inicial, los costes de mantenimiento y operativos.

En este sentido y a nivel orientativo, según los datos de una empresa del sector de construcción de plantas desalinizadoras de Gran Canaria con más de 100 referencias en el mercado, se destaca que el importe de las membranas en una instalación desaladora de agua marina representa aproximadamente un 13% de la inversión total en equipos de la instalación. El resto de los componentes (bombeo de alta presión, bomba booster, tubos, pretratamiento, etc.) suponen un 87% del importe total sin incluir beneficio industrial y antes de impuestos [8, 22].

En la tabla 3.1 y en la figura 3.3 se muestran todas las variables significativas que afectan a los costes de operación por m³ producido [81, 107-109, 119].

Coste de operación	Nomenclatura	Porcentaje (%)
Reemplazo de membranas	Cm	4
Consumo de reactivos	Cr	11
Limpiezas químicas	Cq	2
Mantenimiento	Cm	10
Personal	Cp	11
Consumo energía Bombas	Ce	62

Tabla 3.1. Costes de operación

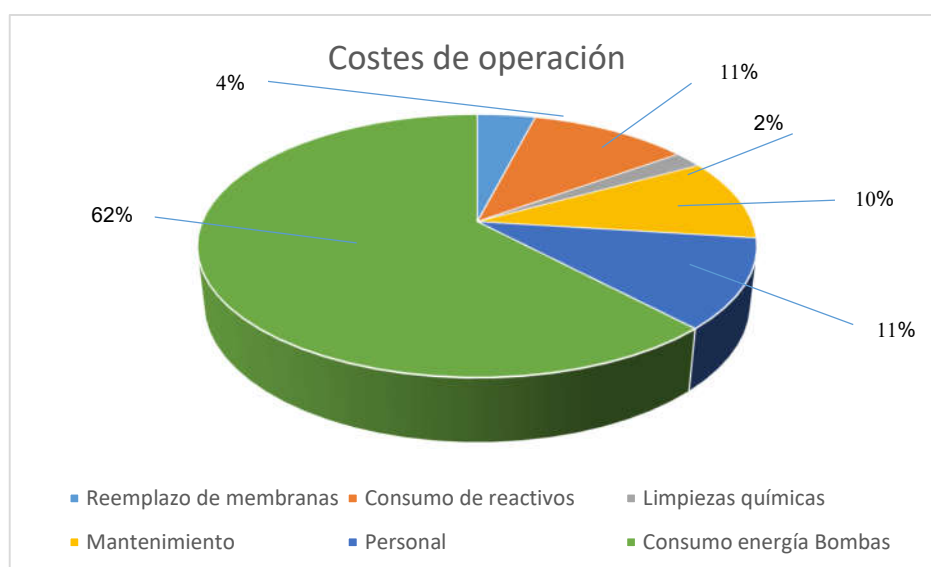


Figura 3.3. Costes de operación

En este sentido se demuestra que el coste que hace referencia al consumo energético en las bombas y principalmente en la bomba de alta presión es con diferencia lo más significativo de una desaladora de agua marina y se puede reducir considerablemente con la introducción de membranas de ósmosis inversa de última generación adecuadas a través de la confirmación de éstas a través de pilotajes en planta.

Si no se realiza el reemplazo de membranas, que además supone el menor coste de los estudiados, esto repercutirá negativamente en un aumento considerable en el consumo energético del bombeo de alta presión lo que sí afecta muy significativamente al coste por m³ de agua producida, como se comenta a continuación.

Por consiguiente, se puede concluir de este apartado de costes que lo más relevante es la energía y la elección adecuada de la membrana de bajo consumo energético que cumpla los requisitos exigidos de operación. En este sentido, existe un coste de oportunidad entre elegir la opción de hacer los reemplazos parciales considerados en el coste de operación o no llevarlos a cabo.

3.5. ANÁLISIS GENERAL DEL CONSUMO DE ENERGÍA EN LAS PLANTAS

Como se comentó en el epígrafe anterior, se debe tomar la decisión de cuándo realizar el reemplazo de membranas para reducir nuestro consumo energético en función del coste de éstas y el coste medio de operación de la planta. En este sentido se toma la decisión de reemplazar las membranas cuando:

$$\Delta C_m \geq (C_r)_n \quad (3.10)$$

siendo,

ΔC_m es el incremento del coste medio de energía de la planta

$(C_r)_n$ es el coste de reemplazar las membranas en el año n

$$\Delta C_m = C_{m5} - C_{mx} \quad (3.11)$$

siendo,

$$C_{m5} = \frac{(C_0 + C_5)}{2} \quad (3.12)$$

$$C_{mx} = \frac{(C_0 + C_x)}{2} \quad (3.13)$$

$$\Delta C_m = C_{m5} - C_{mx} = \frac{(C_5 - C_x)}{2} \quad (3.14)$$

En cuanto al consumo energético en kWh/m³ de agua producida, se llega a la siguiente fórmula basada en los diversos equipos para la recuperación de energía disponibles en las instalaciones desalinizadoras de agua de mar, siendo la potencia:

$$P = \begin{cases} 2,61 \text{ kWh/m}^3 \text{ si existen cámaras isobáricas (ERI, DWEER, etc.)} \\ 3,04 \text{ kWh/m}^3 \text{ si se dispone de turbina pelton o similar} \\ 3,50 \text{ kWh/m}^3 \text{ con sistemas tipo turbina francis u otros} \end{cases} \quad (3.15)$$

La introducción de membranas de última generación, que a bajo consumo energético y alto rechazo de sales, consigue mejorar las condiciones medioambientales del proceso, y por tanto una reducción en su huella. Además, el alto rechazo de sales supone la mejora de calidad en el agua permeada a las presiones de trabajo habituales. En este sentido se cumple con holgura la normativa vigente de aguas potables.

Un factor clave para la calidad en el agua producida de las plantas desalinizadoras es el rechazo de boro, que se consigue trabajando con membranas de alto rechazo, normalmente a mayor presión. Con la introducción de membranas de última generación de bajo consumo energético y alto rechazo de sales podemos producir agua con menos de 1 ppm de boro en condiciones más eficientes y sostenibles que con membranas estándar.

La energía total consumida depende de la energía renovable y no renovable del sistema eléctrico y de la energía renovable producida por la propia instalación. Debido a esto, la ecuación que lo representa es la siguiente.

$$E_{Tc} = E_{Rn} + E_{NRn} + E_{LR} \quad (3.16)$$

siendo:

E_{Tc} : Energía total consumida del sistema

E_{Rn} : Energía renovable de la red

E_{NRn} : Energía no renovable de la red

E_{LR} : Energía no renovable local

Dependiendo de la energía renovable local que se disponga, la huella de carbón y la huella ecológica del sistema podrán variar. Ambas se reducirán tanto como más energía renovable local se pueda producir. Como se puede observar a posteriori, la energía del sistema eléctrico puede proceder de fuentes no renovables (ciclo combinado, turbina de

gas, turbina de vapor y diésel) pero también en renovables principalmente energía eólica y fotovoltaica.

3.6. VALORACIÓN MEDIO AMBIENTAL. FACTOR DE EMISIÓN DE CO₂ (FACTOR MIX).

Una reducción del consumo energético va a repercutir directamente en una mejora medio ambiental y lo estudiamos por medio de la huella del carbono que producen estas plantas desalinizadoras y la huella ecológica de las mismas, esta última como una línea futura de actuación.

Para la producción de una cantidad de agua de una instalación de OI, se debe consumir energía eléctrica, y para la producción de ésta, en una red convencional, se emiten gases que producen efecto invernadero.

La magnitud de estas emisiones depende del conjunto de tecnologías que conforman el sistema de producción energético de la red eléctrica a la que está conectada la planta de producción de agua. La energía producida por este conjunto a menudo se denomina mix energético, que tiende a depender en gran medida del territorio y la política energética.

En relación con la dependencia territorial, las redes eléctricas generalmente tienen mezclas de energía que causan mayores emisiones en forma de gases de invernadero, ya que generalmente tienen sistemas que se basan en tecnologías de menor rendimiento. Estas tecnologías de producción de energía eléctrica se pueden clasificar, principalmente, en dos tipos: convencionales y renovables.

Dentro de las tecnologías convencionales, que repercuten directamente en la huella de carbono de las instalaciones, se pueden considerar varios: motores diésel, turbinas de gas, ciclos combinados, turbinas de vapor, que generalmente tienen diferentes rendimientos y cantidad de emisiones. Por otro lado, hay tecnologías basadas en energías renovables, tales como: solar fotovoltaica, viento, olas, etc.

Por consiguiente, para reducir las emisiones de estos gases, es posible proponer la generación de energía eléctrica necesaria para producir agua en la misma instalación, a través de sistemas de energía híbridos. Estos sistemas de energía híbridos pueden estar compuestos de varios tipos de tecnologías, en las cuales la mayor cantidad de

energía de fuentes renovables tiende a integrarse, con el apoyo de un sistema de almacenamiento de energía o una tecnología convencional, como un motor diésel.

Por lo tanto, se puede proponer una metodología para lograr el funcionamiento estable de un motor diésel de alta eficiencia en un motor diésel autónomo integrado reducido y un sistema generador de energía solar fotovoltaica para alimentar una planta de ósmosis inversa, reduciendo así las emisiones de gases del efecto invernadero asociado a la producción de agua. Esta aplicación sería muy útil en complejos hoteleros, instalaciones privadas, industrias, zonas aisladas, etc.

En este sentido siguiendo el modelo de indicadores del impacto medioambiental específico [118] y la fórmula siguiente utilizada por Red Eléctrica Española para las emisiones y factor de emisión de CO₂ en generación no renovable en el sistema eléctrico de Canarias de 2020.

$$FM = FM_{md} + FM_{tg} + FM_{tv} + FM_{cc} \quad (3.17)$$

donde podemos definir según el Ministerio de Transición Ecológica:

FM: Factor de emisión del Mix eléctrico (tCO₂/kWh)

FM_{md}: Factor Mix motores diésel (tCO₂/kWh)

FM_{tg}: Factor Mix turbina gas (tCO₂/kWh)

FM_{tv}: Factor Mix turbina vapor (tCO₂/kWh)

FM_{cc}: Factor Mix ciclo combinado (tCO₂/kWh)

RE: Rendimiento Energético (kWh/m³)

HC_{MIX}: Huella de Carbono del Mix energético (tCO₂)

E¹t_{MIX}: Energía actual de las tecnologías del Mix energético (kWh)

E²t_{MIX}: Energía futura de las tecnologías del Mix energético (kWh)

E_i: Energía de cada tecnología (kWh)

P_i: Porcentaje de uso de cada tecnología en el Mix energético

FM se calcula para cada tecnología e isla con el consume total de energía por isla, asociado a la huella de carbono y al porcentaje de una tecnología determinada en e mix energético, incluyendo energías renovables y no renovables. En consecuencia, el FM de una determinada tecnología “i” por isla es el siguiente:

$$FM_i = P_i / 100 \cdot HC_i / E_i \quad (3.18)$$

De esta manera podemos calcular la huella de carbono del mix energético actual y futuro, teniendo en cuenta la sumatoria de las energías de cada tecnología y su factor mix de emisiones.

$$HC_{MIX} = \sum E_i FM_i \quad (3.19)$$

Siendo la energía actual y la energía futura de las tecnologías del Mix energético las siguientes:

$$E^1_{t_{MIX}} = \sum E_i \text{ en el momento inicial} \quad (3.20)$$

$$E^2_{t_{MIX}} = \sum E_i \text{ en el momento final} \quad (3.21)$$

3.7. HUELLA ECOLÓGICA

Como se ha explicado en el capítulo 2, la huella ecológica es un parámetro que se refiere a una determinada demanda, entre otros la demanda de agua producto en las plantas desaladoras. En este sentido, para calcular la huella ecológica utilizamos la siguiente metodología (3.17) [88, 92, 93, 120] que se expresa en la tabla 3.8.

CATEGORÍA	ABS. MEDIA	SUPERFICIE	%	ABS.	FACTOR DE
SUPERFICIE	(tCO2/ha/año)	(millones ha)		HECTÁREA	EQUIVALENCIA
				EQUIVALENTE	(fi)
Bosques	19,35	3858,10	7,56	1,46	9,66
Cultivos	8,09	1958,32	3,84	0,31	4,04
Prados y pastos	2,44	3363,72	6,59	0,16	1,22
Océanos,	0,10	36010,00	70,60	0,07	0,05
Desiertos	0,00	3600,00	7,06	0,00	0,00
Otros	0,00	2217,06	4,35	0,00	0,00
Total		51007,20		2,00	1,00

Tabla 3.8. Absorción media y equivalente de CO2 por hectárea de las distintas superficies del planeta Tierra. Factores de equivalencia de las superficies [120].

Se determina así que una hectárea equivalente del planeta Tierra es capaz de absorber de media 2 toneladas de CO2 al año, entendiendo el concepto de hectárea equivalente

como aquella que reúne en la proporción descrita a todas las tipologías de terreno que componen el planeta y que se han resumido en bosques, cultivos agrícolas, prados, pastos, océanos, mares, desiertos y otros. Por tanto, se obtiene la siguiente fórmula:

$$HE = HC_a / 2 = HC_d * 365 \text{ días} / 2 = IA * m^3/\text{día} * 365 \text{ días} / 2 \quad (3.22)$$

donde:

IA: Impacto Ambiental (tCO₂/m³)

HC_a: Huella Carbono (tCO₂/año)

HC_d: Huella Carbono (tCO₂/día)

HE: Huella Ecológica (ha/año)

Sabemos que la dispersión del CO₂, gas definido dentro de la tipología de los gases de efecto invernadero, es heterogénea y global si bien los focos de producción son más intensos en buena parte de las zonas terrestres colonizadas por los núcleos de población humana.

Surge un nuevo concepto en referencia a la absorción del CO₂ y es lo que se denomina superficie útil del planeta, que es aquella formada por bosques, cultivos agrícolas, ganaderos, aguas superficiales y vegetación marina y costera (se excluye por tanto aguas profundas, desiertos y otros tipos de superficie no catalogados), que son aquellas que consideramos contribuyen principalmente a la absorción de carbono.

Si tasamos la población mundial en 7200 millones de personas, y atendiendo que la superficie útil es de unos 12190,14 millones de ha, suponiendo que en la actualidad existe una situación poblacional admisible para el planeta, al distribuir de forma uniforme la población sobre la tierra obtendríamos el terreno disponible para cada individuo, que es de 1,69 ha/persona/año.

3.8. ANÁLISIS POR NÚMERO DE HABITANTES ESPECÍFICO

Del mismo modo se puede estudiar si la producción concentrada en una planta pública es más eficiente que la producción distribuida en plantas pequeñas y localizadas en el lugar de la demanda. De esta manera, con una producción distribuida la introducción de energías renovables insitu, tanto eólica como solar, es más flexible y evitamos el

problema del transporte de energía eléctrica e incluso el transporte de agua. De esta forma se reducen los costes, las emisiones de CO₂ y la huella ecológica, que se puede estudiar también en función del número de habitantes específico N_e , siendo:

$$N_e = N_{hab} / km^2 \quad (3.23)$$

$$N_i < N_{hab} / km^2 < N_s \quad (3.24)$$

N_e : Número de habitantes específico

N_{hab} : Número de habitantes

N_i : Número de habitantes inferior al promedio

N_s : Número de habitantes superior al promedio

3.9. UTILIZACIÓN DE PILOTAJES

La introducción de un pilotaje por OI en una planta desalinizadora de agua de mar, cuyos consumos energéticos son muy altos y la salinidad de entrada es mayor que para el tratamiento de otros tipos de agua, es fundamental para optimizar sus recursos. En este sentido se muestra la siguiente figura 3.10.

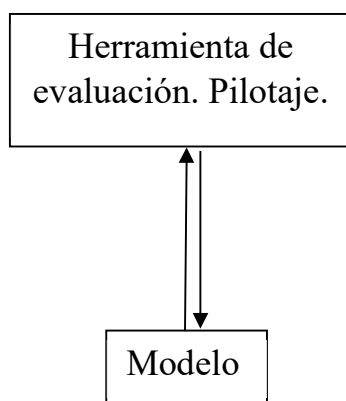


Figura 3.10. Diagrama de bloques: planta piloto

El no tener una planta piloto puede tener un coste de oportunidad muy alto, al no poder probar una membrana que optimice el consumo energético y mejore la calidad del agua producida. Esto permite probar a pequeña escala su funcionamiento y llevarlo después a gran escala en la planta minimizando riesgos de que no se cumplan los objetivos previstos. Si no disponemos de esa planta piloto, cuyo coste para plantas de agua de

mar grandes no es significativo frente a la inversión que habría que hacer de membranas en la instalación, podemos equivocarnos si elegimos la membrana no adecuada a nuestro tipo de agua sin haber probado antes la misma in situ y perder una gran cantidad económica.

Por tanto, disponer de los ensayos adecuados y de la instrumentación necesaria en una planta de este tipo para hacer pilotajes incide directamente en la eficiencia energética del sistema. En este sentido, se pueden realizar distintos tipos de ensayos: envejecimiento de membranas, pilotaje o profundidad de captación entre otros. En el primero de los ensayos se trata de hacer funcionar a las membranas en un tubo de presión, en paralelo al resto del tren, y en las mismas condiciones de operación de la planta. De esta manera envejecen las membranas y podemos pilotarlas a posteriori en unas condiciones más reales de trabajo, no sólo en condiciones de arranque donde es más difícil encontrar problemas. En el segundo ensayo se realiza el pilotaje propiamente, donde hacemos variar las condiciones de trabajo de la membrana como nos interese para obtener resultados en diversos escenarios. Por último, un ensayo de la profundidad de captación ayuda a caracterizar el agua de alimentación a la instalación en cuanto a su temperatura, calidad de aguas, etc.

Se plantea por tanto la posibilidad de hacer pilotajes que experimenten a pequeña escala la operación de membranas de nueva generación de alto rechazo, pero también de bajo consumo energético, buscando aquella que reduzca considerablemente, según el tipo de agua de cada planta, el consumo energético, económico y medioambiental cumpliendo con la calidad de aguas exigida. Una vez escogida la mejor membrana para cada planta, mediante la introducción de estos pilotajes, se llevará a cabo a escala industrial de toda la planta, bastidor por bastidor, la mejora energética, económica y medioambiental que se ha elegido. Estas valoraciones económicas, energéticas, y medioambientales son las que se muestran en el diagrama y se recogen también anteriormente en este capítulo.

Si no se realizan estos pilotajes periódicos con las membranas que van llegando al mercado y no se hacen reemplazos parciales de las membranas que están operando en planta, con el tiempo, éstas envejecerán y no sólo disminuirá la producción de agua en las mismas, sino que será de peor calidad y aumentará la presión de trabajo lo que supone un mayor consumo energético y coste de operación de la planta. Por tanto, será

más caro no hacer pilotajes que llevarlos a cabo con membranas que normalmente los fabricantes no dejan a coste cero para ellos también tener información real del funcionamiento de éstas. Continuar trabajando con membranas que consumen cada vez más energía para producir la misma cantidad de agua o menos con peor calidad, también tendrá un coste medioambiental, representado en un aumento de la huella de carbono y de la huella ecológica del planeta como se calculará posteriormente en el capítulo 4 de resultados.

Igualmente, trabajar con recuperadores de energía ERI, DWEER, OSMOREC, etc, supondrá la disminución en el consumo de energía de la instalación que trabajar con turbinas Pelton o Francis y por ello también es conveniente apoyarse en estos sistemas que reducirán el coste medioambiental del sistema, la huella ecológica y del carbono en planta.

Este modelo de trabajo nos ayudará a dar respuesta a las distintas dimensiones que se demandan para el buen funcionamiento de una desaladora y que sea extensibles a todas ellas. En este sentido el principal factor a cumplir, dependiendo de la localización geográfica y política donde nos encontremos, será la normativa de agua potable sí se trata de una planta desalinizadora para consumo humano que es la mayoría de los casos en todo el mundo. Si nos situamos en España, es el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero que debemos cumplir, donde el mayor cuello de botella está en conseguir que el rechazo de boro de los elementos de OI sea lo suficientemente holgado para que el permeado total esté por debajo de 1 ppm. Éste es el principal factor que cumplir, la calidad de aguas. Para ello hemos desarrollado el modelo anterior donde estudiamos cómo puede variar el boro y por ende la calidad del agua dependiendo de la utilización de distintas membranas de ósmosis inversa. Esto se llevará a cabo posteriormente con datos reales en la desaladora de Alicante 1 [17].

Por consiguiente, el modelo para la calidad de aguas nos exige trabajar con membranas de alto rechazo de sales y particularmente boro para alcanzar este valor, y cuando no es posible hacer un segundo paso de ósmosis donde volvamos a tratar el permeado del primer paso con membranas de agua salobre de forma parcial o total y muchas veces incurriendo en costes de productos químicos para subir el pH. Esto lo hacemos para que el boro que se presenta principalmente como ácido bórico pase a ser borato que es

una sal por lo que la membrana tendrá más posibilidades de rechazarlo, ya que está diseñada para rechazar sales.

Una vez cumplimos la calidad del agua, si es posible en un paso solo, para no hacer más costosa la planta con un segundo paso de ósmosis en cuanto a membranas, tubos de presión, bombas, tubería, válvulas y consumos energéticos; en segundo lugar, buscamos que la presión requerida en nuestro sistema sea la más baja posible utilizando membranas de última generación con bajo consumo energético y trabajando a temperaturas no muy bajas.

Por tanto, relacionamos en nuestro modelo la calidad de aguas con un alto rechazo de sales que supone un consumo energético elevado por lo que introducimos membrana de última generación para reducir la energía necesaria manteniendo la calidad necesaria. Las pruebas piloto realizadas en la planta desalinizadora de Carboneras van en este sentido y a través de diferentes membranas de varios fabricantes se llegó a escoger la mejor que en primer lugar cumpliera la calidad de aguas y en segundo lugar lo hiciera con membranas de ósmosis inversa al menor consumo energético posible [16].

En este sentido el modelo de calidad de aguas está ligado directamente al consumo energético de la planta que es función también de la temperatura del agua. En nuestro modelo introducimos las herramientas necesarias para identificar cuál es la energía necesaria en nuestro proceso y calcularla.

Del mismo modo, relacionamos también en nuestro modelo la calidad de aguas, el consumo energético de la desaladora con la dimensión económica y medio ambiental del sistema, ya que cuantos menores sean nuestros consumos energéticos menores también serán los costes monetarios y medioambientales de nuestra instalación. Esta metodología es aplicable a todas las plantas desalinizadoras de agua de mar y es por ello por lo que el estudio lo vamos a extender también a todas estas instalaciones en las Islas Canarias y a los estudios realizados en Alicante 1 y Carboneras, lo que se verá en capítulos posteriores.

Del mismo modo se utiliza la herramienta del diagrama de Pareto para identificar qué aspectos de la planta desalinizadora son los más significativos y los que producen más incidencia en el consumo energético de la misma. En la figura 3.11 se muestran dichos elementos más importantes a tener en cuenta en la instalación.

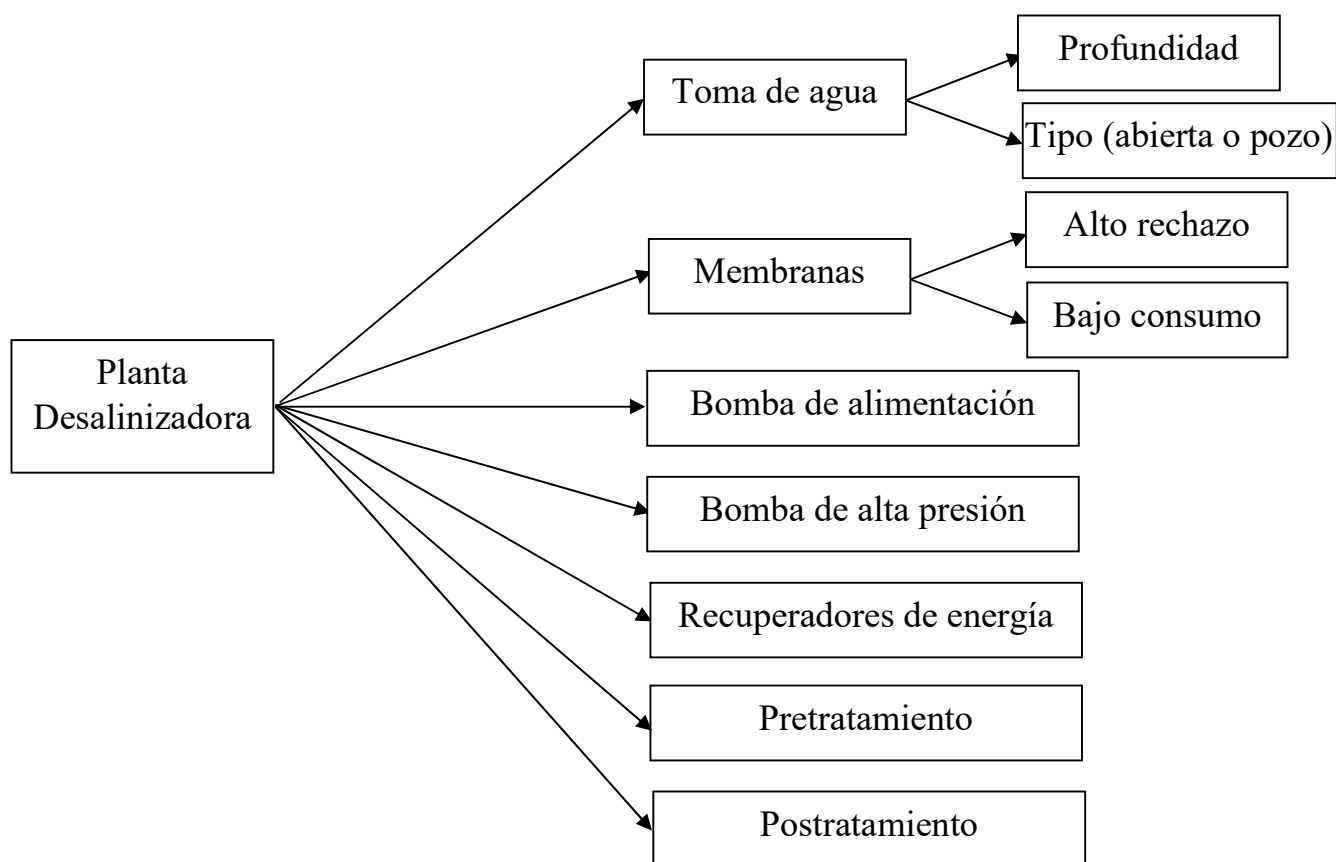


Figura 3.11. Elementos más significativos de la planta desalinizadora

Análisis de Pareto.

En este caso se utiliza el análisis de Pareto para evidenciar aquellas 2 ó 3 causas más significativas cuyo tratamiento incide en más del 80% de la posible mejora energética que se quiere ejecutar. En este sentido se muestra a continuación en la figura 3.12 el diagrama de Pareto para la mejorar energética de N plantas en un territorio determinado. Se ha numerado una serie de factores que pueden afectar a esta mejora energética del 1 al 7 y que pueden ser por ejemplo la toma de agua de mar, la decisión sobre las membranas, los recuperadores de energía, la bomba de alta presión, las decisiones sobre el pretratamiento, la bomba de alimentación o el postratamiento.

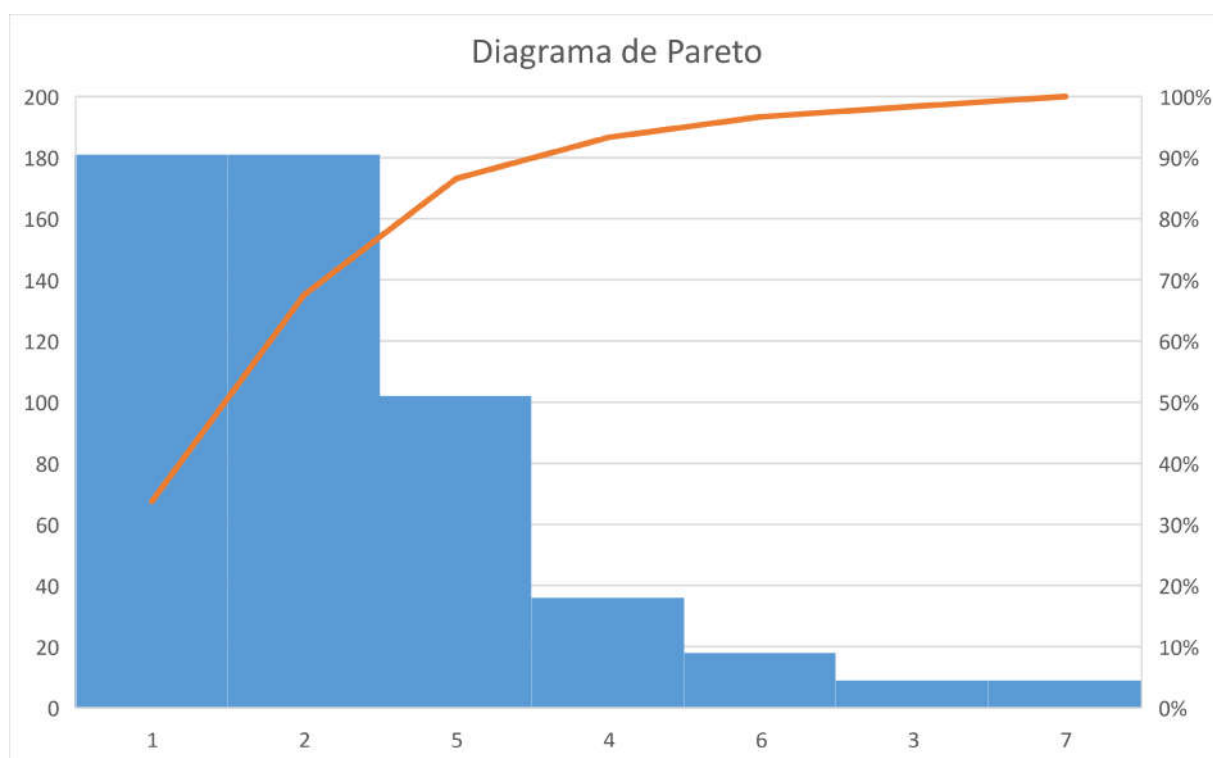


Figura 3.12. Diagrama de Pareto de la planta desalinizadora

Se pretende determinar cuál serían los efectos más significativos. En este ejemplo se puede observar cómo las tomas de decisiones más importantes se basan en los factores 1, 2 y 3, que influyen en el 90% de la posible mejora energética del sistema. En este sentido se van a estudiar principalmente los dos primeros elementos en cuanto a la toma de decisiones sobre el factor 1 y 2 para la instalación, lo que representa entre el 70% y el 80% de la influencia en la mejora energética propuesta. El tercer factor también se considera, aunque en menor medida, para llegar al 90% de los efectos sobre la mejora energética de las plantas desalinizadoras del territorio a considerar.

En cuanto a la toma de decisiones sobre las membranas, se puede realizar sobre la base de un pilotaje en planta, con el tipo de agua específica a la que se va a enfrentar, o basarnos directamente en las proyecciones y garantías del suministrador. En este sentido, mediante las especificaciones técnicas del fabricante Toray se muestra cómo en el caso de una planta desalinizadora se puede esperar una incertidumbre en torno al 20% en la calidad de agua, debido a los factores de seguridad de las especificaciones del fabricante muy conservadoras y aún más las garantías del sistema que se pidieran a posteriori dependiendo de cada proyecto en particular. De esta manera se demuestra

la necesidad de la realización de un pilotaje en una planta desalinizadora para eliminar esta incertidumbre prácticamente sin coste alguno para el operador, ya que normalmente las membranas para estas pruebas se suministran gratuitamente por el proveedor evitando el riesgo de equivocarnos con el modelo de membrana, con los costes de todo tipo que ello supone, y se prueban en un tubo preparado que se libera de la planta para esta prueba. Dependiendo del tamaño de la planta podemos hacer una clasificación numerada por colores en función de la incidencia de la realización de un pilotaje como se muestra en la tabla 3.9. Por ejemplo, el nivel 1 relativo al color verde hacer referencia a desaladoras inferiores a una producción de 100 tCO₂/día con incidencia muy leve, ya que siendo el porcentaje de rechazo de sales y consumo energético muy similar por m³ de agua producto al tratarse de una cantidad pequeña de agua permeada este valor es bajo, pero según va aumentando el caudal producto de la instalación se dispara este producto hasta multiplicarse por mil en el caso del nivel 5 ,color rojo, con incidencia muy grave en la eficiencia energética de las instalación, coste económico y medioambiental.

Producción (m ³ /día)	Incidencia	Color
<100	Muy Leve	1
100-1000	Leve	2
1000-10000	Moderado	3
10000-100000	Grave	4
>100000	Muy Grave	5

Tabla 3.9. Incidencia de no utilizar pilotajes en plantas.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y APLICACIÓN PRÁCTICA

4.1. INTRODUCCIÓN

En esta sección se muestran los resultados que tienen aplicación práctica de lo expuesto en el capítulo 3 para varias plantas en diferentes emplazamientos. Entre estas plantas desalinizadoras: Canal de Alicante 1, Carboneras, así como el caso de gran parte de las desaladoras de agua marina de Canarias. En este último caso se realiza también un análisis de los datos del mix energético de cada isla para así obtener el factor de emisión asociado a cada una de ellas, y compararlo con el factor de emisión de la Península. De esta manera conseguimos mejorar la calidad del agua y el consumo energético del sistema para las salinidades de agua de mar analizadas y las temperaturas de trabajo en diversos escenarios y durante un tiempo de operación ininterrumpido.

Inicialmente se muestran los resultados según el modelo explicado en el capítulo 3 para el caso de la planta desalinizadora del Canal de Alicante 1, que se desarrollan en la relación envejecimiento-producción de permeado, la calidad de aguas, el rechazo de boro a partir de la metodología desarrollada al efecto, el consumo energético, huella de carbono y ecológica de la instalación [17].

Seguidamente, se muestran los resultados para el caso de la planta desalinizadora de Carboneras, donde se desarrollan los resultados en campo del pilotaje de tres modelos de membrana distintas con el objeto de obtener los resultados con el menor consumo energético posible, igualmente la relación envejecimiento-producción de permeado, la calidad de aguas, el rechazo de boro, la huella de carbono y ecológica de la planta [16, 126-132].

Finalmente, a partir del análisis de los datos del factor mix energético de las Islas Canarias, se realiza una extensión de resultados para las desalinizadoras de agua marina de las islas. En este caso, se estudia de forma detallada la huella de carbono y ecológica de las diferentes instalaciones de las islas y el análisis de éstas por número de habitante específico.

4.2. RESULTADOS GENERALES PARA EL CASO DE LA PLANTA DESALINIZADORA DEL CANAL DE ALICANTE 1

El aumento del rechazo de boro se ha convertido en uno de los objetivos más importantes de los suministradores de membranas. De hecho, un mínimo de boro en el agua de riego es recomendable y a veces necesario para ciertas actividades metabólicas, pero si su concentración es ligeramente alta, la planta puede presentar

efectos de intoxicación por boro. La regulación en España para el agua potable es bastante estricta en este tema.

La planta de desalinización del Canal de Alicante 1 se encuentra en España y tiene una capacidad de producción de 7200 m³/d por tren. Esta planta ha estado en funcionamiento durante 40000 horas desde 2009 hasta hoy en día. A lo largo de estos años se recogieron datos operativos tales como presión, conductividad, flujo, temperatura, pH y concentración de boro en el permeado. Cada bastidor no tenía el mismo número de recipientes a presión ni las mismas condiciones de funcionamiento. El objetivo de este trabajo fue proponer un modelo predictivo para el coeficiente de permeabilidad de boro mediante la evaluación de las fluctuaciones de la concentración de boro en el permeado debido a los parámetros de operación en 8 trenes. Esto permitió desarrollar un modelo en función de los principales parámetros operativos. La concentración de boro en el permeado estaba entre 0,5 y 2 mg/L para el elemento de membrana TM820S-400 y en un intervalo de 0,25 y 0,75 mg/L para el elemento de membrana TM820L-440. También se realizó un análisis de rendimiento considerando el flujo de permeado normalizado y el rechazo de sales.

La planta se encuentra al sudeste de España (Alicante). Esta planta de desalinización (SWRO) ha estado operativa desde el 2009. El agua sin tratar se toma de 22 pozos, 18 tienen una profundidad de 50 metros y 4 de 100 metros. Había una bomba de 324 m³/h por pozo. El pretratamiento de esta planta (fig. 4.1) estaba compuesto por 10 filtros de arena por gravedad, RPI-4000A con dosis antiescalante (0,5 ppm) y 6 filtros de cartucho de 5 micrómetros. Había 14 bombas de alta presión (2 en reserva) con turbinas Pelton como dispositivos de recuperación energética. El sistema (RO) disponía de 12 trenes con un caudal producto de 10000 m³/día cada uno, 140 tubos de presión (PVs) y 7 membranas por PV. Los trenes 1, 4, 5, 7 estaban considerados para este trabajo debido a la disponibilidad de los datos operativos. Fueron instaladas dos tipos de membranas, TM820S-400 (trenes 2, 6, 11 y 12) y TM820L-440 (trenes 3, 8, 9, 10) de Toray. Esta planta de desalinización fue construida para producir agua potable.

La planta de ósmosis inversa (SWRO) ha estado en funcionamiento con las mismas membranas desde 2009. Por lo tanto, no ha sido posible considerar todos los datos recogidos debido a un problema con las juntas tóricas de las membranas. La planta tuvo que ser detenida para reemplazarlas por lo que los datos sobre el funcionamiento fueron distorsionados, y los que se obtuvieron antes de este incidente, fueron estudiados en este trabajo.

En la figura 4.1 se indica el diagrama de la planta que ofrece más información. La Tabla 4.2 indica la composición inorgánica del agua de entrada. La conductividad de alimentación ha sido bastante constante, alrededor de 59600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con un pH alrededor de 7. La fluctuación de temperatura del agua de alimentación en cada tren se muestra en las figuras 4.2 y 4.3. En general, esta temperatura estaba en un rango de entre 18 y 26°C para ambos elementos de membrana [17].

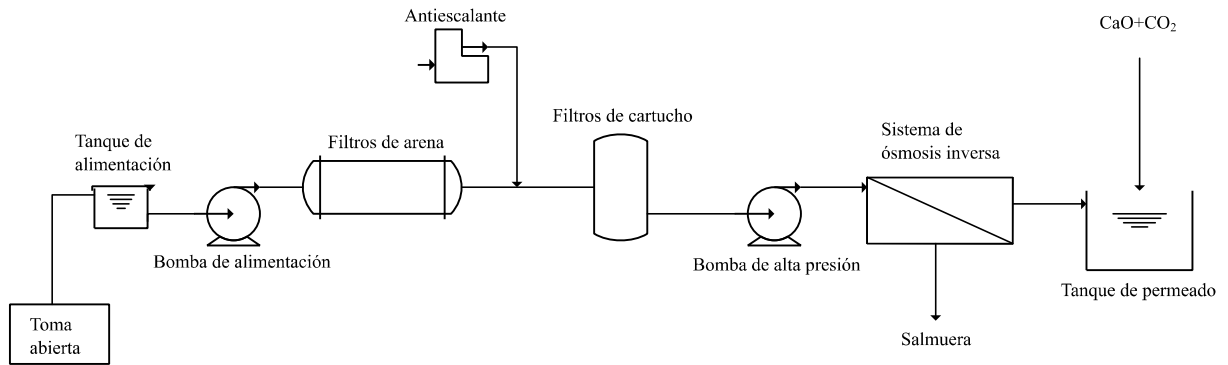


Figura 4.1. Diagrama de la planta desalinizadora

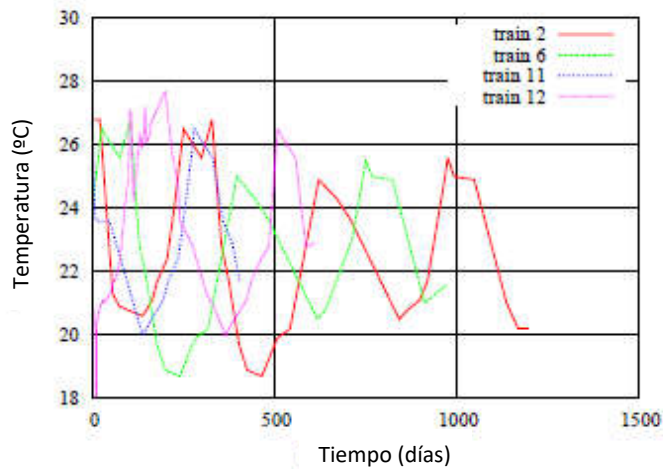


Figura 4.2. Temperatura del agua de alimentación en los trenes 2, 6, 11 y 12 (Membrana TM820S-400)

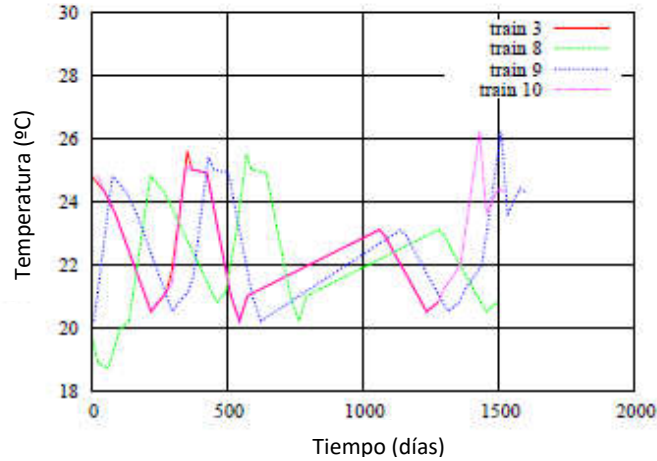


Figura 4.3. Temperatura del agua de alimentación en los trenes 3, 8, 9 y 10 (Membrana TM820L – 440)

Las figuras 4.4 y 4.5 muestran que los rangos de presión de alimentación en los dos grupos de trenes han estado entre 6,3-7,6 y 6,7-7,5 MPa, estos incrementos se debieron a la disminución del rendimiento, especialmente por el ensuciamiento de las membranas a lo largo de estos años de operación. Como se indica en la figura 4.6, el flujo de permeado ha estado entre 300 y 350 m³/h. Sin embargo, la figura 4.7 muestra un decaimiento del flujo del permeado de 80 m³/h. En este segundo grupo de trenes, a pesar de tener más área activa y más PVs por tren, la desintegración de rendimiento en términos de flujo de permeado es mayor en el segundo que en el primer grupo. La recuperación del flujo (R) se muestra en las figuras 4.8 y 4.9. Estos gráficos tienen el mismo perfil que los anteriores. De lo contrario, las figuras 4.10 y 4.11 muestran que la conductividad del permeado ha sido menor en el segundo grupo que está en un intervalo entre 250 y 500 μ S/cm la mayor parte del tiempo. Indica un comportamiento más estable bajo las condiciones operativas mencionadas anteriormente para la membrana TM820L-440 como ocurre con la concentración de boro en el permeado (figuras 4.12 y 4.13).

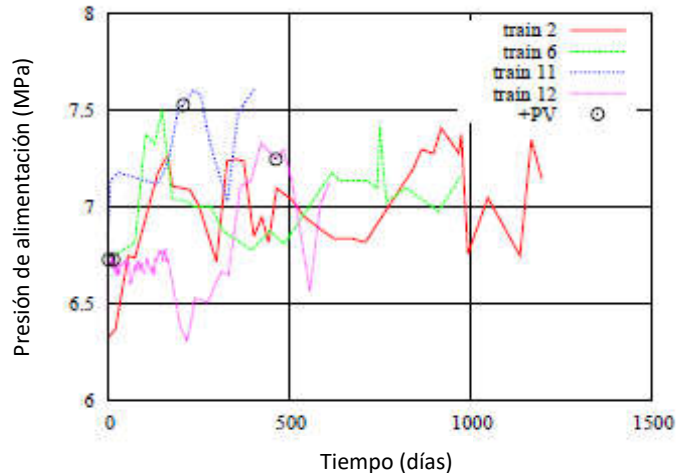


Figura 4.4. Presión de alimentación en los trenes 2, 6, 11 y 12 (Membrana TM820S – 400)

Las condiciones iniciales de la membrana también fueron consideradas; $P_{f0} = 6,83$ y $6,84\text{MPa}$, $C_{fbo} = 49, 103$ y $47, 511\text{ mg/L}$, por membranas TM820S- 400 y TM820L-440 respectivamente.

En cuanto a los resultados que se indican en la figura 4.4 se destaca que la presión de alimentación aumenta a medida que va pasando el tiempo, siendo ésta un indicador del envejecimiento de las membranas en planta. Esto mismo se corrobora en la figura 4.6 donde se aprecia cómo disminuye el caudal de permeado en función de la edad de la membrana. Por tanto, se significa una pérdida de rendimiento en cuanto a aumento de consumo energético y reducción de agua producto debido al envejecimiento de las membranas a lo largo del tiempo. Esto refuerza la posición de la necesidad de hacer reemplazos periódicos de membranas para rentabilizar la operación de la planta sin reducir su producción o aumentar el consumo energético de la misma.

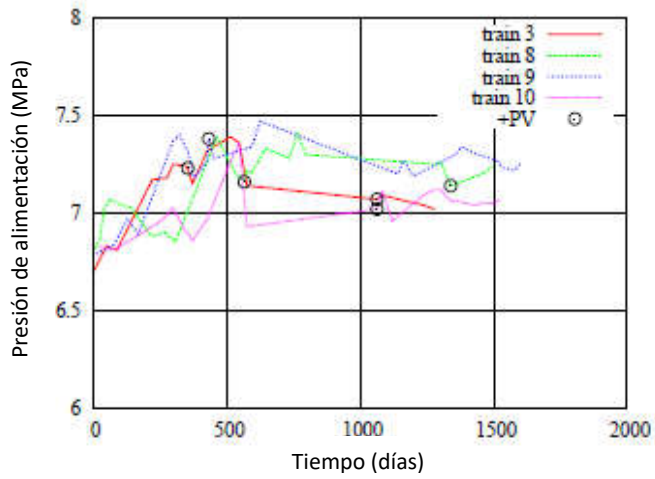


Figura 4.5. Presión de alimentación en trenes los trenes 3, 8, 9 y 10 (Membrana TM820L-440)

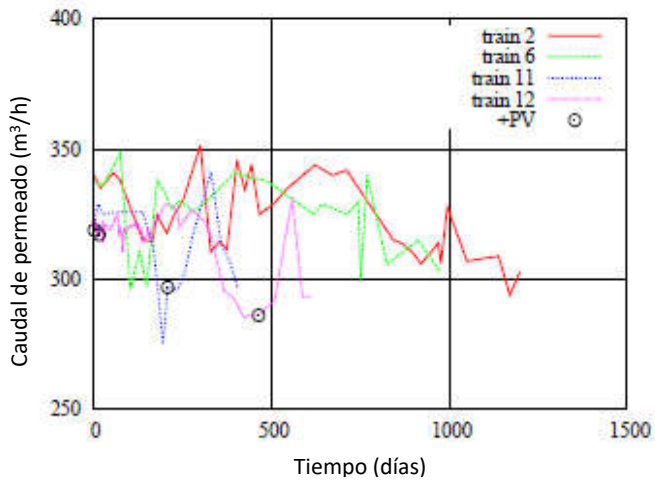


Figura 4.6. Flujo permeado en los trenes 2, 6, 11 y 12 (Membrana TM820S-400)

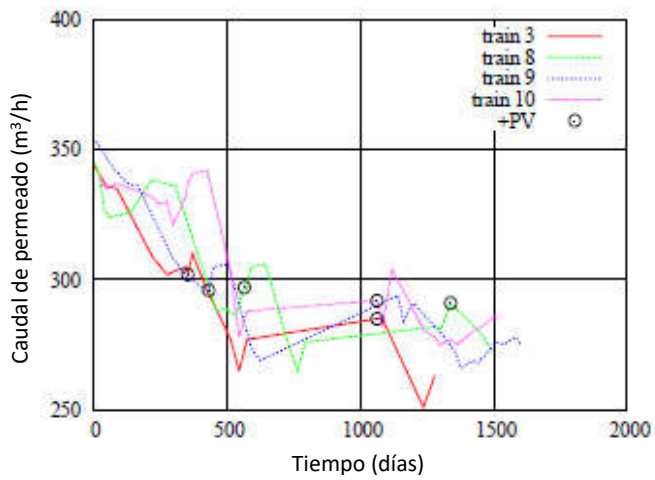


Figura 4.7. Flujo permeado en los trenes 3, 8, 9 y 10 (Membrana TM820L-440)

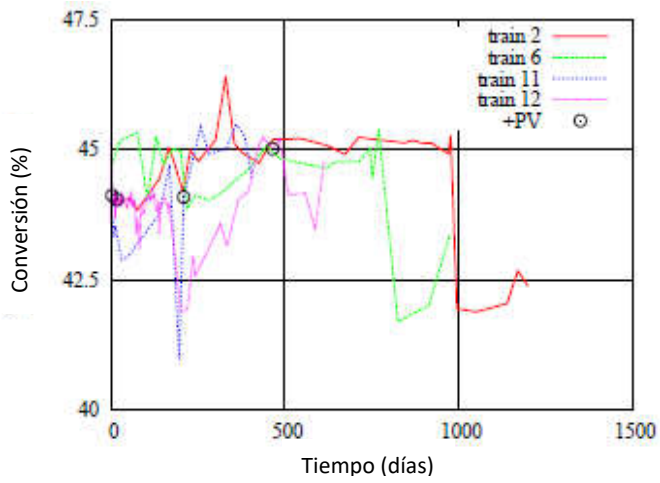


Figura 4.8. Conversión en los trenes 2, 6, 11 y 12 (Membrana TM820S-400)

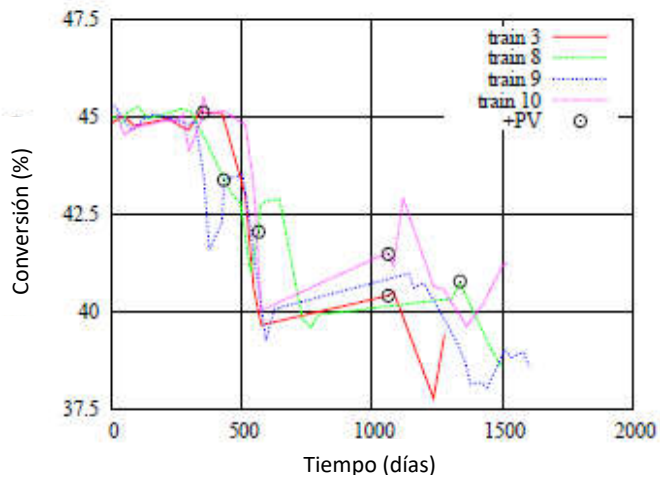


Figura 4.9. Conversión en los trenes 3, 8, 9 y 10 (Membrana TM820L-440)

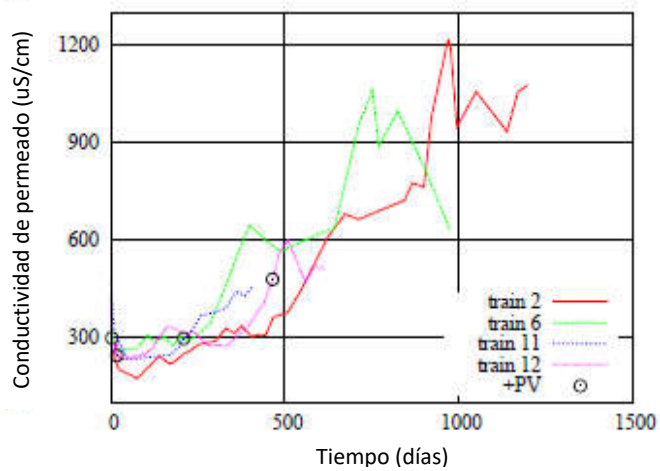


Figura 4.10. Conductividad del permeado en los trenes 2, 6, 11 y 12 (Membrana TM820S-400)

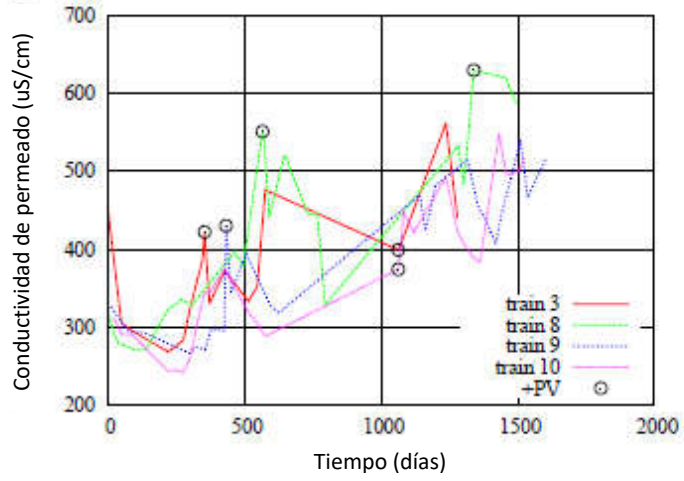


Figura 4.11. Conductividad del permeado en los trenes 3, 8, 9 y 10 (Membrana TM820L-440)

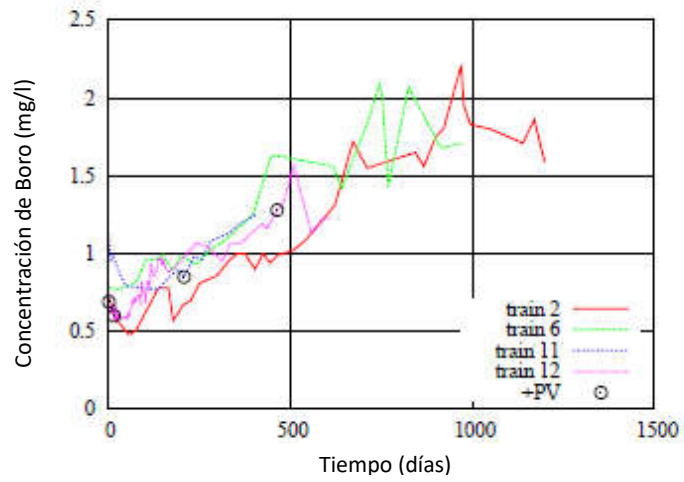


Figura 4.12. Boro del permeado en los trenes 2, 6, 11 y 12 (membrana TM820S-400)

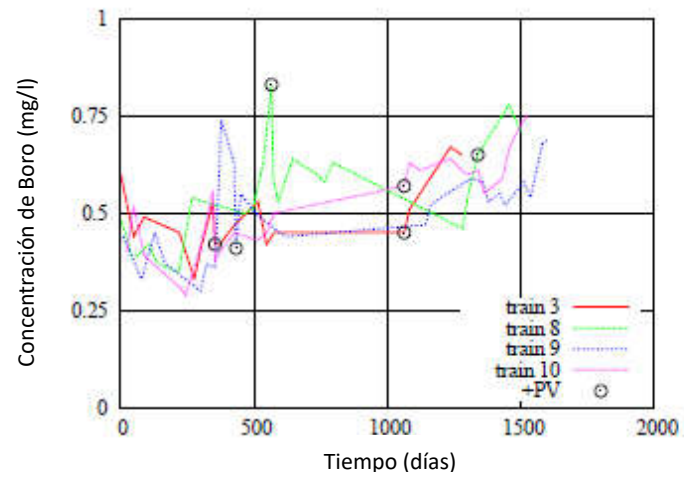


Figura 4.13. Boro del permeado en los trenes 3, 8, 9 y 10 (membrana TM820L-440)

En cuanto a los resultados que se indican en la figura 4.11 se destaca que la conductividad de permeado aumenta a medida que va pasando el tiempo, siendo ésta también un indicador del envejecimiento de las membranas en planta. Esto mismo se reafirma en la figura 4.13 donde se aprecia cómo aumenta la concentración de boro en el producto depende de la edad de la membrana. Por tanto, se confirma una pérdida en la calidad de agua producida debido al envejecimiento de las membranas a lo largo del tiempo. Esto refuerza la posición de la necesidad de hacer reemplazos periódicos de membranas para evitar un deterioro en la calidad de agua producida.

Las figuras 4.14 y 4.15 indican el flujo normalizado del producto de ambas membranas respectivamente. La membrana TM820S-400 mostró tener un comportamiento más estable que la membrana TM820L-440. Esta membrana disminuyó aproximadamente un 30% de su producción en los primeros 500 días de operación, mientras que para la membrana TM820S-400 la degradación del rendimiento fue aproximadamente del 20% a lo largo de 1000 días de operación. Sin embargo, en términos de rechazo de sales normalizado (figuras 4.16 y 4.17), la membrana TM820L-440 mostró un comportamiento más constante (alrededor del 99,5%). El rechazo de sal normalizado de la membrana TM820S-400 se deterioró de 99,6% a 99% a lo largo del tiempo de operación para los dos trenes con más tiempos de operación. Este empeoramiento en el rechazo de sales a razón que incrementa el tiempo de operación en la instalación vuelve a incidir en la necesidad de la realización de reemplazos periódicos de membranas que mantengan el rechazo de sales adecuado para obtener una calidad de aguas que cumpla los parámetros comprometidos.

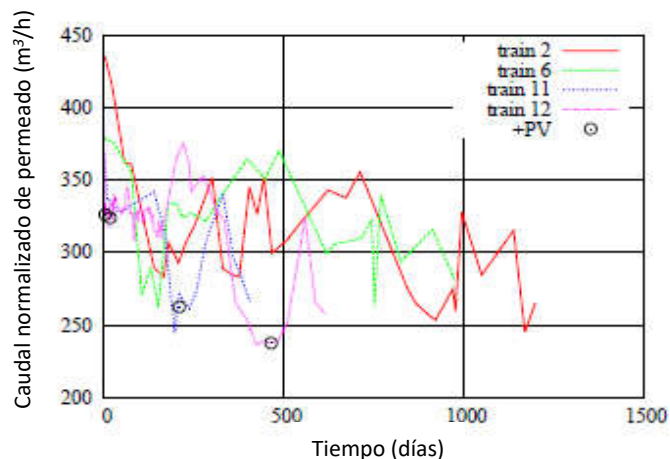


Figura 4.14. Flujo de producto normalizado de la membrana TM820S-400

Según el modelo propuesto la desviación estándar no estuvo lejos de cero para ambas membranas, teniendo en cuenta la dispersión de los datos experimentales.

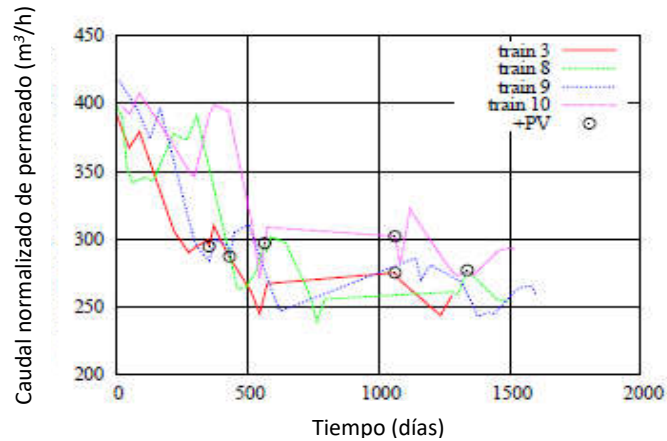


Figura 4.15. Flujo de producto normalizado de la membrana TM820L-440

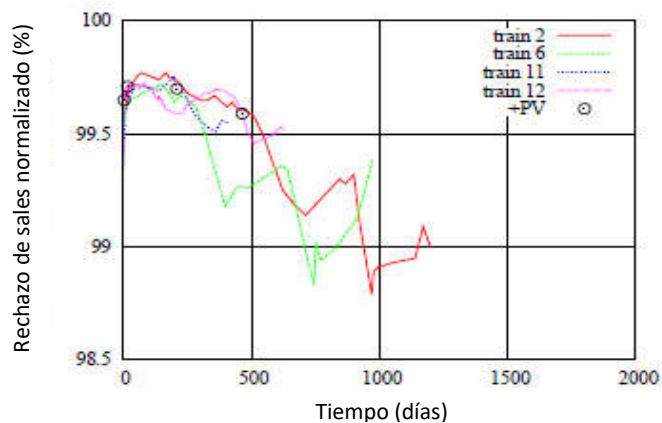


Figura 4.16. Rechazo de sal normalizado de la membrana TM820S-400

La disponibilidad de datos experimentales para la membrana TM820S-400 fue menor que para la membrana TM820L-440 debido al problema mencionado anteriormente con las articulaciones. En la figura 4.18 se indica la ratio de permeabilidad del elemento de OI TM820S-400 con toda la información al respecto. El modelo propuesto mostró un ajuste aceptable a los datos experimentales considerando su dispersión. Ambas membranas mostraron comportamiento similar, un incremento del BB con el tiempo de operación, pero con diferente pendiente. La constante de tiempo es mucho menor para la membrana TM820L-440 que para TM820S-400 debido a un rechazo de boro más estable (figuras 4.12 y 4.13). Pero el grado de incertidumbre es mayor en la membrana TM820L-440, cuyos datos están más dispersos y por lo tanto menos predecibles.

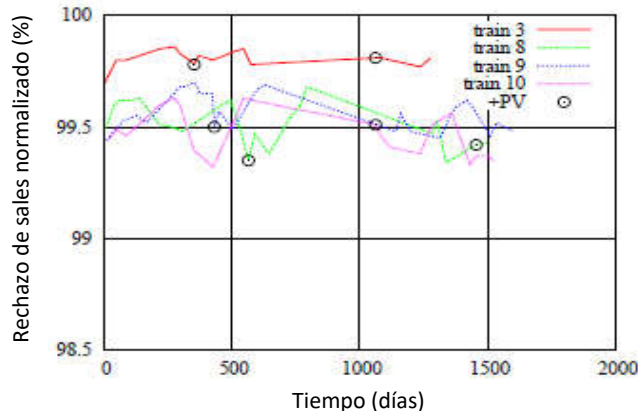


Figura 4.17. Rechazo de sal normalizado de la membrana TM820L-440

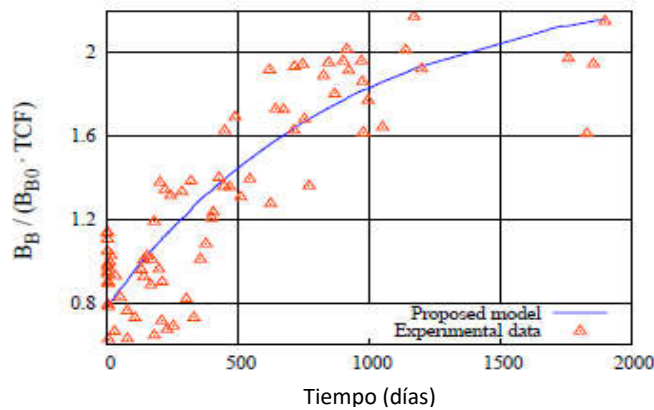


Figura 4.18. Ratio de permeabilidad de la membrana TM820S-400

Según la ecuación (3.9) que se explica en el capítulo 3, el modelo propuesto nos da como resultado las gráficas anteriores siendo las condiciones experimentales las siguientes y se muestran en la tabla 4.1 en función del tipo de membrana:

Tipo de membrana	Presión “ p_{f0} ” (MPa)	Temperatura “ T_{fb0} ” (°C)
TM820S-400	6,83	20,8
TM820L-440	6,84	24,8

Tabla 4.1. Presión, Potencia y Consumo energético a 22°C con la membrana TM820S-400

Del mismo modo, se hace un seguimiento más exhaustivo al tren 2 con membranas TM820S-400 ya que tenemos más de 1200 días de operación, aproximadamente 30000 horas de trabajo, y se puede apreciar en las figuras 4.4 y 4.6 cómo la presión va aumentando ligeramente con la edad de la membrana y el caudal de permeado bajando progresivamente de igual manera pero ambos de forma estable. Por ello se toma este tren de referencia con el objeto de comparar la situación final del mismo al cabo de ese tiempo de operación con distintos escenarios, donde introducimos un equipo recuperador de energía ERI y distintos reemplazos con el mismo modelo de membrana

existente al 10%, 15% y 20% anual. De esta manera se compara a continuación en las siguientes tablas los consumos energéticos que se dispondrían.

Como se ha comentado, estos cálculos también se han realizado introduciendo un ERI de alto rendimiento con el objeto de disminuir incluso más el consumo de energía en todos los casos, con los dos tipos de membrana de alto rechazo y bajo consumo energético. Seguidamente, se indican en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 todos los resultados con recuperador de energía y la membrana de bajo consumo energético existente en el tren 2 modelo TM820S-400, para un caudal de permeado de 300 m³/h, un 42,5% de conversión y 1200 días de operación aproximados (3,3 años). Todo ello tanto a temperatura media de 22°C, como al valor mínimo considerado (5°C por debajo) 17°C y al más alto (5°C por encima) 27°C.

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	ERI/Pelton (kW)	Booster (kW)	Energía (kWh/m³)
0	56,00	1414,55	437,00		3,259
3,3(0%R)	72,00	1818,72	563,10		4,185
3,3(10%R)	57,64	660,90	635,40	33,37	2,203
3,3(15%R)	57,78	660,20	634,60	33,35	2,201
3,3(20%R)	57,51	659,40	633,80	33,34	2,198

Tabla 4.2. Presión, Potencia y Consumo energético a 22°C con la membrana TM820S-400

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	ERI/Pelton (kW)	Booster (kW)	Energía (kWh/m³)
0	57,45	1451,57	447,70		3,346
3,3(0%R)	73,75	1863,39	576,20		4,291
3,3(10%R)	59,38	681,20	654,60	34,55	2,271
3,3(15%R)	59,28	680,10	653,40	34,54	2,267
3,3(20%R)	59,17	678,90	652,20	34,52	2,263

Tabla 4.3. Presión, Potencia y Consumo energético a 17°C con la membrana TM820S-400

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	ERI/Pelton (kW)	Booster (kW)	Energía (kWh/m³)
0	54,94	1387,61	429,20		3,195
3,3(0%R)	70,68	1785,13	553,20		4,106
3,3(10%R)	56,33	645,50	621,00	32,39	2,152
3,3(15%R)	56,29	645,10	620,60	32,38	2,150
3,3(20%R)	56,25	644,60	620,10	32,36	2,149

Tabla 4.4. Presión, Potencia y Consumo energético a 27°C con la membrana TM820S-400

Los cálculos con un 10% de reemplazo anual en 3,3 años de operación suponen una edad media de las membranas de 2,59 años, considerando un reemplazo del 15% es de 2,24 años y para un 20% la edad media estimada es de 1,88 años. En este sentido se puede apreciar cómo es más eficiente realizar reemplazos e introducir un recuperador de energía, ya que en la situación en el escenario de estudio del tren 2 a

22°C sin reemplazo el consumo energético es de 4,185 kWh/m³ teniendo en cuenta la turbina Pelton y en el caso del reemplazo del 20% con ERI el consumo energético baja casi a la mitad 2,198 kWh/m³.

En el caso de los trenes con la membrana TM820L-440 se puede apreciar que, aunque el rechazo de boro es mejor, la producción cae considerablemente a pesar de que la membrana tiene mayor superficie (440 ft²) que la anteriormente estudiada TM820S-400 de 400 ft². En la figura 4.7 se puede observar cómo la producción cae casi 100 m³/h por ejemplo en el tren 3, desde aproximadamente 350 m³/h a 250 m³/h en el mismo período de tiempo anterior de estudio unos 1200 días. En este sentido se justifica la necesidad de hacer pilotajes en planta para buscar la membrana más adecuada a nuestro sistema e intentar tener el mayor éxito posible en la elección de la misma, ya que tiene incidencia directa en el posterior rendimiento de la planta y en su consumo energético.

Del mismo modo, como se explicó en el capítulo 3, se calcula la huella de carbono y la huella ecológica con la membrana TM820S-400 escogida de bajo consumo energético. Esto se realiza para los casos a 3,3 años sin reemplazo con los datos de planta, con un 10% de reemplazo anual en estos 3,3 años, un 15% y un 20% a las tres temperaturas consideradas (22°C, 17°C y 27°C), como se muestra a continuación en la tabla 4.5. Para todo ello hemos tenido en cuenta el factor mix de Península regido por Red Eléctrica Española, S.A. [122].

Huella de Carbono (HC) kgCO₂/m³ y Huella Ecológica (HE) m²/m³			
Temperatura	T = 22°C	T = 17°C	T = 27°C
HC 3,3 años 0%	0,9863	1,0119	0,9674
HC 3,3 años 10%	0,7237	0,7443	0,7085
HC 3,3 años 15%	0,7235	0,7437	0,7082
HC 3,3 años 20%	0,7231	0,7432	0,7081
HE 3,3 años 0%	4,8330	4,9583	4,7402
HE 3,3 años 10%	3,5462	3,6468	3,4715
HE 3,3 años 15%	3,5449	3,6442	3,4702
HE 3,3 años 20%	3,5430	3,6416	3,4696

Tabla 4.5. Huella de Carbono y Ecológica con la membrana TM820S-400

4.3 RESULTADOS GENERALES PARA EL CASO DE LA PLANTA DESALINIZADORA DE CARBONERAS

En la actualidad, uno de los objetivos más importantes de los suministradores de elementos de OI es incrementar el rendimiento en términos energéticos. Éste es un ejemplo de la realización correcta de pilotajes previos para la elección óptima de la membrana en planta. Con la realización de pilotajes se busca encontrar la mejor

combinación de membranas y reducir las emisiones. Como se puede ver en el conjunto de datos es una herramienta útil de trabajo para optimizar los resultados de eficiencia energética de las plantas.

Normalmente, las condiciones de testeo de los diferentes fabricantes no resultan muy fiables por estar alejadas de las condiciones de operación reales de las instalaciones desalinizadoras de agua marina. Este caso tuvo como objetivo la construcción de una planta piloto para el testeo de tres módulos de membrana de distintos fabricantes. Se estudiaron tanto el decremento de flujo de permeado con el tiempo de operación, como el rechazo de sales bajo distintas condiciones de operación para los tres elementos de membrana. Las condiciones de operación a las que fueron sometidas las membranas fueron similares a las supuestas en la planta a escala real donde iban a ser instaladas. El tiempo de testeo fue de dos meses, trabajando 24 horas al día, los siete días de la semana. En cuanto a los resultados obtenidos de los tres elementos de OI testeados, podemos confirmar después de la experiencia que una de ellas tenía menor caudal de permeado y calidad de aguas desde el principio por lo que quedó descartada. Sin embargo las otras dos membranas mantuvieron un flujo constante, una aceptable calidad de aguas y un rechazo de boro mucho mejores que lo actualmente operado en planta. El caudal producto de una de ellas se mantuvo casi constante en el tiempo durante el pilotaje a la misma presión de trabajo que el resto, lo que trajo consigo una reducción del consumo energético que era el objetivo planteado. De esta manera, concluimos que el reemplazo de membranas de última generación nos ayudará a reducir los costes energéticos de la instalación superando la demanda de agua existente con la calidad exigida por el Real Decreto 140, al igual que la optimización de los procesos en planta introduciendo mejoras en la recuperación de energía, captación y procesos auxiliares de la misma.

La construcción de la nueva toma de agua de mar en la planta de desalación de osmosis inversa localizada en Almería (España) terminó en mayo de 2011. Para este momento, la captación de agua está localizada a 35 m de profundidad, en vez de a 14 metros de la entrada anterior. El resultado más significativo ha sido el nuevo escenario termal con temperaturas inferiores máximas y más estables en el tiempo. Debido a las temperaturas inferiores máximas mientras las mínimas permanecen iguales, la presión para la calidad de agua cumple los requisitos de alcanzar las temperaturas que han disminuido. Por lo tanto, las nuevas oportunidades de desarrollo de diseño y operaciones han aparecido. Teniendo en cuenta el reemplazo de membrana y los proyectos readaptados son acerca de venir a esta planta de desalación, y bajo este nuevo escenario termal han desarrollado una prueba piloto. Por un lado, la propuesta

de este estudio era para comparar la actuación de las diferentes membranas fabricadas, y por otro lado, para determinar la configuración óptima de la membrana y las condiciones de operación capaces de lograr la calidad de aguas, la cantidad necesaria de ésta, bajo las nuevas condiciones de trabajo y el diseño de la prueba piloto. La mejor opción ha sido determinar, teniendo en cuenta la inversión contra el coste de operación (energía) [16].

Respecto a los estudios de otros autores sobre el rendimiento energético de una desaladora de OI con presión variable [102-106, 108-112]; sobre la eficacia de desalación en los diferentes artículos recientes, nosotros continuamos trabajando, investigando en una desalinizadora real completa por osmosis inversa de agua de mar (SWRO) siguiendo los siguientes puntos, gracias a la información comparada con Acuamed.

El objetivo de este estudio es el diseño de una prueba piloto para monitorizar la modificación en el consumo de agua de mar en una planta de producción. Gracias a esta mejora, se intenta conseguir el mínimo coste en consumo de energía para la operación de una planta de desalación a SWRO. Las actuaciones de las diferentes membranas de tres fabricantes son comparadas a fin de determinar la calidad del agua, bajo el nuevo escenario termal, desde el análisis de la conductividad de la electricidad y la temperatura, principalmente.

La figura 4.19 muestra el nuevo escenario termal, más estable desde la toma de agua marina, cambiando a 35 metros de profundidad la toma de agua de mar inicial de 14 metros de profundidad.

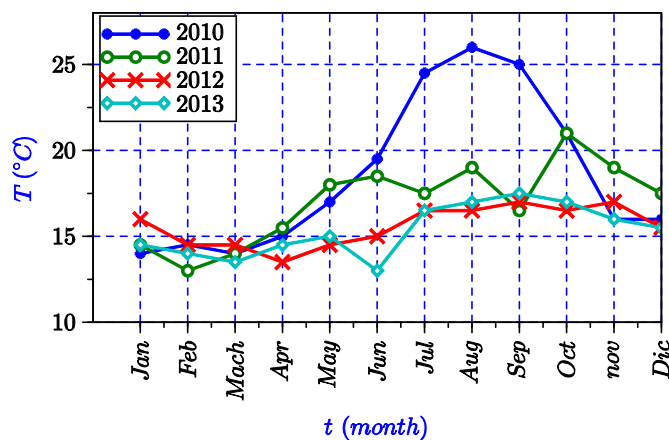


Figura 4.19. Temperatura (°C) mensual de agua salada bruta de 2011 a 2013

El propósito de este estudio fue, por una parte, comparar el rendimiento de las membranas de los diferentes fabricantes, y por el otro lado, determinar la configuración óptima de la membrana, requerida para conseguir la calidad y cantidad de agua necesarias bajo las nuevas condiciones térmicas de captación de agua.

Descripción de la prueba piloto

La prueba piloto desarrollada consta de tres HPV envejecidos (recipientes de alta presión) y un HPV de prueba.

Descripción de envejecimiento de un HPV

El envejecimiento del HPV consiste en tres recipientes de alta presión. Los recipientes son equipados con una válvula de control, un transmisor de presión y un caudalímetro en el flujo de permeado. Otros instrumentos del bastidor proporcionaron la información necesaria para el adecuado monitoreo del HPV envejecido. El objetivo del envejecimiento del HPV era lograr un rendimiento maduro de las membranas, en la figura 4.20 se muestra el diagrama el envejecimiento del HPV. Durante estos procesos de envejecimiento, dos meses, los principales parámetros de rendimiento ha sido controlada.

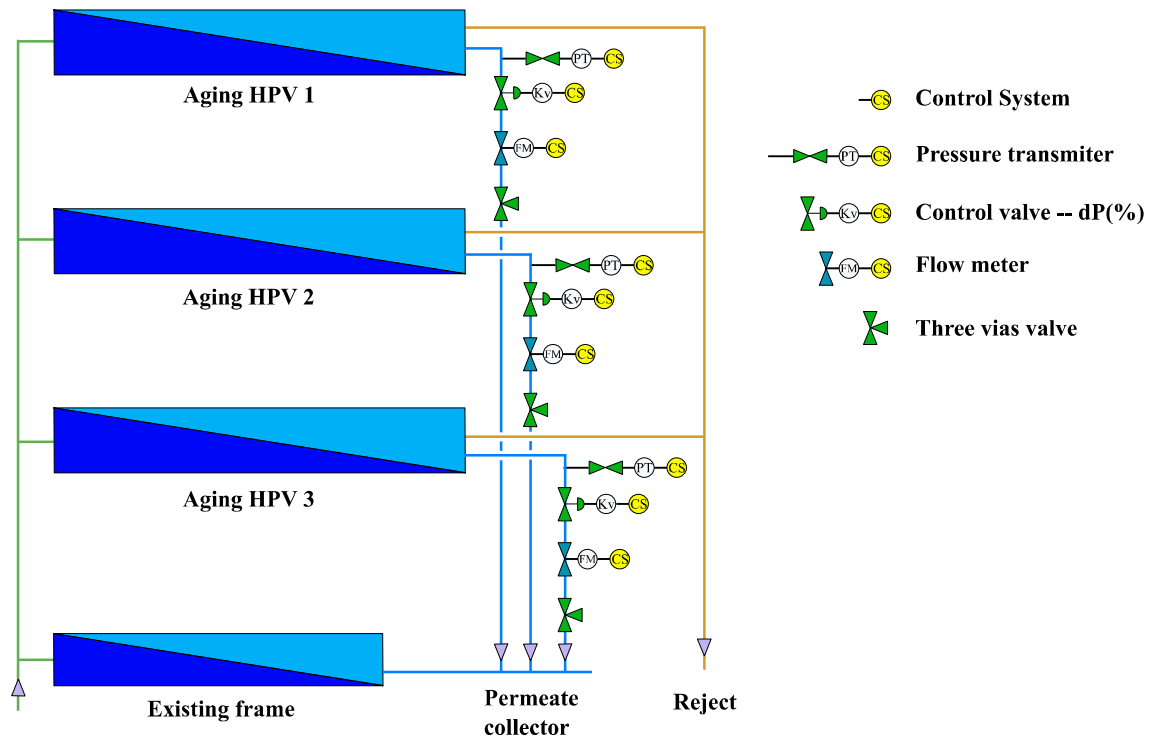


Figura 4.20. Diagrama de envejecimiento del HPV

Los tres recipientes de presión (envejecimiento HPV) están instalados en paralelos con los otros recipientes del tren. Se introduce el mismo flujo de alimentación y la misma presión de alimentación para los tres recipientes de presión.

Las membranas de tres fabricantes han sido ensayadas (A, B y C), los detalles de las membranas se muestran en la tabla 4.6.

Modelo A	Número de elementos	Caudal medio	Rechazo de sales medio
...R-440	7	33,2	99,85
Modelo B	Número de elementos	Caudal medio	Rechazo de sales medio
...440-R	7	36,9	99,78
Modelo C	Número de elementos	Caudal medio	Rechazo de sales medio
...R-440	4	24,8	99,85
...X440	3	35,4	99,63

Tabla 4.6. Detalles de membranas

Como se muestra en la tabla 4.6, las membranas del modelo C han sido instaladas en una configuración híbrida, con siete elementos equipados con cuatro del modelo R-440 y con tres del modelo X-440, siete elementos con membranas del modelo A, y finalmente siete elementos con membranas del modelo B. Estas membranas han sido usadas para el envejecimiento HPV y la prueba HPV.

Metodología de envejecimiento HPV e instrumentación.

A fin de probar los tres recipientes a presión de envejecimiento se fija la misma presión de alimentación para cada recipiente.

Debido a estos tres recipientes de presión de envejecimiento han instalado una válvula de control para la presión Delta, junto una transmisión de presión, medidor de corriente, sistema de control y una válvula de tres vías, en el tubo de permeado. Esto es a presión baja así que no es un gran coste para la investigación.

Debe fijarse el mismo flujo de permeado por recipiente de envejecimiento, y esto es posible con una contrapresión. De este modo, la válvula de presión de envejecimiento con la presión de permeado más alta es el que tiene menor consumo de energía. Es necesaria más contrapresión a fin de conseguir el mismo flujo de permeado de los demás. De este modo, es posible determinar el tipo más eficiente de membrana de osmosis inversa. Si todos los recipientes de los trenes tenían esta condición, con este tipo de membrana de la contrapresión más alta, esto sería posible para operar con una presión de alimentación más alta que ahora, ahorrando costes de energía, o produciendo más agua a la misma presión de alimentación que ahora.

Por lo tanto, con este estudio, se logra la membrana más eficiente de osmosis inversa, bajo estas condiciones de operación de la planta.

La prueba HPV consiste en un recipiente equipado con todos los elementos necesarios a fin de una monitorización completa y control de condiciones operativas (presión y flujo del agua de mar, salmuera y flujo de permeado).

La prueba HPV estaba equipada con:

- Alimentación del flujo de agua de mar.
- o Una válvula de control en la entrada HPV para el control del flujo y presión de agua,
- o Un transmisor de presión,
- o Un transmisor de caída de presión
 - Flujo de permeado.
- o Un caudalímetro
- o Un transmisor de presión (el del estante a escala completa)
 - Flujo de salmuera.
- o Tres válvulas, a fin de controlar el flujo de salmuera y hacer adecuadamente la descarga de salmuera desde 65 bares de presión atmosférica.
- o Un caudalímetro

El flujo de alimentación se calculó sumando los caudales de salmuera y de permeado. La prueba HPV fue diseñado con el fin de hacer posible la prueba de los tres tipos de membrana, cada una de cada fabricante, bajo cualquier condición. El diagrama de la HPV se muestra en la figura 4.21. Cualquier parámetro de operación (presión o flujo) podría modificarse por las válvulas de control, y cada parámetro principal (presión, flujo y calidad del agua) podría medirse.

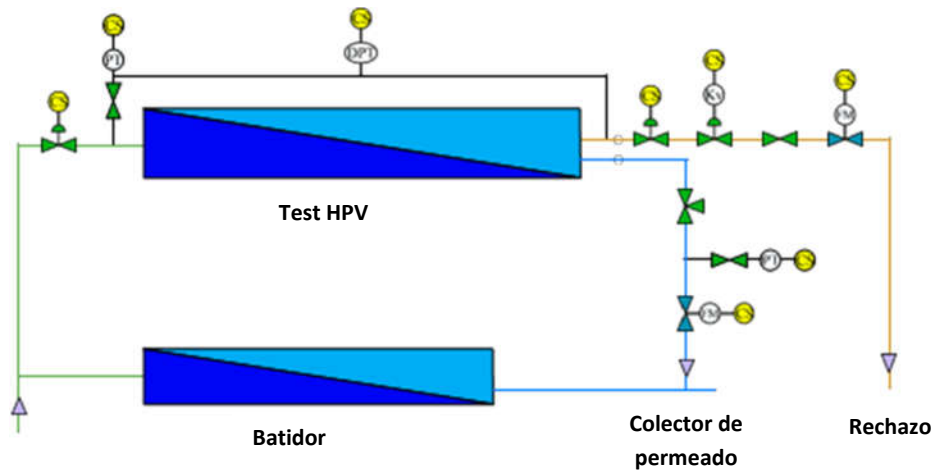


Figura 4.21. Diagrama de prueba test del HPV

Las membranas ensayadas, para determinar su rendimiento, han sido sometidas a las mismas condiciones operativas (presión, flujo y temperatura).

Además, ha sido instalado en la tubería de permeado: un caudalímetro, un transmisor de presión, y una válvula de tres vías. Además, ha sido instalado instrumentos en la tubería de salmuera (tres válvulas y un caudalímetro) y en la tubería de alimentación (un transmisor de presión, un transmisor de caída de presión y una válvula de control para la presión y controlar el flujo de agua).

Bajo estas condiciones, es posible probar los tres modelos diferentes de membranas de osmosis inversa bajo condiciones reales, cambiando la presión de alimentación o el flujo de alimentación, con el fin de conseguir el caudal producto y también la variación de la recuperación del sistema. Después de esta prueba piloto y con la información de los recipientes de envejecimiento, se pueden obtener esquemas deferentes de la eficacia de cada membrana, con el fin de seleccionar el elemento más eficaz.

Además, debe tenerse en cuenta la calidad de permeado para cada tipo de membrana, porque se debe producir agua con TDS inferior a 400mg/l y con boro menor 1mg/l. Si todas las membranas están bajo estos parámetros, es posible seleccionar la más eficiente, que produce el caudal nominal con menor consumo de energía.

Todo el proceso estaba monitorizado en una pantalla desarrollada "ad hoc" en el SCADA de la planta de escala completa.

Secuencia de envejecimiento HPV y la prueba HPV:

Con el fin de reunir la información necesaria, ha sido establecido el programa analítico, como se muestra en las tablas 4.7 y 4.8.

PROGRAMA ANALÍTICO DEL ENVEJECIMIENTO HPV				
Parámetro	Alimentación	Permeado	Rechazo	Frecuencia
Caudal de	-*	✓	-*	Continua por SCADA
Presión	✓ (rack/HPV)	✓	✓	Continua por SCADA
Calidad				
SDI	✓			8 h
Temperatur	✓	✓		Diaria por trabajador / Continua por SCADA
Conductivid	✓	✓	✓	Diaria por trabajador / Continua por SCADA
pH	✓	✓	✓	Diaria por trabajador / Continua por SCADA
Boro	✓	✓		Alimentación diaria / Permedo semanal
Otros	✓	✓	✓	mensual
* Only average feed/brine rack average				

Tabla 4.7. Programa analítico del envejecimiento HPV

PROGRAMA ANALÍTICO DEL TEST HPV				
Parámetro	Alimentación	Permeado	Rechazo	Frecuencia
caudal de agua	✓	✓	✓	Continua por SCADA
Presión	✓	✓	✓	Continua por SCADA. Disponible ΔP
Calidad				
SDI	✓			8 h
Temperatura	✓	✓		Diaria por trabajador / Continua por SCADA
Conductividad	✓	✓	✓	Diaria por trabajador / Continua por SCADA
pH	✓	✓	✓	Diaria por trabajador / Continua por SCADA
Boro	✓	✓		Alimentación diaria / Permedo semanal
Otros	✓	-	✓	mensual
Test HPV		✓		170 h (semanal)

Tabla 4.8. Programa analítico del test HPV

Los experimentos han sido realizados de acuerdo con el calendario.

- Dos meses seguidos en el envejecimiento HPV que ejecutan los tres HPV simultáneamente. Durante este periodo, las membranas han sido monitorizadas y envejecidas simultáneamente y bajo las mismas condiciones antes de empezar a ser ensayadas.

- Dos semanas seguidas en la prueba HPV. Las membranas de cada fabricante han sido cargadas y probadas en la prueba HPV con el fin de determinar el rendimiento bajo condiciones específicas. Los resultados entre diferentes fabricantes de membranas han sido comparados bajo las mismas condiciones experimentales (presión, flujo, temperatura), como los experimentos han sido realizados alternativamente en la prueba HPV.

El bucle de dos meses de envejecimiento y dos semanas de periodos de pruebas se han repetido durante toda la prueba piloto. Un aspecto clave en la definición del proceso fue el modelo hidráulico y la elección de las válvulas que conducirían un control

adecuado del sistema. Así, se ha desarrollado un estudio detallado siguiendo los siguientes pasos:

1. Definición del entorno: definición del criterio operativo y valores de los parámetros principales bajo condiciones de pruebas extremas.
2. Estudio hidráulico: según las condiciones operativas se necesita un estudio hidráulico desarrollado.

En este estudio ha sido diseñado el sistema de tuberías. También ha sido elegido el control de válvulas con el fin de cumplir los requisitos de control de la prueba piloto.

Resultado del consumo de agua de mar:

Después de la nueva construcción de consumo de agua de mar, las temperaturas son más estables, la presión de alimentación bajó 2-3 bares, por lo tanto, el consumo eléctrico también. La eficacia energética es una de los temas más importantes ya que el precio energético había aumentado más del 25% en los últimos 10 años en España lo que representa el 50% de los costes operativos de una planta de desalación. Además, mejora la práctica en la contratación de la energía ha sido ampliada a fin de minimizar el coste adquisitivo de la energía, cualquier reducción significativa del consumo específico conduciría a importantes ahorros económicos. Por lo tanto, el diseño de la configuración de la membrana óptima es un factor clave para la eficacia energética de la planta de desalación.

El interés del trabajo es diseñar una prueba piloto a fin de comparar la actuación de los diferentes modelos de membranas, bajo este escenario termal, y determinar la principal contribución aplicable a todas las plantas de desalación con la configuración más rentable para obtener más calidad y cantidad de agua al mínimo consumo energético.

Debido a las inferiores temperaturas máximas (las mínimas temperaturas permanecen iguales), la presión para la calidad de agua cumple los requisitos de alcanzar las temperaturas que han disminuido. Por lo tanto, aparecen nuevas oportunidades de diseño y operaciones. Teniendo en cuenta que los proyectos de reemplazo de membrana y readaptación están a punto de venir a esta planta de desalación, y bajo este nuevo escenario termal, la prueba piloto ha sido desarrollada. Debido a esta prueba piloto, el consumo energético se reduce debido a esta prueba de membrana de alta eficacia.

Por otro lado, determinar la configuración de la membrana óptima y las condiciones de operaciones capaces de lograr la calidad y cantidad de agua necesarias bajo las nuevas

condiciones de admisión térmica. La mejor opción tiene que ser determinado, teniendo en cuenta, la inversión contra la operación y el coste energético.

En la figura 4.22 se muestra los resultados del envejecimiento HPV, comparando la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y la conductividad del permeado ($\mu\text{S}/\text{cm}$) para los tres elementos RO que prueban. La presión de alimentación es 69,9 bares, con una desviación de 0,4 bares, funcionando durante 151 días, y con un flujo de permeado fijado en $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$.

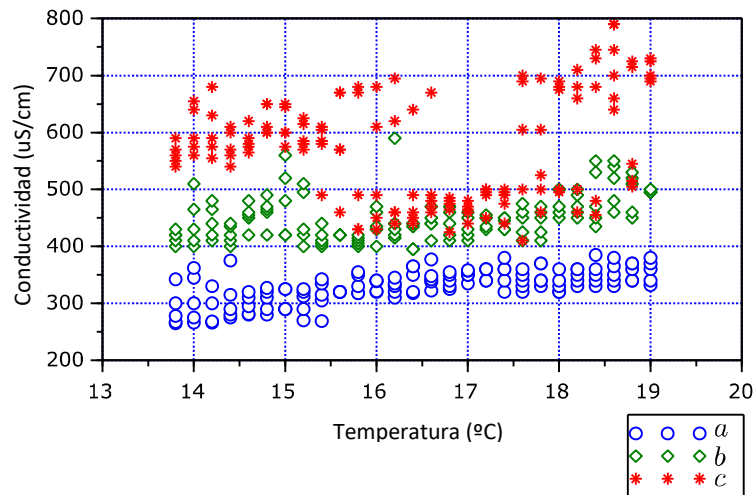


Figura 4.22. Conductividad del permeado durante el escenario de envejecimiento

Dado que el objetivo de la etapa de envejecimiento era adquirir un rendimiento maduro de las membranas y puesto que un control limitado de los parámetros de operación era posible, los resultados mostraron una aproximada (Pero no precisa) visión del comportamiento de la membrana. Como se muestra en la figura 4, la conductividad de las membranas, las membranas del tipo A son las más bajas, seguidas por las del tipo B, y las del tipo C (para una presión de alimentación homogénea, calidad del agua y condiciones de temperatura de alimentación).

En la figura 4.23 se muestra los resultados del envejecimiento HPV para el recipiente de presión con membranas del tipo A (conductividad más baja) y datos de proyección, comparando también la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y la conductividad del permeado ($\mu\text{S}/\text{cm}$) a la misma presión de alimentación y flujo de permeado fijado. Los resultados son incluso mejores que los datos de proyección, así que entendemos que hay un factor de seguridad incluyendo en el software. La conductividad del permeado es un poco más baja que los datos de proyección y ambos siguen el mismo modelo que incrementan las membranas del tipo.

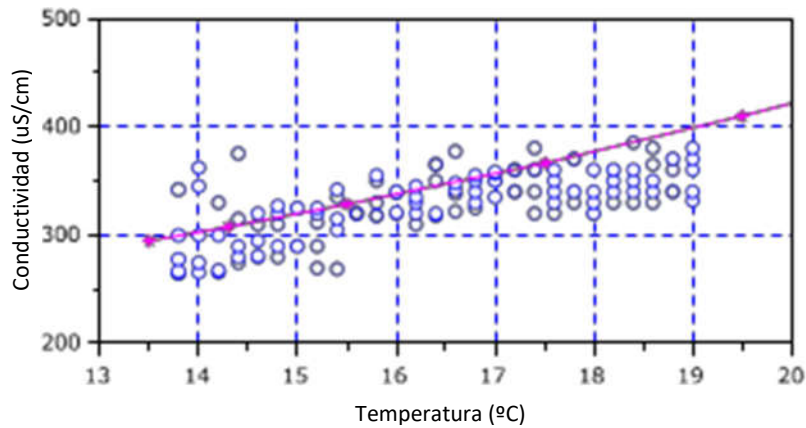


Figura 4.23. conductividad de permeado de la membrana-A durante la etapa de envejecimiento y los datos de proyección

La figura 4.24 muestra los resultados de la prueba HPV, comparando temperatura (°C) y la conductividad de permeado (uS/cm) para los tres elementos RO ensayados con un flujo de permeado fijado en 4,05 m³/h.

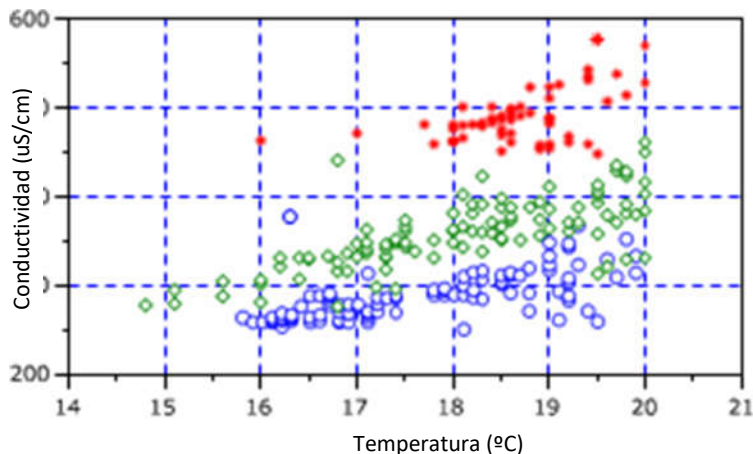


Figura 4.24. Conductividad de permeado durante la etapa de prueba

Como se muestra en la figura 4.24, la conductividad que se ha medido de las membranas-A fue la más baja, seguidas por las membranas-B (24% más alta) y membranas-C (64% sobre las membranas-B). La conductividad durante la etapa de ensayo fue más baja que la conductividad durante la etapa de envejecimiento para la misma temperatura, ya que el flujo de permeado en la etapa de ensayo fue mayor.

En la figura 4.25 se muestra los resultados del ensayo HPV para el recipiente a presión con membranas-A (conductividad más baja) y los datos de proyección, comparando también la temperatura (°C) y la conductividad de permeado (uS/cm) con el flujo de permeado fijado a 4,05 m³/h. Los resultados son otra vez mejores que los datos de proyección, la conductividad de permeado es más baja que los datos de proyección.

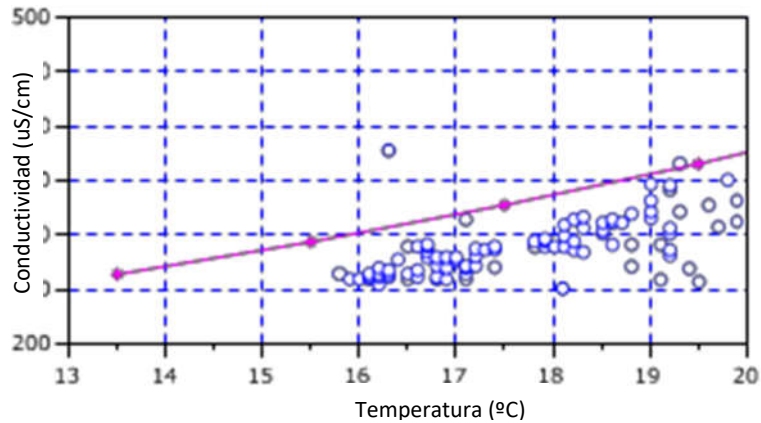


Figura 4.25. Conductividad de permeado de las membranas-A durante la etapa de ensayo y los datos de proyección

Comparando resultados de la planta piloto con otros investigadores [2,9], podemos confirmar que las membranas A son muy eficientes en cuanto a la calidad de permeado y rechazo de sales totales disueltas (STD) con datos tomados en campo de entre 125 mg/l and 273 mg/l, i.e. Conductividad [250 uS/cm, 390 uS/cm]. Las membranas B están también en una mejor posición y las membranas C tienen un STD a un poco mayor que las anteriores.

La figura 4.26 muestra la presión de alimentación requerida para producir el valor de caudal de permeado nominal a diferentes Temperaturas del agua de alimentación.

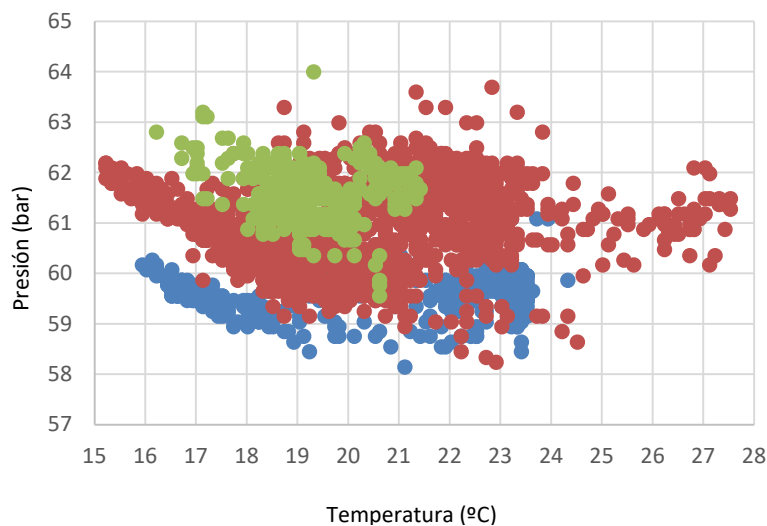


Figura 4.26. Evolución de la Presión de Alimentación durante la fase de pilotaje

Los resultados muestran los requisitos de presión de alimentación para conseguir la producción nominal. La presión es proporcional al consumo energético y por ello comparamos en la tabla 4.9 los valores de ésta a una misma Temperatura en un rango de 20°C (>19°C y <21°C), como se muestra a continuación:

Presión de alimentación (bar)	Membranas A	Membranas B	Membranas C
Media	59,6	60,7	61,4
<i>Desviación Estándar</i>	<i>0,64</i>	<i>0,87</i>	<i>0,52</i>
<i>Temperatura media</i>	<i>19,9</i>	<i>20,0</i>	<i>19,7</i>

Tabla 4.9. Presión de alimentación (bar) a Temperatura en torno a 20°C

Los diferentes resultados de presión requerida nos indican un consumo energético proporcional a cada uno de ellos. La relación entre la presión y los requisitos de consumo siguen una relación lineal, por lo que los requisitos de presión para las membranas B son un 2% mayor que para las membranas A y respecto a las membranas C un 3% mayor que las membranas A.

La figura 4.27 muestra los valores de conductividad de permeado a diferentes Temperaturas de alimentación para los tres tipos de membranas en estudio.

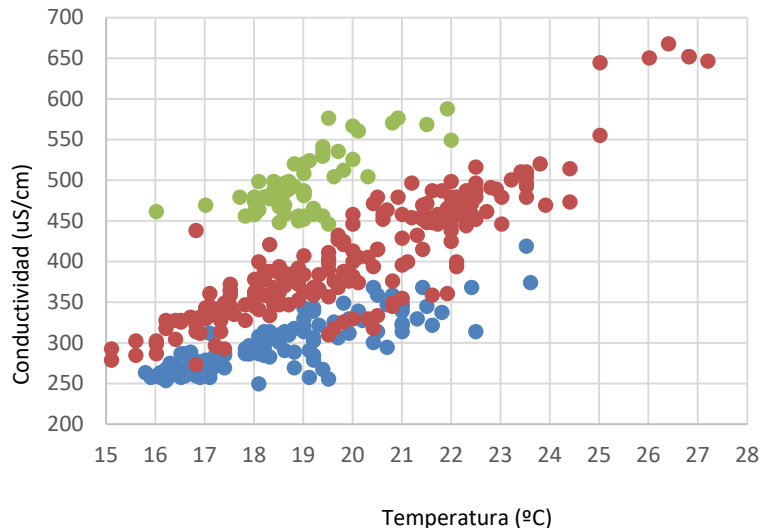


Figura 4.27. Evolución de la conductividad con la Temperatura durante la fase de pilotaje

La conductividad durante la etapa de pilotaje fue más baja que la tomada durante la fase de envejecimiento de las membranas, para la misma Temperatura, debido a que el caudal de permeado durante el test fue mayor.

La tabla 4.10 muestra los valores de conductividad media en un rango de 20°C (>19°C y <21°C):

Conductividad (µS/cm)	Membranas A	Membranas B	Membranas
Media	319,3	394,6	522,9
<i>Desviación Estándar</i>	<i>32,49</i>	<i>45,4</i>	<i>42,4</i>
<i>Temperatura media (°C)</i>	<i>19,8</i>	<i>20,0</i>	<i>19,7</i>

Tabla 4.10. Conductividad de permeado media en un rango de 20 °C

Los resultados muestran que la conductividad más baja corresponde a las membranas A, seguidas de las membranas B (24% más alta) y las membranas C (un 64% por encima de las membranas B).

La figura 4.28 muestra la concentración de boro en el permeado a diferentes Temperaturas. Es importante apuntar que sólo hay disponibles tres valores de boro para la membrana A debido a un problema con el método analítico para calcularlo, por lo que no fueron considerados.

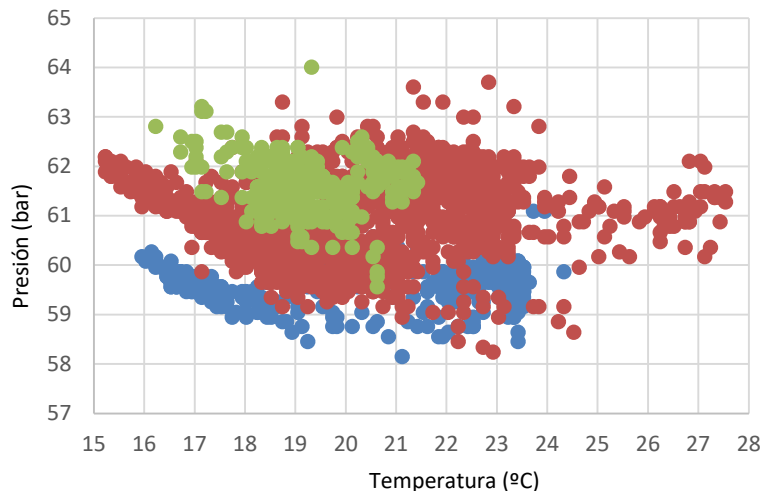


Figura 4.28. Evolución de la presión de alimentación a diferentes Temperaturas en la fase de pilotaje

La Tabla 4.11 muestra los valores medos de boro en un rango de 18°C (>17°C y <19°C):

Boro (mg/l)	Membranas A	Membranas B	Membranas C
Media	0,8	0,6	0,9
Desviación Estándar	0,02	0,04	0,03
Población	2	6	11
Temperatura media (°C)	17,7	17,8	18,5

Tabla 4.11. Valor medio de boro en el producto en un rango de 18 °C

Los resultados muestran que el rechazo de boro en las membranas B es mejor que en las membranas A (con concentración de Boro en el permeado de un 21% por encima que en las membranas B) y las membranas C (con concentración de Boro en el permeado de un 21% por encima que en las membranas B).

Se ha profundizado en el pilotaje con las tres marcas de membranas con objeto de estudiar el consumo energético después del mismo, es decir, posteriormente a 151 días de envejecimiento más 2 meses de pilotaje haciendo un total de 211 días de operación, es decir, 0,58 años. Además, se estiman los resultados que obtendríamos a los 5 años

de funcionamiento con estos tipos de membranas sin reemplazo y con reemplazo del 10%, 15% y 20% anual acumulativo; considerando tanto la turbina Pelton disponible actualmente, como la opción potencial de introducir recuperadores de energía ERI en el mejor de los escenarios de ahorro energético a un 20% de reemplazo anual durante 5 años. Para ello se toman los valores medios de temperatura y presión mostrados en la figura 4.4. De esta manera se compara en las siguientes tablas los consumos energéticos que se dispondrían.

Se muestran a continuación en las tablas 4.12, 4.13 y 4.14 todos los resultados con turbina Pelton y recuperador de energía ERI, con las diferentes membranas de bajo consumo energético de los tres fabricantes, para un caudal de permeado de 3,6 m³/h, un 44,3% de conversión y 211 días de operación aproximados (0,58 años) a temperatura media según la tabla 4.9 de datos en planta.

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	Pelton/ERI (kW)	Energía (kWh/m³)
0,58	59,60	17,31	5,17	3,372
5(0%R)	61,56	17,88	5,34	3,483
5(10%R)	60,98	17,71	5,29	3,450
5(15%R)	60,67	17,62	5,26	3,432
5(20%R)	60,34	17,52	5,23	3,414
5(20%ERI)	61,63	8,45	7,56	2,346

Tabla 4.12. Presión, Potencia y Consumo energético con la marca de membrana A

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	Pelton/ERI (kW)	Energía (kWh/m³)
0,58	60,70	17,63	5,27	3,434
5(0%R)	62,66	18,20	5,44	3,544
5(10%R)	62,07	18,03	5,39	3,511
5(15%R)	61,76	17,94	5,36	3,494
5(20%R)	61,44	17,84	5,33	3,476
5(20%ERI)	62,73	8,59	7,70	2,386

Tabla 4.13. Presión, Potencia y Consumo energético con la marca de membrana B

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	Pelton/ERI (kW)	Energía (kWh/m³)
0,58	61,40	17,83	5,32	3,473
5(0%R)	63,40	18,40	5,50	3,585
5(10%R)	62,80	18,23	5,45	3,552
5(15%R)	62,49	18,14	5,42	3,534
5(20%R)	62,16	18,04	5,39	3,515
5(20%ERI)	63,45	8,68	7,78	2,412

Tabla 4.14. Presión, Potencia y Consumo energético con la marca de membrana C

Los cálculos con un 10% de reemplazo anual en 5 años de operación suponen una edad media de las membranas de 3,50 años, considerando un reemplazo del 15% es de 2,75 años y para un 20% la edad media estimada es de 2,00 años. En este sentido se puede apreciar cómo es más eficiente la membrana tipo A que el resto, realizar reemplazos e

incluso si es posible en un futuro introducir un recuperador de energía. Se puede observar que en la situación en el escenario de estudio del pilotaje a temperatura media sin reemplazo con 5 años de operación y la marca membranas tipo C, el consumo energético es el peor de los casos de 3,585 kWh/m³ de agua producida teniendo en cuenta la turbina Pelton. Por otro lado, en el escenario más favorable con membrana A y un 20% de reemplazo anula con ERI, el consumo energético baja casi a la mitad 2,346 kWh/m³.

Del mismo modo, como se explicó en el capítulo 3, se calcula la huella ecológica y del carbono. Esto se realiza para el caso de menor consumo de energía con la marca de membrana A y mayor consumo de energía con la marca de membrana C, utilizando los valores medios de consumo de energía entre el año 0 y 5 con y sin reemplazo, como se muestra a continuación en la tabla 4.15. Para todo ello hemos tenido en cuenta el factor mix de Península regido por Red Eléctrica Española, S.A. [122].

Huella del Carbono (HC) kgCO₂/m³ y Huella Ecológica (HE) m²/m³		
Tecnología	Membrana A	Membrana C
HC 5 años 0%	0,9083	4,4506
HC 5 años 10%	0,9039	4,4292
HC 5 años 15%	0,9015	4,4175
HC 5 años 20%	0,8991	4,4058
HC 5 años 20% ERI	0,7576	3,7124
HE 5 años 0%	4,4507	21,8079
HE 5 años 10%	4,4291	21,7031
HE 5 años 15%	4,4174	21,6458
HE 5 años 20%	4,4056	21,5884
HE 5 años 20% ERI	3,7122	18,1908

Tabla 4.15. Huella del Carbono y Huella Ecológica para los casos de menor y mayor consumo energético

4.4. OBTENCIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN PARA EL CASO DE LAS ISLAS CANARIAS

Cada territorio en función de su tipo de red de energía eléctrica va a tener un mix energético y con ello un factor de emisión de CO₂ (FM) por cada kWh producido. Se utiliza la propuesta metodológica para la determinación del factor de emisión a partir del mix energético de cada isla y sus diferencias ente sí, como se puede apreciar en la figura 4.15.

Potencia instalada en Canarias (MW)							
Tecnología	Gran Canaria	Tenerife	Lanzarote	Fuerteventura	La Palma	La Gomera	El Hierro
Turbina Vapor	280,0	240,0	-	-	-	-	-
Motor Diésel	84,0	84,0	169,8	107,9	82,8	21,2	14,9
Turbina Gas	173,5	265,7	62,5	79,1	22,5	-	-
Ciclo Combinado	461,7	456,8	-	-	-	-	-

Tabla 4.16. Tecnologías que utilizan productos petrolíferos en Canarias, y desglosado por islas. Año 2017. [121]

La figura 4.29 sintetiza el contenido de la tabla 4.16 y se introducen las energías renovables.

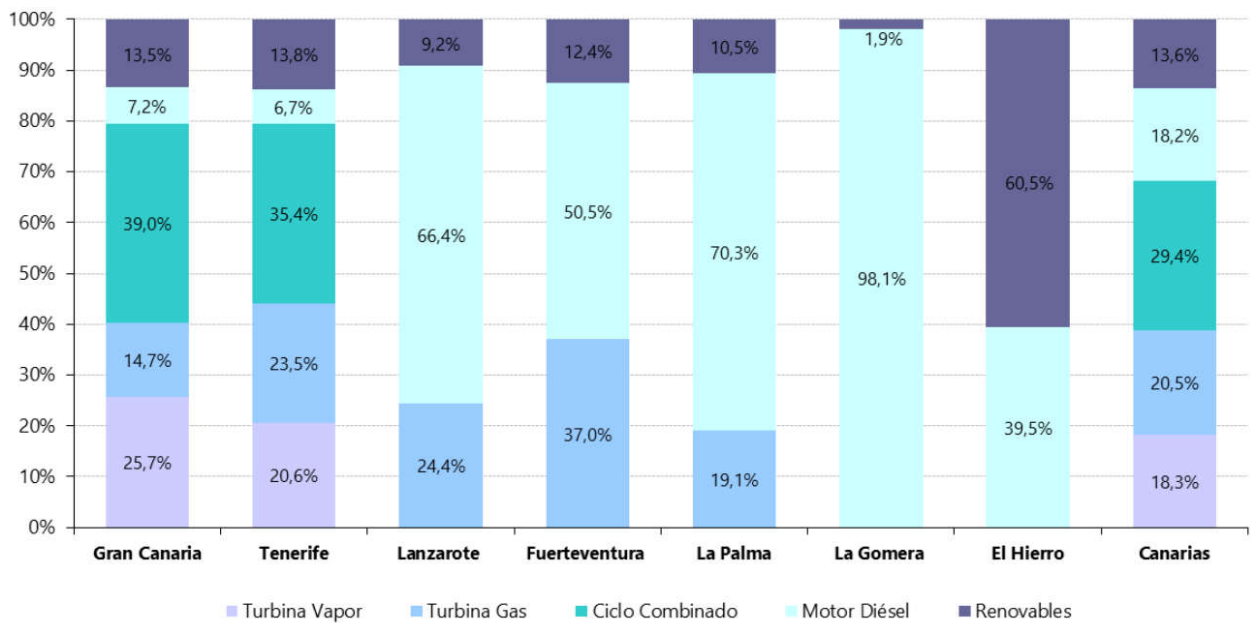


Figura 4.29. Tecnologías utilizadas en Canarias, separadas por islas. Año 2017. [121]

Puntas y valles de demanda energética

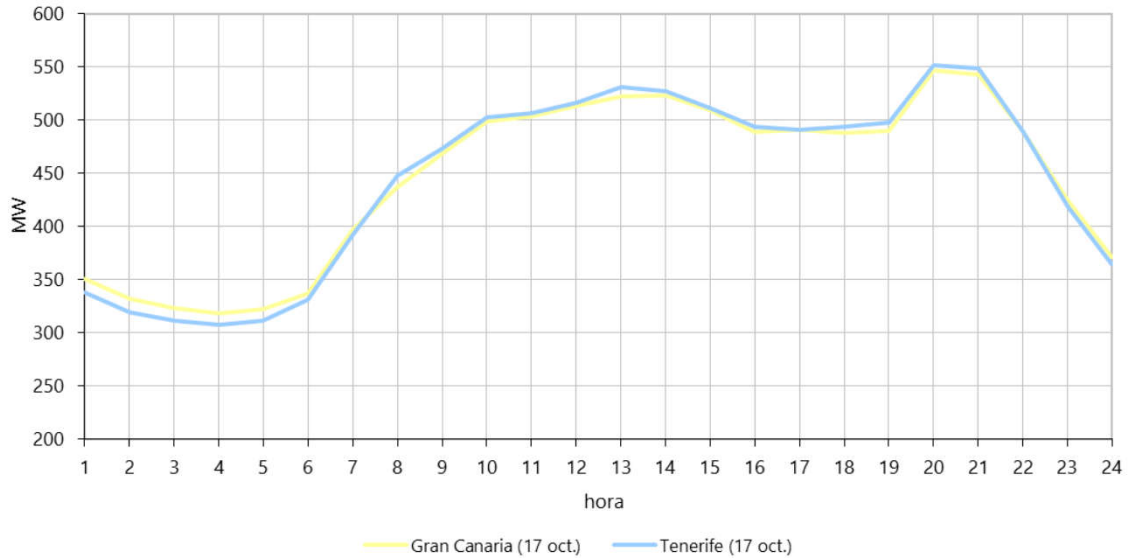
En la tabla 4.17 se indica para las Islas Canarias el punto más alto de demanda del año de 2017 con fecha y hora.

Potencia diaria máxima anual por isla (MW)							
	Gran Canaria	Tenerife	Lanzarote	Fuerteventura	La Palma	La Gomera	El Hierro
Potencia	553,0	560,0	141,0	122,0	45,8	12,2	8,0
Fecha	17 oct.	17 oct.	07 ago.	24 ago.	24 dic.	18 ago.	03
Hora	20:41	20:36	13:52	20:45	19:47	21:56	20:36

Tabla 4.17. Valores máximos de potencia que se demandan en las Islas Canarias. Año 2017.

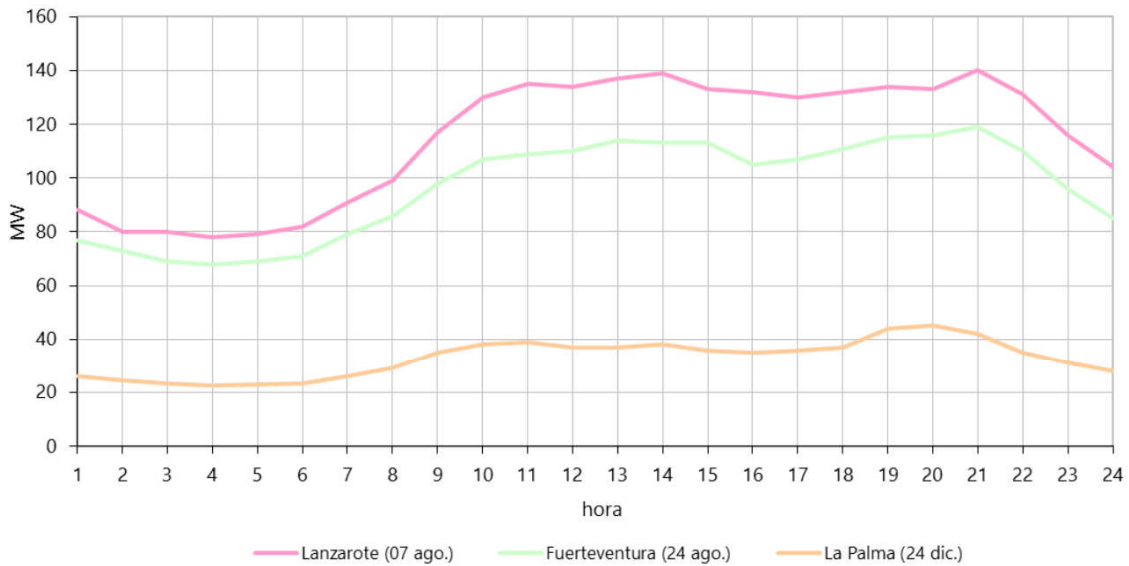
[121]

A continuación, en las figuras 4.30, 4.31 y 4.32, se indica cómo evoluciona la demanda por hora en un día determinado y cuándo se alcanza la punta de mayor potencia en las Islas Canarias según la tabla 4.15.



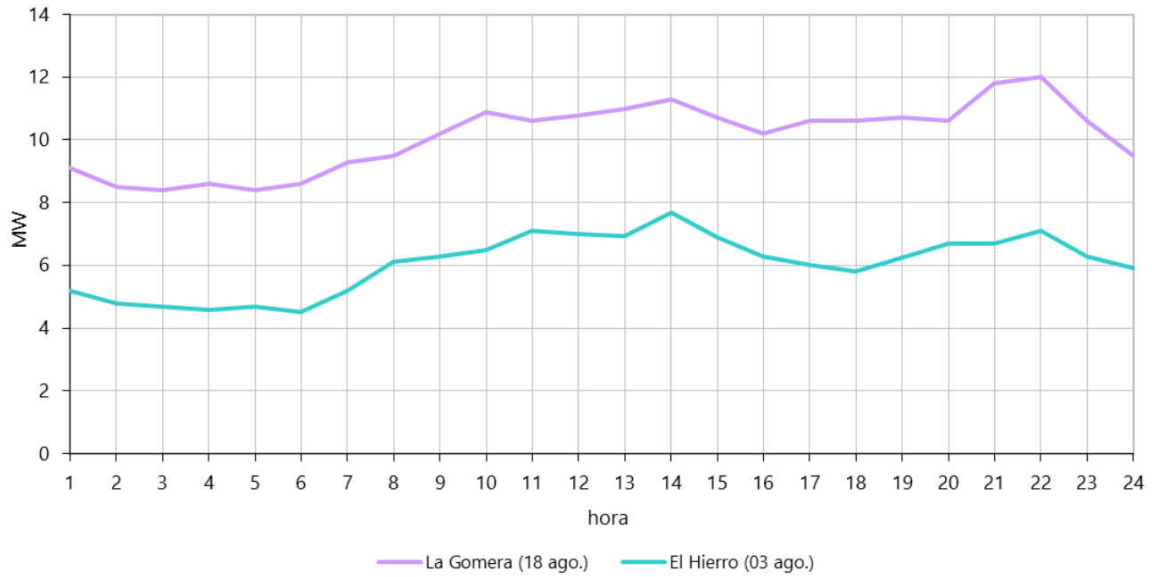
Hora	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
GC	351	332	318	337	437	499	514	523	489	488	547	489	371
TF	338	319	308	331	448	503	517	527	494	494	552	489	365

Figura 4.30. Demanda por hora (MW) en el año 2017 para las islas de Tenerife y Gran Canaria [121]



Hora	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
LZ	88	80	78	82	99	130	134	139	132	132	133	131	104
FT	77	73	68	71	86	107	110	113	105	111	116	110	85
LP	26	24,4	22,5	23,3	29,0	38,0	37,0	38,0	35,0	37,0	45,0	35,0	28,0

Figura 4.31. Demanda por hora (MW) en el año 2017 para las islas de La Palma, Fuerteventura y Lanzarote [121]



Hora	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
LG	9,1	8,5	8,6	8,6	9,5	10,9	10,8	11,3	10,2	10,6	10,6	12,0	9,5
EH	5,2	4,8	4,6	4,5	6,1	6,5	7,0	7,7	6,3	5,8	6,7	7,1	5,9

Figura 4.32. Demanda por hora (MW) en el año 2017 para las islas de El Hierro y La Gomera [121]

Relación de unidades de generación en las centrales térmicas

En las tablas 4.18, 4.19 y en la figura 4.33 se muestran la potencia térmica y la tecnología a término del 2017, diferenciando por separado cada una de las Islas Canarias. La potencia neta total instalada en Canarias en 2017 fue de 2.357.350 kW, correspondiendo 1.270.340 kW a la provincia de Las Palmas y 1.087.010 kW a la de Santa Cruz de Tenerife. La desalinización de agua de mar en las Islas Canarias, tanto para abasto público como para regadío, supone un consumo anual aproximado de un 3% de lo anterior de la potencia instalada en Canarias anterior.

Se observa que en el año 2017 no ha habido ninguna modificación respecto al año pasado.

Central	Grupo	Nº	Pot. neta	Pot. bruta	Pot.	Pot.
GRAN CANARIA						
Jinámar	Vapor 4 y 5	2	55560	60000	111120	120000
Diésel 1, 2 y 3	3	8510	12000	25530	36000	
Diésel 4 y 5	2	20510	24000	41020	48000	
Gas 1	1	17640	23450	17640	23450	
Gas 2 y 3	2	32340	37500	64680	75000	
10	259990	302450				
Barranco Tirajana	Vapor 1 y 2	2	74240	80000	148480	160000
Gas 1 y 2	2	32340	37500	64680	75000	
Gas 3 y 4 (CC1)	2	68700	75000	137400	150000	
Vapor 3 (CC1)	1	68700	79650	68700	79650	
Gas 5 y 6 (CC2)	2	75000	75500	150000	151000	
Vapor 4 (CC2)	1	77000	81080	77000	81080	
10	646260	696730				
Total Gran Canaria	20	906250	999180			
LANZAROTE						
Punta Grande	Diésel 1, 2 y 3	3	6490	7520	19470	22560
Diésel 4 y 5	2	12850	15500	25700	31000	
Diésel 6	1	20510	24000	20510	24000	
Diésel 7 y 8	2	17200	18400	34400	36800	
Diésel 9 y 10	2	17600	18500	35200	37000	
Diésel 11	1	17600	18400	17600	18400	
Gas 1	1	19600	25000	19600	25000	
Gas 2	1	32340	37500	32340	37500	
Total Lanzarote	13	204820	232260			
FUERTEVENTURA						
Las Salinas	Diésel 1 y 2	2	3820	4320	7640	8640
Diésel 3	1	4110	5040	4110	5040	
Diésel 4 y 5	2	6210	7520	12420	15040	
Diésel 6	1	20510	24000	20510	24000	
Diésel 7, 8 y 9	3	17200	18400	51600	55200	
Gas 1	1	21850	25000	21850	25000	
Gas 2	1	29400	37500	29400	37500	
Gas móvil 1	1	11740	16600	11740	16600	
Total Fuerteventura	12	159270	187020			
TOTAL LAS PALMAS	45	1270340	141846			

Tabla 4.18. Grupos instalados en centrales térmicas a 31/12/2017 en Las Palmas [121]

Central	Grupo	Nº	Pot. neta	Pot. bruta	Pot. neta	Pot. bruta
TENERIFE						
Candelaria	Vapor 5 y 6	2	37280	40000	74560	80000
Diésel 1, 2 y 3	3	8510	12000	25530	36000	
Gas 1 y 2	2	32340	37500	64680	75000	
Gas 3	1	14700	17200	14700	17200	
8	179470	208200				
Granadilla	Vapor 1 y 2	2	74240	80000	148480	160000
Diésel 1 y 2	2	20510	24000	41020	48000	
Gas 1	1	32340	37500	32340	37500	
Gas 2	1	39200	42000	39200	42000	
Gas 3 y 4 (CC1)	2	68700	75000	137400	150000	
Vapor 3 (CC1)	1	68700	75000	68700	75000	
Gas 5 y 6 (CC2)	2	75000	76700	150000	153400	
Vapor 4 (CC2)	1	76200	78400	76200	78400	
12	693340	744300				
Arona	Gas Arona	2	21600	25000	43200	50000
Guía Isora	Gas Guía	1	43100	44000	43100	44000
Total Tenerife	23	959110	1046500			
LA PALMA						
Los Guinchos	Diésel 6, 7	3	3820	4320	11460	12960
Diésel 9	1	4300	5040	4300	5040	
Diésel 10 y 11	2	6690	7520	13380	15040	
Diésel 12	1	11500	12300	11500	12300	
Diésel 13	1	11200	12300	11200	12300	
Diésel 14 y 15	2	11500	12600	23000	25200	
Gas móvil 2	1	21600	22500	21600	22500	
Total La Palma	11	96440	105340			
LA GOMERA						
El Palmar	Diésel 12 y	2	1400	1600	2800	3200
Diésel 14 y 15	2	1840	2240	3680	4480	
Diésel 16 y 17	2	2510	2850	5020	5700	
Diésel 18 y 19	2	3100	3500	6200	7000	
Diésel móvil 3	1	720	790	720	790	
Total La Gomera	9	18420	21170			
EL HIERRO						
Llanos	Diésel 7	1	670	780	670	780
Diésel 9	1	880	1100	880	1100	
Diésel 10 y 11	2	1070	1460	2140	2920	
Diésel 12	1	1260	1460	1260	1460	
Diésel 13	1	1360	1460	1360	1460	
Diésel 14 y 15	2	1900	2000	3800	4000	
Diésel 16	1	1860	1910	1860	1910	
Diésel móvil 1	1	1070	1280	1070	1280	
Total El Hierro	10	13040	14910			
Central	Grupo	Nº	Pot. neta			
TOTAL S/C DE	53	1087010	1187920			

Tabla 4.19. Grupos instalados en centrales térmicas a 31/12/2017 en Santa Cruz de Tenerife [121]

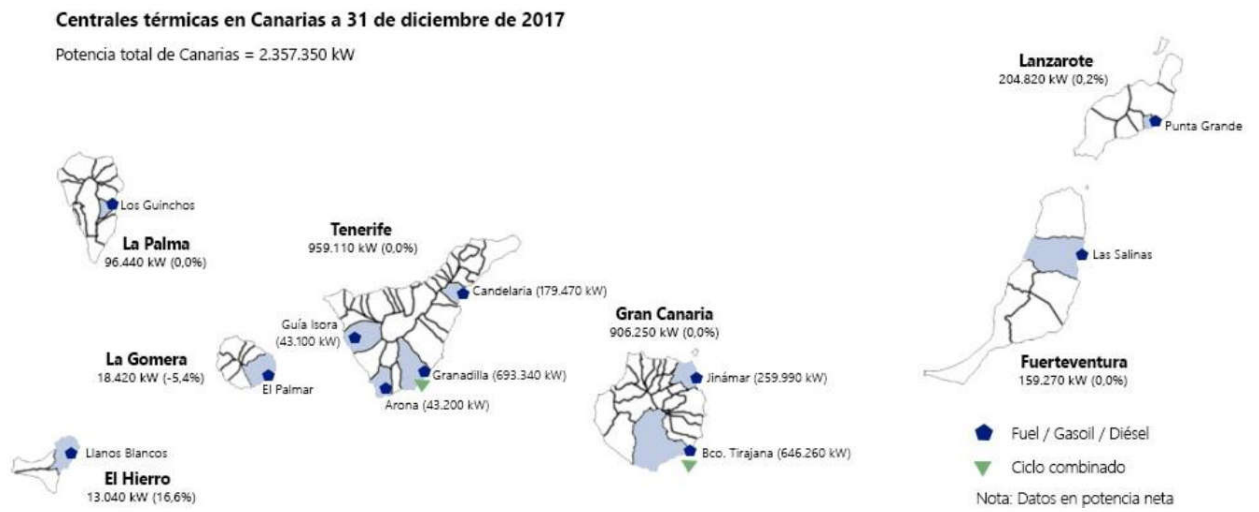


Figura 4.33. Localización de las diferentes centrales térmicas de las Islas Canarias [121]

Como se puede apreciar en la tabla 4.20, en Tenerife y Gran Canaria se dispone de ciclos combinados con rendimientos altos, mientras que en islas como Fuerteventura o Lanzarote los rendimientos derivados del gas son bastante bajos.

Tecnología	Consumo térmico			CEB					
	15'	16'	17'	15'	16'	17'	15'	16'	17'
GRAN CANARIA									
Vapor	3858921	4211111	4496829	2,58	2,57	2,56	0,33	0,33	0,34
Diésel	659921	665206	628357	2,04	2,05	2,06	0,42	0,42	0,42
Gas	263497	301171	319.069	4,01	4,46	4,46	0,21	0,19	0,19
C.C.	3718303	3481982	3458665	1,95	1,93	1,96	0,44	0,44	0,44
Vapor (*)	3644319	3976923	4246434	2,44	2,43	2,42	0,35	0,35	0,36
Diésel (*)	623191	628194	593385	1,93	1,94	1,94	0,45	0,44	0,44
Gas (*)	247784	283211	300042	3,77	4,20	4,19	0,23	0,20	0,21
C.C. (*)	3496570	3274341	3252415	1,83	1,82	1,84	0,47	0,47	0,47
TENERIFE									
Vapor	3571251	4175840	4236646	2,66	2,64	2,64	0,32	0,33	0,33
Diésel	685588	680195	700927	2,00	2,00	2,01	0,43	0,43	0,43
Gas	766732	566492	584395	3,38	3,53	3,57	0,25	0,24	0,24
C.C.	3785546	3576121	3688597	1,96	1,96	2,00	0,44	0,44	0,43
Vapor (*)	3372648	3943617	4001037	2,51	2,50	2,49	0,34	0,34	0,35
Diésel (*)	647438	642340	661933	1,89	1,89	1,90	0,45	0,46	0,45
Gas (*)	721009	532710	549546	3,18	3,32	3,36	0,27	0,26	0,26
C.C. (*)	3559802	3362866	3468635	1,85	1,85	1,88	0,47	0,47	0,46
LANZAROTE									
Diésel	1962153	2095921	2167320	1,99	2,12	2,13	0,43	0,41	0,40
Gas	41975	52419	73766	4,61	4,70	4,51	0,19	0,18	0,19
Diésel (*)	1852625	1978987	2046400	1,88	2,00	2,01	0,46	0,43	0,43
Gas (*)	39472	49293	69367	4,34	4,42	4,24	0,20	0,19	0,20
FUERTEVENTURA									
Diésel	1404975	1476197	1458395	2,16	2,17	2,17	0,40	0,40	0,40
Gas	402621	428739	577433	4,55	4,75	4,71	0,19	0,18	0,18
Diésel (*)	1326764	1394009	1377181	2,04	2,05	2,04	0,42	0,42	0,42
Gas (*)	378612	403172	542999	4,28	4,47	4,43	0,20	0,19	0,19
LA PALMA									
Diésel	632436	632483	640188	2,22	2,23	2,20	0,39	0,39	0,39
Gas	3861	2666	2967	3,48	3,80	3,98	0,25	0,23	0,22
Diésel (*)	597200	597261	604513	2,10	2,11	2,08	0,41	0,41	0,41
Gas (*)	3631	2507	2790	3,28	3,58	3,74	0,26	0,24	0,23
LA GOMERA									
Diésel	195506	200603	210332	2,36	2,37	2,36	0,36	0,36	0,36
Diésel (*)	183729	188519	197662	2,21	2,23	2,22	0,39	0,39	0,39
EL HIERRO									
Diésel	135248	75603	68221	3,25	2,37	2,39	0,26	0,36	0,36
Diésel (*)	127100	71049	64111	3,05	2,23	2,24	0,28	0,39	0,38

Tabla 4.20. Consumo específico bruto, rendimiento y consumo térmico en las diferentes centrales de las Islas Canarias en los años 2015 – 2017 [121]

(*) Calculado con el poder calorífico inferior (PCI).

Cuanto menores son los rendimientos mayores es el consumo de combustible y consecuentemente la huella de carbono. Por consiguiente, se hace necesario la introducción de las energías renovables o las emisiones no se controlan. Se consigue

con la aportación en renovables una mejora en la eficiencia energética de las instalaciones a través de la reducción de la huella de carbono.

Aportación de energías renovables

Respecto a la contribución de las energías renovables en las Islas Canarias durante el año 2017, según la tabla 4.21 y la figura 4.34, se muestra la tendencia registrada siendo normalmente superior en verano que en el resto del año.

Mes	Gran Canaria	Tenerife	Lanzarote	Fuerteventura	La Palma	La Gomera	El Hierro
Enero	3,9%	5,7%	3,3%	3,8%	7,0%	0,3%	29,7%
Febrero	6,6%	7,1%	3,8%	4,6%	10,7%	1,1%	44,9%
Marzo	9,4%	9,0%	4,6%	5,5%	13,0%	0,5%	58,0%
Abril	6,0%	7,9%	3,5%	5,4%	8,3%	0,5%	27,7%
Mayo	7,7%	7,4%	3,7%	6,8%	9,7%	1,1%	41,1%
Junio	11,0%	9,1%	4,8%	8,1%	13,8%	0,9%	61,7%
Julio	13,0%	9,4%	5,2%	8,9%	16,8%	1,2%	79,1%
Agosto	11,6%	8,7%	4,3%	6,3%	13,5%	1,1%	58,6%
Septiembre	14,0%	9,5%	3,9%	5,2%	13,5%	0,9%	63,3%
Octubre	5,5%	6,5%	2,2%	2,9%	6,5%	0,6%	26,2%
Noviembre	5,5%	6,9%	2,9%	2,5%	7,3%	0,1%	24,9%
Diciembre	8,0%	9,6%	3,5%	2,9%	10,2%	0,2%	37,7%

Tabla 4.21. Aportación de las energías renovables a la red eléctrica mensual durante el 2017 [121]

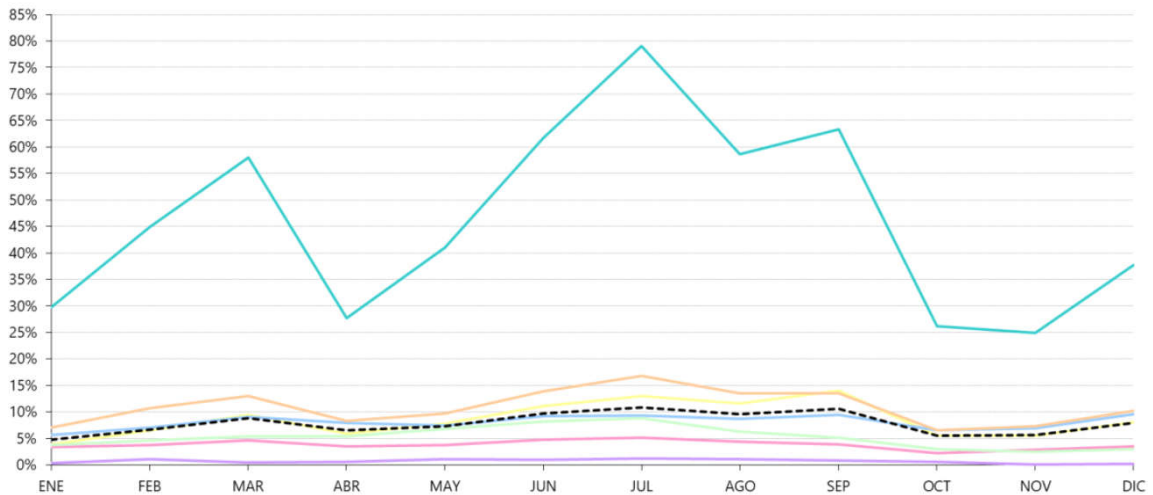


Figura 4.34. Aportación de las energías renovables a la red eléctrica mensual durante el 2017 [121]

En nuestro caso particular de la desalación en Canarias, tanto en plantas de mediano tamaño públicas como privadas más pequeñas, la energía renovable que más se adapta es la energía eólica y solar fotovoltaica. La primera de ellas para instalaciones mayores en zonas donde sea posible su implantación por normativa y condiciones del viento. La segunda de ellas menos restringida, con más facilidades administrativas, de más

sencilla instalación en zonas urbanas y turísticas para plantas desalinizadoras en hoteles donde normalmente además la irradiación solar es mayor.

Para reducir la huella de carbono del mix energético actual introducimos en la medida de lo posible energías renovables y en su defecto mantener las tecnologías convencionales de mayor rendimiento como son el motor diésel, los ciclos combinados o la turbina de vapor, ya que estos consumen menos combustibles para producir la misma energía que otras tecnologías convencionales, o mejorar la eficiencia de la red eléctrica.

Teniendo en cuenta la formulación anterior que calcula la huella del carbono del factor mix energético, para reducir la misma en un porcentaje determinado con una aportación de energía renovable equivalente ya que su factor mix de emisiones es despreciable frente a las tecnologías convencionales y tiende a cero. Por tanto, siempre que sea posible intentamos introducir en el mix energético un mayor porcentaje de energías renovables para reducir las emisiones y la huella de carbono. Incluso cabe la posibilidad de introducir estas energías renovables en los pilotajes de membranas que comentamos a continuación para mejorar nuestros resultados de eficiencia energética globales de las plantas desalinizadoras. En los próximos años se prevé que cuanto menor sean nuestras emisiones y por tanto nuestra huella de carbono menor será el coste por metro cúbico de agua producida ya que se puede gravar impuestos por contaminar que se evitan trabajando de esta forma [88].

Teniendo en cuenta el modelo de indicadores del impacto medioambiental específico [118] que se expuso en el capítulo 3 se obtienen los siguientes resultados por tecnología no renovable y por isla en la tabla 4.22.

Huella de CO ₂ por tecnología no renovable en Canarias (tCO ₂)							
Tecnología	Gran Canaria	Tenerife	Lanzarote	Fuerteventura	La Palma	La Gomera	El Hierro
Turbina Vapor	274429	27928	550154	349597	268273	68688	48276
Motor Diésel	110730	19318	39888	50483	14360	-	-
Turbina Gas	1270058	1110153	-	-	-	-	-
Ciclo Combinado	1175213	1162741	-	-	-	-	-

Tabla 4.22. Huella de carbono según las tecnologías que utilizan productos petrolíferos en Canarias, y desglosado por islas en el año 2017. [121]

Igualmente se puede obtener la siguiente tabla 4.23 a partir de los valores anteriores por MWh de potencia instalada en cada isla:

Huella de CO ₂ por potencia instalada de	
Tecnología	t CO ₂ /MWh
Turbina Vapor	3240
Motor Diésel	638
Turbina Gas	4175
Ciclo Combinado	2545

Tabla 4.23. Huella de carbono por potencia instalada según las tecnologías que utilizan productos petrolíferos en Canarias, y desglosado por islas en el año 2017. [121]

Del mismo modo podemos calcular la huella de CO₂ por MWh teniendo en cuenta los consumos térmicos por tecnología e isla en la siguiente tabla 4.24:

Huella de CO ₂ de cada tecnología no renovable por MWh en Canarias (tCO ₂ /MWh)							
Tecnología	Gran Canaria	Tenerife	Lanzarote	Fuerteventura	La Palma	La Gomera	El Hierro
Diésel	0,224621	0,204929	0,151737	0,12329	0,215532	0,168356	0,364811
Turbina Gas	0,178854	0,170368	0,278681	0,045057	2,4943	0	0
Turbina Vapor	0,145261	0,134765	0	0	0	0	0
Ciclo Combinado	0,175115	0,162457	0	0	0	0	0

Tabla 4.24. Huella de CO₂ de cada tecnología no renovable por MWh en Canarias (tCO₂/MWh). Año 2017. [121]

Para calcular la huella ecológica se utiliza la siguiente metodología [121] que se expresa en el capítulo 3. Resumiendo, en Gran Canaria el 8,1% de la energía para producir 1 m³ de agua potable proviene de energía renovable y no produce ninguna emisión de CO₂. En Tenerife es un 7,7%, en Lanzarote un 4,6%, en Fuerteventura un 5%, en La Palma un 10%, en La Gomera un 0,7% y en El Hierro un 45,4%. En total en Canarias, la energía renovable es un 7,56% del total de la energía consumida [20].

Además, en la isla de Gran Canaria el 45,1% de las energías no renovables proviene de la tecnología de turbina de vapor, el 45,2% de ciclo combinado, el 7,8% de motor diésel y el otro 1,8% de turbina de gas. Aplicando la ecuación 4, este 45,1% de las energías no renovables de la turbina de vapor por 91,9%, que es el porcentaje de energías no renovables del total, significa que el 41,5% de la energía total consumida proviene de la turbina de vapor en esta isla. Teniendo en cuenta la huella de carbono de cada tecnología por isla en la tabla SI4 y el consumo total de ésta [121-124], se puede encontrar a continuación la tabla 4.25 con toda la mezcla de factores por tecnología e isla.

Factor Mix (FM) por tecnología no renovable en las Islas Canarias								
Tecnología	Gran Canaria	Tenerife	Lanzarote	Fuerteventura	La La	La Gomera	El Hierro	Islas Canarias
Turbina Vapor	0,3736	0,3370	-	-	-	-	-	0,2775
Turbina Gas	0,0185	0,0421	0,0170	0,1632	0,0030	-	-	0,0382
Motor Diesel	0,0468	0,0529	0,6098	0,5246	0,5847	0,6466	0,3561	0,1646
Ciclo combinado	0,2492	0,2566	-	-	-	-	-	0,1974
Total	0,6881	0,6886	0,6267	0,6878	0,5877	0,6466	0,3561	0,6776

Tabla 4.25. Factor Mix según las tecnologías que utilizan productos petrolíferos en Canarias, y desglosado por islas en el año 2017.

4.5 EXTENSIÓN DE RESULTADOS EN MEJORAS ENERGÉTICAS A LAS PLANTAS DE AGUA DE MAR DE CANARIAS

En la línea de lo comentado en el capítulo 3, en cuanto al análisis general de consumo de energía por elementos en las plantas, si no se realiza este reemplazo de membranas nuestro consumo irá aumentando progresivamente como se puede demostrar en la siguiente tabla realizada mediante los cálculos y las especificaciones de diseño de sistemas de OI del fabricante de membranas Toray. Para estos cálculos se ha utilizado la membrana TM820K-440 de alto rechazo de agua de mar y del mismo suministrador, estimando un flujo medio de trabajo de 16 l/mh para una captación de agua marina a través de sondeos, cántara o pretratamiento con membranas de ultrafiltración, temperatura media de 22°C habitual en Canarias, una conversión de trabajo corriente del 45% y salinidad de entrada de 39 g/l también normal en la zona. Teniendo en cuenta estos parámetros, una producción tipo de una desaladora de 100000 m³/d, dividida en 10 trenes de 10000 m³/d, la ecuación 3.1 anteriormente explicada en el capítulo 3 y el software de membranas de ósmosis inversa Toray DS1, obtenemos los resultados comunes siguientes en la tabla 4.26.

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	Energía (kWh/día)	Coste (€/día)
0	66,6	10023,5	240564,9	21625,6
1	68,4	10294,4	247066,7	22210,1
2	69,6	10475,0	251401,2	22599,7
3	70,8	10655,7	255735,7	22989,4
4	72,0	10836,3	260070,2	23379,0
5	73,2	11016,9	264404,7	23768,7

Tabla 4.26. Aumento de presión sin reemplazo de membranas a 22°C

De esta manera, se demuestra que la diferencia de presión a partir del año 1 crece más en los primeros años y a partir del segundo año se muestra constante en 1,2 bars.

En consecuencia, de todo ello obtenemos la figura 4.35 que nos indica cómo varía la presión a lo largo de 5 años sin realizar reemplazo de membranas, dónde

proporcionalmente aumenta la potencia que consume el bombeo de alta presión, indica también la energía necesaria trabajando 24 horas al día y el coste económico diario si no hacemos reemplazo de membranas.

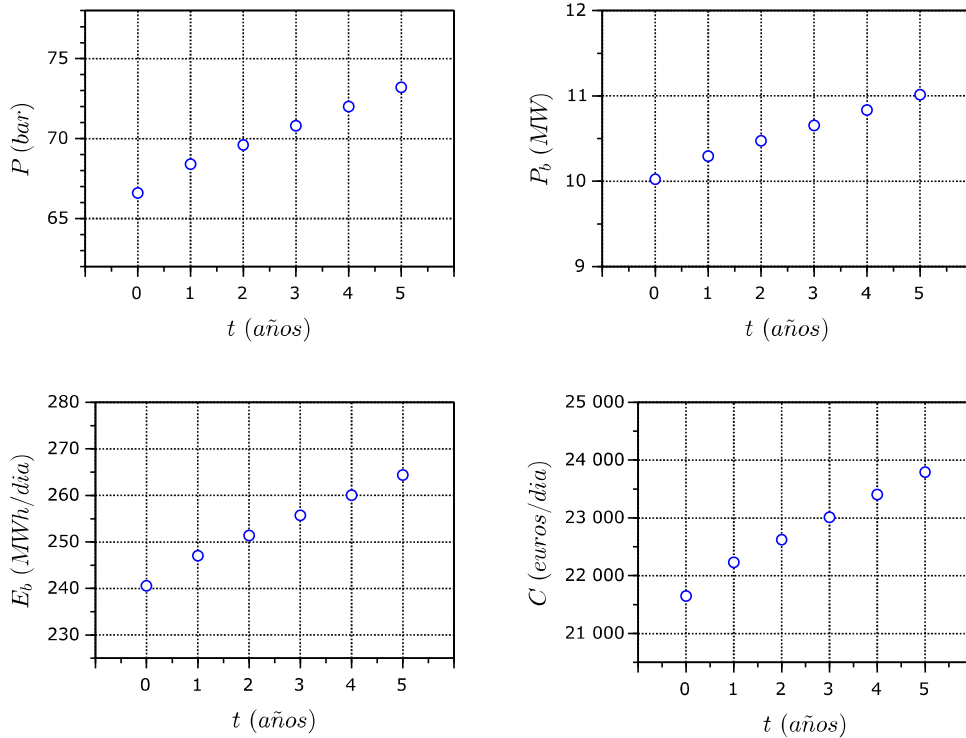


Figura 4.35. Presión, Potencia, Energía y Coste vs. Edad de membrana

Variando la temperatura de entrada a un mínimo de 17°C y a un máximo de 27°C se obtienen las siguientes tablas de resultados 4.27 y 4.28.

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	Energía (kWh/día)	Coste (€/día)
0	69,5	10460,0	251039,9	22567,2
1	72,6	10926,5	262237,5	23573,8
2	74,4	11197,4	268739,2	24158,3
3	76,0	11438,3	274518,5	24677,8
4	77,5	11664,1	279936,7	25164,9
5	78,9	11874,8	284993,6	25619,5

Tabla 4.27. Aumento de presión sin reemplazo de membranas a 17°C

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	Energía (kWh/día)	Coste (€/día)
0	62,9	9466,6	227200,2	20424,1
1	65,1	9797,7	235146,8	21138,5
2	66,3	9978,3	239481,3	21528,2
3	67,3	10128,9	243093,4	21852,9
4	68,3	10279,4	246705,5	22177,6
5	69,2	10414,9	249956,4	22469,8

Tabla 4.28. Aumento de presión sin reemplazo de membranas a 27°C

Se puede observar en la tabla 4.27 como al disminuir la temperatura aumenta la presión de trabajo y esto supone un mayor consumo energético. Sin embargo ocurre lo contrario cuando sube la temperatura, ya que como se muestra en la tabla 4.28 baja la presión y se reduce considerablemente el consumo energético.

Si se tiene en cuenta un reemplazo parcial de las membranas de un 10%, 15% y 20% anual en 5 años para todos los casos, se obtienen unos resultados que van mejorando con el porcentaje de dicho reemplazo como se puede apreciar a continuación en las tablas 4.29 a 4.40 donde hemos utilizado el software Toray DS2 para los cálculos energéticos, por ello algunos los resultados pueden ser ligeramente diferentes al otro Toray DS1.

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	Energía (kWh/m³)
0	66,79	22074,12	5,298
1	68,39	22602,10	5,425
2	69,82	23075,02	5,538
3	71,07	23488,12	5,637
4	72,24	23876,55	5,731
5	73,38	24253,94	5,821
5(10%R)	71,66	23684,58	5,684
5(15%R)	70,77	23388,60	5,613
5(20%R)	69,82	23075,02	5,538

Tabla 4.29. Presión, Potencia y Consumo energético a 22°C con la membrana TM820K-440

Se puede observar que la diferencia de presión crece más en los primeros años y la presión de la alimentación aumenta con la edad de los elementos. En consecuencia, se obtiene cómo varía la presión a lo largo de 5 años sin sustituir las membranas, donde la potencia consumida por la bomba de alta presión aumenta proporcionalmente. También muestra la energía necesaria para trabajar 24 horas al día y el coste económico diario si no reemplazamos los elementos. Además, en la tabla 4.29 se indica la potencia y el consumo de energía por día en todos los escenarios incrementándolos con la edad de las membranas.

Variando la temperatura de entrada a un mínimo de 17°C y un máximo de 27°C, se obtienen las siguientes tablas de resultados 4.30 y 4.31.

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	Energía (kWh/m³)
0	71,11	23511,23	5,643
1	72,77	24060,57	5,775
2	74,56	24650,69	5,916
3	76,13	25171,11	6,041
4	77,62	25662,76	6,159
5	79,06	26140,34	6,274
5(10%R)	76,88	25419,83	6,101
5(15%R)	75,75	25045,31	6,011
5(20%R)	74,56	24650,69	5,916

Tabla 4.30. Presión, Potencia y Consumo energético a 17°C con la membrana TM820K-440

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	Energía (kWh/m ³)
0	63,70	21049,93	5,052
1	65,26	21567,76	5,176
2	66,44	21954,95	5,269
3	67,44	22287,70	5,349
4	68,38	22597,87	5,424
5	69,29	22897,50	5,496
5(10%R)	67,92	22444,84	5,387
5(15%R)	67,20	22207,84	5,330
5(20%R)	66,44	21954,95	5,269

Tabla 4.31. Presión, Potencia y Consumo energético a 27°C con la membrana TM820K-440

Se muestra en la tabla 4.30 que mientras la temperatura disminuye, la presión de trabajo aumenta y esto lleva a un mayor consumo de energía. Sin embargo, cuando la temperatura aumenta, ocurre lo contrario, ya que como se muestra en la tabla 4.31 la presión disminuye y el consumo de energía se reduce considerablemente.

Se ha seleccionado el elemento TM820K-440 por ser el que tiene el mayor rechazo de boro, para asegurarse de obtener agua potable y boro en menos de 1 ppm en todos los casos. Sin embargo, para el riego de plátanos y tomates no es obligatorio tener la emisión de boro inferior a 1 ppm, por lo que podemos utilizar un elemento de bajo consumo energético como el TM820V-440. Por lo tanto, se pueden encontrar las siguientes tablas 4.32, 4.33 y 4.34 con todos los datos relativos a este escenario a 22°C, 17°C y 27°C para el mismo flujo de permeado, recuperación y salinidad de la alimentación.

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	Energía (kWh/m ³)
0	57,90	19135,08	4,592
1	58,12	19210,63	4,611
2	58,51	19338,20	4,641
3	58,84	19448,42	4,668
4	59,16	19552,95	4,693
5	59,48	19657,45	4,718
5(10%R)	59,01	19501,75	4,681
5(15%R)	58,76	19422,14	4,661
5(20%R)	58,51	19338,20	4,641

Tabla 4.32. Presión, Potencia y Consumo energético a 22°C con la membrana TM820V-440

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	Energía (kWh/m ³)
0	60,24	19915,51	4,780
1	60,55	20020,78	4,805
2	61,08	20194,19	4,847
3	61,52	20340,85	4,882
4	61,93	20474,38	4,914
5	62,31	20600,13	4,944
5(10%R)	61,73	20409,61	4,898
5(15%R)	61,42	20306,60	4,874
5(20%R)	61,08	20194,19	4,847

Tabla 4.33. Presión, Potencia y Consumo energético a 17°C con la membrana TM820V-440

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	Energía (kWh/m ³)
0	56,47	18661,09	4,479
1	56,79	18765,92	4,504
2	57,15	18885,97	4,533
3	57,45	18986,40	4,557
4	57,73	19077,53	4,579
5	57,99	19163,35	4,599
5(10%R)	57,60	19033,63	4,568
5(15%R)	57,38	18963,29	4,551
5(20%R)	57,15	18885,97	4,533

Tabla 4.34. Presión, Potencia y Consumo energético a 27°C con la membrana TM820V-440

Además, los cálculos también se han realizado introduciendo un equipo de recuperación de energía (ERI) de alto rendimiento, con el objeto de disminuir incluso más el consumo de energía en todos los casos y con los dos tipos de membrana de alto rechazo y bajo consumo energético. Seguidamente se indican en las tablas 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.39 y 4.40 todos los resultados con recuperador de energía. En primer lugar, se encuentran los cálculos con los elementos de alto rechazo de sales modelo TM820K-440.

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	ERI (kW)	Booster (kW)	Energía (kWh/m ³)
0	68,26	10796,34	9402,23	514,00	2,591
1	70,05	11067,40	9657,81	516,00	2,656
2	71,55	11294,75	9872,25	517,50	2,711
3	72,85	11491,92	10058,39	518,8	2,758
4	74,07	11676,73	10232,92	520,1	2,803
5	75,27	11859,31	10405,28	521,1	2,846
5(10%R)	73,46	11585,52	10146,78	519,5	2,781
5(15%R)	72,53	11444,46	10013,58	518,5	2,747
5(20%R)	71,55	11294,75	9872,25	517,50	2,711

Tabla 4.35. Presión, Potencia y Consumo energético a 22°C con la membrana TM820K-440

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	ERI (kW)	Booster	Energía (kWh/m ³)
0	72,67	11494,14	10017,44	543,00	2,759
1	74,55	11778,77	10286,07	544,80	2,827
2	76,43	12063,70	10555,31	546,60	2,895
3	78,06	12310,60	10788,59	548,00	2,955
4	79,59	12542,26	11007,61	549,40	3,010
5	81,07	12766,22	11219,43	550,70	3,064
5(10%R)	78,83	12427,90	10899,48	548,70	2,983
5(15%R)	77,67	12251,14	10732,37	547,60	2,940
5(20%R)	76,43	12063,70	10555,31	546,60	2,895

Tabla 4.36. Presión, Potencia y Consumo energético a 17°C con la membrana TM820K-440

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	ERI (kW)	Booster (kW)	Energía (kWh/m ³)
0	65,11	10295,99	8967,89	489,40	2,471
1	66,83	10557,04	9213,65	491,60	2,534
2	68,06	10743,79	9389,50	492,90	2,579
3	69,11	10903,33	9539,89	494,10	2,617
4	70,09	11051,67	9679,78	495,20	2,652
5	71,03	11194,68	9814,68	496,30	2,687
5(10%R)	69,61	10978,58	9610,85	494,70	2,635
5(15%R)	68,86	10865,06	9503,82	493,80	2,608
5(20%R)	68,06	10743,79	9389,50	492,90	2,579

Tabla 4.37. Presión, Potencia y Consumo energético a 27°C con la membrana TM820K-440

En segundo lugar, con los elementos de bajo consumo energético TM820V-440 se obtienen los siguientes resultados.

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	ERI (kW)	Booster	Energía (kWh/m ³)
0	59,06	9398,23	8087,40	502,10	2,256
1	59,31	9437,65	8123,80	502,80	2,265
2	59,77	9507,21	8188,45	503,90	2,282
3	60,17	9567,95	8244,93	504,70	2,296
4	60,53	9624,05	8297,11	505,60	2,310
5	60,88	9677,59	8346,91	506,30	2,323
5(10%R)	60,35	9596,51	8271,49	505,20	2,303
5(15%R)	60,07	9553,47	8231,46	504,50	2,293
5(20%R)	59,77	9507,21	8188,45	503,90	2,282

Tabla 4.38. Presión, Potencia y Consumo energético a 22°C con la membrana TM820V-440

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	ERI (kW)	Booster	Energía (kWh/m ³)
0	61,41	9783,87	8406,39	530,00	2,348
1	61,73	9832,82	8452,05	530,70	2,360
2	62,26	9913,61	8527,46	531,50	2,379
3	62,71	9981,82	8591,22	532,30	2,396
4	63,12	10043,90	8649,26	533,00	2,411
5	63,50	10102,34	8703,90	533,70	2,425
5(10%R)	62,92	10013,52	8620,87	532,70	2,403
5(15%R)	62,60	9965,63	8576,09	532,10	2,392
5(20%R)	62,26	9913,61	8527,46	531,50	2,379

Tabla 4.39. Presión, Potencia y Consumo energético a 17°C con la membrana TM820V-440

Año	Presión (bar)	Potencia (kW)	ERI (kW)	Booster	Energía (kWh/m ³)
0	57,69	9168,26	7908,69	479,10	2,200
1	58,07	9226,44	7962,37	480,20	2,214
2	58,45	9285,33	8016,83	481,30	2,229
3	58,77	9334,34	8062,14	482,10	2,240
4	59,06	9378,71	8103,15	482,90	2,251
5	59,34	9420,35	8141,62	483,70	2,261
5(10%R)	58,92	9357,02	8083,11	482,50	2,246
5(15%R)	58,70	9322,76	8051,44	481,90	2,238
5(20%R)	58,45	9285,33	8016,83	481,30	2,229

Tabla 4.40. Presión, Potencia y Consumo energético a 27°C con la membrana TM820V-440

Por tanto, se muestra en la tabla 4.36 a la menor temperatura (17°C) y 5 años de operación sin reemplazo el mayor consumo energético de 6.274 kWh/m³ con las membranas de alto rechazo de sales (TM820K-440); y en la tabla 4.40 a la mayor temperatura (27°C) y al arranque de la planta el menor consumo energético 2.200 kWh/m³ con los elementos de bajo consumo energético (TM820V-440), siendo a 5 años con reemplazo del 20% anual un consumo de energía de 2.229 kWh/m³. A partir de estos resultados se puede apreciar la importancia del reemplazo de membranas y de la elección de las más adecuada mediante un pilotaje porque la diferencia del consumo energético de un caso y otro es considerable.

En este sentido se plantean varias soluciones eficientes energéticamente que dependen de las particularidades de las plantas desaladoras de agua de mar donde se vayan a implantar. Por ejemplo, se puede realizar una clasificación con la solución de introducción de energías renovables más adecuada a su caso, en función de si hay viento considerable en su zona, radiación solar suficiente, espacio para colocar las placas solares o los aerogeneradores, etc., como se muestra a continuación en la tabla 4.41. Con la introducción de fotovoltaica normalmente se puede conseguir hasta un 30% de energía de la que necesita la planta, y el 70% restante se abastece a través de energía eólica cuando se pueda. En este sentido, se plantea para líneas futuras la inclusión de energías renovables en cierta tipología de plantas que puedan reducir la huella de carbono y ecológica de las mismas introduciendo preferentemente energía solar fotovoltaica o energía eólica.

Denominación	Producción (m ³ /d)	Consumo (kWh/m ³)	Isla	Habitantes por planta	Solución de Renovables
Cercado de Don Andrés	200	3,50	Lanzarote	Regadío	Fotovoltaica
Lanzarote III 1	10000	3,50	Lanzarote	10541	Eólica
Lanzarote III 2	5000	3,50	Lanzarote	5271	Eólica
Lanzarote III 3	5000	3,50	Lanzarote	5271	Eólica
Lanzarote IV	20000	3,04	Lanzarote	21083	Eólica
Lanzarote V	18000	2,61	Lanzarote	18975	Eólica
Aeropuerto	700	3,04	Lanzarote	18327	Fotovoltaica
Agua Park	30	3,04	Lanzarote	500	Fotovoltaica
Apartamentos Ficus	60	3,50	Lanzarote	120	Fotovoltaica
Apartamentos Puerto Tahiche	150	3,50	Lanzarote	300	Fotovoltaica
Apartamentos Trebol	80	3,50	Lanzarote	160	Fotovoltaica
Ercros	2500	3,50	Lanzarote	11057	Eólica
Ercros	2200	3,50	Lanzarote	9731	Eólica
Famara	350	3,50	Lanzarote	700	Fotovoltaica
Hotel Golf y Mar	90	3,50	Lanzarote	180	Fotovoltaica
Hotel Gran Meliá Salinas	400	2,61	Lanzarote	800	Fotovoltaica
Hotel Playa Verde	250	3,50	Lanzarote	500	Fotovoltaica
Hotel Teguisse Playa	250	3,50	Lanzarote	500	Fotovoltaica
La Galea	150	3,04	Lanzarote	300	Fotovoltaica
Lanzarote Beach Club II	70	3,04	Lanzarote	140	Fotovoltaica
Las Arenas, Costa Teguisse	80	3,04	Lanzarote	160	Fotovoltaica
Playa Roca	250	3,04	Lanzarote	500	Fotovoltaica
Apartamentos Don Paco	320	2,61	Lanzarote	640	Fotovoltaica
Apartamentos Sol Lanzarote	350	2,61	Lanzarote	700	Fotovoltaica
Cdad Apartamentos CAMP		2,61	Lanzarote	Turismo	Fotovoltaica
Holiday Land S.A.	3000	3,50	Lanzarote	6000	Eólica
Hotel Fariones Playa	500	3,50	Lanzarote	1000	Fotovoltaica
Hotel Playa Azul	300	3,50	Lanzarote	600	Fotovoltaica
Hoteles Canarios S.A.		3,50	Lanzarote	Turismo	Fotovoltaica
Iberhotel		3,50	Lanzarote	Turismo	Fotovoltaica
Zorilla	40	3,04	Lanzarote	80	Fotovoltaica
Hotel Jameos Playa	336	2,61	Lanzarote	672	Fotovoltaica
La Santa Sport I	250	3,50	Lanzarote	500	Fotovoltaica
La Santa Sport II	250	3,50	Lanzarote	500	Fotovoltaica
Ria La Santa	400	3,50	Lanzarote	800	Fotovoltaica
Apartamentos Son Boy	500	3,04	Lanzarote	1000	Fotovoltaica
Bungalows Atlantic Gardens		3,50	Lanzarote	Turismo	Fotovoltaica
Costa los Limones S.A.	350	3,50	Lanzarote	700	Fotovoltaica
Hotel Corbeta		3,50	Lanzarote	Turismo	Fotovoltaica
Hotel Costa Calero	324	3,04	Lanzarote	642	Fotovoltaica
Marina Rubicón	300	3,04	Lanzarote	600	Fotovoltaica
Hotel Paradise Island	300	3,04	Lanzarote	600	Fotovoltaica
Hotel Princesa Yaiza	500	3,04	Lanzarote	1000	Fotovoltaica
Hotel Rubicón Palace	450	3,04	Lanzarote	900	Fotovoltaica
Inalsa Sur 1	600	3,50	Lanzarote	1859	Fotovoltaica
Inalsa Sur 2	1200	3,50	Lanzarote	3718	Eólica
Inalsa Sur 3	3000	3,50	Lanzarote	9294	Eólica
Janubio		3,04	Lanzarote	Turismo	Fotovoltaica

Lanzasur Club	200	3,04	Lanzarote	400	Fotovoltaica
Playa Blanca S.A.		3,50	Lanzarote	Turismo	Fotovoltaica
Club Lanzarote	4500	3,50	Lanzarote	9000	Eólica
Apartamentos Moromar	250	3,50	Lanzarote	500	Fotovoltaica
Gea Fonds Numero Uno		3,50	Lanzarote	Turismo	Fotovoltaica
Grupo Rosa	1000	3,50	Lanzarote	2000	Eólica
Hipotels	300	3,50	Lanzarote	600	Fotovoltaica
Hotel Corona	300	3,50	Lanzarote	600	Fotovoltaica
Hotel Costa Calero S.L.	300	3,04	Lanzarote	600	Fotovoltaica
Hotel Sunbou	500	3,04	Lanzarote	1000	Fotovoltaica
Isla Lobos	100	3,04	Lanzarote	200	Fotovoltaica
Leas Hotel S.A.		3,50	Lanzarote	Turismo	Fotovoltaica
Niels Prahm		3,50	Lanzarote	Turismo	Fotovoltaica
Occidental Hotel Oasis	250	3,04	Lanzarote	500	Fotovoltaica
Playa Flamingo	200	3,04	Lanzarote	400	Fotovoltaica
Tjaereborg Timesharing, S.A.	500	3,04	Lanzarote	1000	Fotovoltaica
Aguas de la Antigua	4800	3,04	Fuerteventura	11948	Eólica
Grupo Turístico Barceló, S.L.	240	3,50	Fuerteventura	480	Fotovoltaica
Aguas Cristóbal Franquis, S.L.	1200	3,50	Fuerteventura	2400	Eólica
Anjoca Canarias, S.A.	3000	3,50	Fuerteventura	6000	Eólica
Ramiterra, S.L.	3000	3,04	Fuerteventura	6000	Eólica
Inver Canary Dos, S.L.	300	3,04	Fuerteventura	600	Fotovoltaica
Aguas de La Oliva	9000	3,04	Fuerteventura	17920	Eólica
Consorcio de Aguas	4000	3,04	Fuerteventura	7964	Eólica
Parque de Ocio y Cultura	300	3,04	Fuerteventura	600	Fotovoltaica
Parque de Ocio y Cultura	90	3,04	Fuerteventura	180	Fotovoltaica
RIU Palace Tres Islas	100	3,50	Fuerteventura	200	Fotovoltaica
RIU Oliva Beach	400	3,50	Fuerteventura	800	Fotovoltaica
Nombredo, S.L.	500	3,50	Fuerteventura	1000	Fotovoltaica
Consorcio de Aguas	4400	3,50	Fuerteventura	20539	Eólica
Puertito de la Cruz	60	3,50	Fuerteventura	120	Fotovoltaica
Vinamar, S.A.	3600	3,50	Fuerteventura	7200	Eólica
Fuercan, S.L. Cañada Río I	2000	3,50	Fuerteventura	4000	Eólica
Fuercan, S.L. Cañada Río II	1000	3,04	Fuerteventura	2000	Eólica
Fuercan, S.L. Cañada Río III	2000	3,04	Fuerteventura	4000	Eólica
Club Aldiana	200	3,50	Fuerteventura	400	Fotovoltaica
Erwin Sick	30	3,50	Fuerteventura	60	Fotovoltaica
Esquinzo Urbanización II	1200	3,50	Fuerteventura	2400	Eólica
Esquinzo Urbanización III	1200	3,50	Fuerteventura	2400	Eólica
Hotel Sol Élite Los Gorriones 1	400	3,50	Fuerteventura	800	Fotovoltaica
Hotel Sol Élite Los Gorriones 2	400	3,50	Fuerteventura	800	Fotovoltaica
Stella Canaris I	300	3,50	Fuerteventura	600	Fotovoltaica
Stella Canaris II	300	3,50	Fuerteventura	600	Fotovoltaica
Stella Canaris III	250	3,50	Fuerteventura	500	Fotovoltaica
Hotel H 10 Playa Esmeralda.	250	3,50	Fuerteventura	500	Fotovoltaica
Hotel "Club Paraíso Playa"	300	3,50	Fuerteventura	600	Fotovoltaica
Urbanización Costa Calma.	110	3,50	Fuerteventura	220	Fotovoltaica
Urbanización Tierra Dorada.	120	3,50	Fuerteventura	240	Fotovoltaica
Zoo-Parque La Lajita.	1300	3,50	Fuerteventura	500	Eólica
Apartamentos Esmeralda	120	3,50	Fuerteventura	240	Fotovoltaica

Hotel H10 Tindaya	280	3,50	Fuerteventura	560	Fotovoltaica
Aparthotels Morasol	80	3,50	Fuerteventura	160	Fotovoltaica
Consorcio de Aguas	36500	3,50	Fuerteventura	39382	Eólica
Aeropuerto	500	3,50	Fuerteventura	15439	Fotovoltaica
GranTarajal	4000	3,50	Fuerteventura	14791	Eólica
Sotavento, S.A.	2925	3,50	Fuerteventura	5850	Eólica
Arucas-Moya I	10000	3,50	Gran Canaria	45419	Eólica
Granja experimental	500	3,50	Gran Canaria	Regadío	Fotovoltaica
Granja experimental	500	3,50	Gran Canaria	Regadío	Fotovoltaica
Fuentes de Quintanilla	800	3,04	Gran Canaria	Regadío	Fotovoltaica
Granja experimental	500	3,50	Gran Canaria	Regadío	Fotovoltaica
Gáldar-Agaete I	3000	3,50	Gran Canaria	16199	Eólica
Gáldar II	7000	3,04	Gran Canaria	37799	Eólica
Aragua	15000	3,50	Gran Canaria	Regadío	Eólica
Guía I	5000	3,50	Gran Canaria	6962	Eólica
Guía II	5000	2,61	Gran Canaria	6962	Eólica
Félix Santiago Melián	5000	2,61	Gran Canaria	Regadío	Eólica
Las Palmas III	65000	3,50	Gran Canaria	307545	Eólica
Las Palmas IV	15000	2,61	Gran Canaria	70972	Eólica
BAXTER S.A.	100	3,50	Gran Canaria	200	Fotovoltaica
El Corte Inglés, S.A.	300	3,50	Gran Canaria	3000	Fotovoltaica
Anfi del Mar I	250	3,50	Gran Canaria	500	Fotovoltaica
Anfi del Mar II	250	3,50	Gran Canaria	500	Fotovoltaica
AQUALING	2000	3,04	Gran Canaria	4000	Eólica
Puerto Rico	4000	3,04	Gran Canaria	8000	Eólica
Puerto Rico I	4000	3,04	Gran Canaria	8000	Eólica
Hotel Taurito	400	3,04	Gran Canaria	800	Fotovoltaica
Hotel Costa Meloneras	300	3,04	Gran Canaria	600	Fotovoltaica
Hotel Villa del Conde	500	3,04	Gran Canaria	1000	Fotovoltaica
Bahia Feliz	600	3,50	Gran Canaria	1200	Fotovoltaica
Bonny	8000	2,61	Gran Canaria	Regadío	Eólica
Maspalomas I Mar	14500	3,50	Gran Canaria	19572	Eólica
Maspalomas II	25200	3,04	Gran Canaria	34016	Eólica
UNELCO II	600	3,50	Gran Canaria	Industria	Fotovoltaica
Ayto. San Nicolas	5000	3,04	Gran Canaria	7608	Eólica
Agricultores de la Aldea	5400	3,04	Gran Canaria	Regadío	Eólica
Sureste III	8000	3,50	Gran Canaria	133846	Eólica
Aeropuerto I	1000	3,50	Gran Canaria	24791	Eólica
Salinetas	16000	3,50	Gran Canaria	102424	Eólica
Aeropuerto II	500	3,50	Gran Canaria	12396	Fotovoltaica
Hoya León	1500	3,50	Gran Canaria	Regadío	Eólica
Bco. García Ruiz	1000	3,50	Gran Canaria	Regadío	Eólica
Mando Aéreo de Canarias	1000	3,50	Gran Canaria	3000	Eólica
UNELCO I	1000	3,50	Gran Canaria	Industria	Eólica
Anfi del Mar	1500	3,04	Gran Canaria	3000	Eólica
Norcrost, S.A.	170	3,04	Gran Canaria	340	Fotovoltaica
Adeje Arona	30000	3,04	Tenerife	126728	Eólica
Gran Hotel Anthelia Park		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
La Caleta (Ayto. Adeje)	10000	3,04	Tenerife	20000	Eólica
UTE Tenerife Oeste	14000	3,04	Tenerife	40000	Eólica

Hotel Sheraton La Caleta		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Hotel Gran Tacande		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Hotel Rocas de Nivaria, Playa Paraíso		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Hotel Bahía del Duque, Costa Adeje		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Siam Park		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Tenerife-Sol S. A.		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Hotel Conquistador, Playa Las Américas		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Arona Gran Hotel, Los Cristianos		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Bonny S.A., Finca El Fraile.		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
El Toscal, La Estrella (Las Galletas)		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Complejo Mare Nostrum, P. Las Américas		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Hotel Villa Cortés		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Buenavista Golf S.A,		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Rural Teno		3,04	Tenerife	Agrícola	Fotovoltaica
Ropa Rent, S.A.		3,50	Tenerife	Industria	Fotovoltaica
Unelco	600	3,50	Tenerife	Industria	Fotovoltaica
I.T.E.R. Cabildo de Tenerife	14	3,50	Tenerife	Industria	Fotovoltaica
C.T. en P.I. de Granadilla		3,50	Tenerife	Industria	Fotovoltaica
Bonny S.A., Finca El Confital.		3,50	Tenerife	Agrícola	Fotovoltaica
Polígono Industrial de Granadilla (portátil)		3,50	Tenerife	Industria	Fotovoltaica
UTE Desalinizadora de	14000	3,50	Tenerife	50146	Eólica
Guía de ISORA Hoya de la		3,50	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Club Campo Guía de Isora, Abama		3,50	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Hotel Meliá Palacio de Isora, Alcalá.		3,50	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Loro Parque		3,04	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Santa Cruz I	20000	3,04	Tenerife	204856	Eólica
Recinto Portuario Santa Cruz (portátil)		3,04	Tenerife	Industria	Fotovoltaica
CEPSA	1000	3,04	Tenerife	Industria	Eólica
Hotel Playa la Arena		3,50	Tenerife	Turismo	Fotovoltaica
Hotel Jardín Tecina	2000	3,04	La Gomera	4000	Eólica
La Restinga	500	3,04	El Hierro	297	Fotovoltaica
La Restinga	1200	3,04	El Hierro	712	Eólica
El Cangrejo	1200	3,04	El Hierro	2478	Eólica
El Cangrejo	1200	3,50	El Hierro	2478	Eólica
El Golfo	1350	3,50	El Hierro	4093	Eólica

Tabla 4.41. Desaladoras de agua marina existentes en las Islas Canarias, consumo y solución de energías renovables. (Fuente FCCA 2013, REE 2020 y elaboración propia) [122]

El número de habitantes abastecidos de agua potable por cada planta se puede calcular como número de habitantes específico dividiendo por la superficie, tal y como se explicó en el capítulo 3.

Si realizamos este cálculo por isla se obtiene la siguiente tabla de datos 4.42:

N_{hab}	Isla	Superficie (km ²)	Producción (m ³ /d)	N_e (hab/km ²)
10968	El Hierro	268,71	5450	41
82671	La Palma	708,32	-	117
21503	La Gomera	369,76	2000	58
917841	Tenerife	2034,38	106034	451
851231	Gran Canaria	1560,10	220870	546
116886	Fuerteventura	1659,00	90755	71
152289	Lanzarote	845,94	87480	180

Tabla 4.42. Producción de las desaladoras de agua marina existentes en las Islas Canarias y número de habitantes específico por superficie.

Se puede apreciar en la tabla 4.42 que la densidad poblacional mayor se encuentra en la isla de Gran Canaria, seguida de cerca por Tenerife, las cuales se distancia mucho del resto de islas. Del mismo modo en la tabla 4.43 podemos comparar la producción de agua permeada por superficie de cada isla (P/S) con el número de habitantes específico, donde todas las islas de la provincia oriental tienen mayores valores encabezadas por Gran Canaria.

Si realizamos este cálculo por isla se obtiene la siguiente tabla de datos 4.43:

N_{hab}	Isla	Superficie (km ²)	P/S (m ³ /d/km ²)	N_e (hab/km ²)
10968	El Hierro	268,71	20,28	41
82671	La Palma	708,32	-	117
21503	La Gomera	369,76	5,41	58
917841	Tenerife	2034,38	52,12	451
851231	Gran Canaria	1560,10	141,57	546
116886	Fuerteventura	1659,00	54,71	71
152289	Lanzarote	845,94	103,41	180

Tabla 4.43. Producción de las desaladoras de agua marina existentes en las Islas Canarias por cada isla y superficie.

Recordando el dato anterior de absorción de una hectárea equivalente (2 tCO₂/ha/año) y cruzando estos dos últimos valores se pueden calcular las emisiones admisibles de CO₂ por habitante/año en 3,38 tCO₂/persona/año. Los valores se vuelcan en la siguiente tabla 4.44:

CATEGORÍA	ABS. HECTÁREA	SUPERFICIE	HUELLA	EMISIÓN
SUPERFICIE	EQUIVALENTE	(millones ha)	ECOLÓGICA	SOSTENIBLE CO ₂
	(tCO ₂ /ha/año)		SOSTENIBLE	(tCO ₂ /persona/año)
Bosques	1,46	3858,10	0,54	0,79
Cultivos	0,31	1958,32	0,27	0,09
Prados y Vegetación	0,16	3363,72	0,47	0,08
Aguas	0,56	2920,00	0,41	0,23
Superficie	2,50	12190,14	1,69	3,39
Superficie	1,93	14997,2		
Superficie	2,00	51007,20		

Tabla 4.44. Superficie útil, Huella Ecológica sostenible y emisión sostenible de CO₂. [120]

A continuación se indica en la tabla 4.45 las instalaciones desaladoras de agua marina existentes en las Islas Canarias, según los cálculos explicados anteriormente, donde se puede apreciar los diferentes consumos energéticos de cada una de ellas partiendo casi todas de una salinidad de alimentación muy similar, por lo que son susceptibles de mejora aplicando los mismos estudios llevados a cabo en Alicante o Carboneras, pudiendo reducir esos consumos energéticos actuales en torno a 3,50 kWh/m³ hasta valores de 2,61 kWh/m³ si combinamos estas mejoras energéticas estudiadas introduciendo recuperadores de energía para la salmuera de estas instalaciones. Del mismo modo se calcula la huella del carbono y huella ecológica a partir del consumo energético estimado de cada instalación teniendo en cuenta el factor mix de cada isla expresado en la tabla 4.45.

Denominación	Producción (m ³ /d)	Consumo (kWh/m ³)	Coste Económico (€/m ³)	Huella Carbono (kgCO ₂ /m ³)	Huella Ecológica (m ² /año/ kgCO ₂ / m ³)
Cercado de Don Andrés	200	3,50	0,041	2,194	10,749
Lanzarote III 1	10000	3,50	0,041	2,194	10,749
Lanzarote III 2	5000	3,50	0,041	2,194	10,749
Lanzarote III 3	5000	3,50	0,041	2,194	10,749
Lanzarote IV	20000	3,04	0,035	1,905	9,336
Lanzarote V	18000	2,61	0,030	1,636	8,015
Aeropuerto	700	3,04	0,035	1,905	9,336
Agua Park	30	3,04	0,035	1,905	9,336
Apartamentos Ficus	60	3,50	0,041	2,194	10,749
Apartamentos Puerto Tahiche	150	3,50	0,041	2,194	10,749
Apartamentos Trebol	80	3,50	0,041	2,194	10,749
Ercros	2500	3,50	0,041	2,194	10,749
Ercros	2200	3,50	0,041	2,194	10,749
Famara	350	3,50	0,041	2,194	10,749
Hotel Golf y Mar	90	3,50	0,041	2,194	10,749
Hotel Gran Meliá Salinas	400	2,61	0,030	1,636	8,015
Hotel Playa Verde	250	3,50	0,041	2,194	10,749
Hotel Teguisse Playa	250	3,50	0,041	2,194	10,749
La Galea	150	3,04	0,035	1,905	9,336
Lanzarote Beach Club II	70	3,04	0,035	1,905	9,336
Las Arenas, Costa Teguisse	80	3,04	0,035	1,905	9,336
Playa Roca	250	3,04	0,035	1,905	9,336
Apartamentos Don Paco Castilla	320	2,61	0,030	1,636	8,015
Apartamentos Sol Lanzarote	350	2,61	0,030	1,636	8,015
Cdad Apartamentos CAMP		2,61	0,030	1,636	8,015
Holiday Land S.A.	3000	3,50	0,041	2,194	10,749
Hotel Fariones Playa	500	3,50	0,041	2,194	10,749
Hotel Playa Azul	300	3,50	0,041	2,194	10,749
Hoteles Canarias S.A.		3,50	0,041	2,194	10,749
Iberhotel		3,50	0,041	2,194	10,749
Zorilla	40	3,04	0,035	1,905	9,336
Hotel Jameos Playa	336	2,61	0,030	1,636	8,015
La Santa Sport I	250	3,50	0,041	2,194	10,749
La Santa Sport II	250	3,50	0,041	2,194	10,749
Ria La Santa	400	3,50	0,041	2,194	10,749
Apartamentos Son Boy Family	500	3,04	0,035	1,905	9,336
Bungalows Atlantic Gardens		3,50	0,041	2,194	10,749
Costa los Limones S.A.	350	3,50	0,041	2,194	10,749
Hotel Corbeta		3,50	0,041	2,194	10,749
Hotel Costa Calero	324	3,04	0,035	1,905	9,336
Marina Rubicón	300	3,04	0,035	1,905	9,336
Hotel Paradise Island	300	3,04	0,035	1,905	9,336
Hotel Princesa Yaiza	500	3,04	0,035	1,905	9,336
Hotel Rubicón Palace	450	3,04	0,035	1,905	9,336
Inalsa Sur 1	600	3,50	0,041	2,194	10,749

Inalsa Sur 2	1200	3,50	0,041	2,194	10,749
Inalsa Sur 3	3000	3,50	0,041	2,194	10,749
Janubio		3,04	0,035	1,905	9,336
Lanzasur Club	200	3,04	0,035	1,905	9,336
Playa Blanca S.A.		3,50	0,041	2,194	10,749
Club Lanzarote	4500	3,50	0,041	2,194	10,749
Apartamentos Moromar	250	3,50	0,041	2,194	10,749
Gea Fonds Numero Uno Lanzarote S.A.		3,50	0,041	2,194	10,749
Grupo Rosa	1000	3,50	0,041	2,194	10,749
Hipotels	300	3,50	0,041	2,194	10,749
Hotel Corona	300	3,50	0,041	2,194	10,749
Hotel Costa Calero S.L.	300	3,04	0,035	1,905	9,336
Hotel Sunbou	500	3,04	0,035	1,905	9,336
Isla Lobos	100	3,04	0,035	1,905	9,336
Leas Hotel S.A.		3,50	0,041	2,194	10,749
Niels Prahm		3,50	0,041	2,194	10,749
Occidental Hotel Oasis	250	3,04	0,035	1,905	9,336
Playa Flamingo	200	3,04	0,035	1,905	9,336
Tjaereborg Timesharing, S.A.	500	3,04	0,035	1,905	9,336
Empresa Mixta de Aguas de	4800	3,04	0,035	2,091	10,246
Grupo Turístico Barceló, S.L.	240	3,50	0,041	2,407	11,797
Aguas Cristóbal Franquis, S.L.	1200	3,50	0,041	2,407	11,797
Anjoca Canarias, S.A.	3000	3,50	0,041	2,407	11,797
Ramiterra, S.L.	3000	3,04	0,035	2,091	10,246
Inver Canary Dos, S.L.	300	3,04	0,035	2,091	10,246
Suministros de Agua La Oliva	9000	3,04	0,035	2,091	10,246
Consorcio de Furteventura	4000	3,04	0,035	2,091	10,246
Parque de Ocio (BAKU) 1	300	3,04	0,035	2,091	10,246
Parque de Ocio (BAKU) 2	90	3,04	0,035	2,091	10,246
RIU Palace Tres Islas	100	3,50	0,041	2,407	11,797
RIU Oliva Beach	400	3,50	0,041	2,407	11,797
Nombredo, S.L.	500	3,50	0,041	2,407	11,797
Consorcio de Aguas	4400	3,50	0,041	2,407	11,797
Puertito de la Cruz	60	3,50	0,041	2,407	11,797
Vinamar, S.A.	3600	3,50	0,041	2,407	11,797
Fuercan, S.L. Cañada del Rio I	2000	3,50	0,041	2,407	11,797
Fuercan, S.L. Cañada del Rio II	1000	3,04	0,035	2,091	10,246
Fuercan, S.L. Cañada del Rio III	2000	3,04	0,035	2,091	10,246
Club Aldiana	200	3,50	0,041	2,407	11,797
Erwin Sick	30	3,50	0,041	2,407	11,797
Esquinzo Urbanización II	1200	3,50	0,041	2,407	11,797
Esquinzo Urbanización III	1200	3,50	0,041	2,407	11,797
Hotel Sol Élite Los Gorriones 1	400	3,50	0,041	2,407	11,797
Hotel Sol Élite Los Gorriones 2	400	3,50	0,041	2,407	11,797
Stella Canarias I	300	3,50	0,041	2,407	11,797
Stella Canarias II	300	3,50	0,041	2,407	11,797
Stella Canarias III	250	3,50	0,041	2,407	11,797
Hotel H 10 Playa Esmeralda.	250	3,50	0,041	2,407	11,797
Hotel "Club Paraíso Playa"	300	3,50	0,041	2,407	11,797
Urbanización Costa Calma.	110	3,50	0,041	2,407	11,797

Urbanización Tierra Dorada.	120	3,50	0,041	2,407	11,797
Zoo-Parque La Lajita.	1300	3,50	0,041	2,407	11,797
Apartamentos Esmeralda	120	3,50	0,041	2,407	11,797
Hotel H10 Tindaya	280	3,50	0,041	2,407	11,797
Aparthotels Morasol	80	3,50	0,041	2,407	11,797
Consortio de Aguas	36500	3,50	0,041	2,407	11,797
Aeropuerto	500	3,50	0,041	2,407	11,797
GranTarajal	4000	3,50	0,041	2,407	11,797
Sotavento, S.A.	2925	3,50	0,041	2,407	11,797
Aruacas-Moya I	10000	3,50	0,041	2,408	11,800
Granja experimental	500	3,50	0,041	2,408	11,800
Granja experimental	500	3,50	0,041	2,408	11,800
Fuentes de Quintanilla	800	3,04	0,035	2,092	10,250
Granja experimental	500	3,50	0,041	2,408	11,800
Gáldar-Agaete I	3000	3,50	0,041	2,408	11,800
Gáldar II	7000	3,04	0,035	2,092	10,250
Aragua	15000	3,50	0,041	2,408	11,800
Guía I	5000	3,50	0,041	2,408	11,800
Guía II	5000	2,61	0,030	1,796	8,800
Félix Santiago Melián	5000	2,61	0,030	1,796	8,800
Las Palmas III	65000	3,50	0,041	2,408	11,800
Las Palmas IV	15000	2,61	0,030	1,796	8,800
BAXTER S.A.	100	3,50	0,041	2,408	11,800
El Corte Inglés, S.A.	300	3,50	0,041	2,408	11,800
Anfi del Mar I	250	3,50	0,041	2,408	11,800
Anfi del Mar II	250	3,50	0,041	2,408	11,800
AQUALING	2000	3,04	0,035	2,092	10,250
Puerto Rico I	4000	3,04	0,035	2,092	10,250
Puerto Rico II	4000	3,04	0,035	2,092	10,250
Hotel Taurito	400	3,04	0,035	2,092	10,250
Hotel Costa Meloneras	300	3,04	0,035	2,092	10,250
Hotel Villa del Conde	500	3,04	0,035	2,092	10,250
Bahia Feliz	600	3,50	0,041	2,408	11,800
Bonny	8000	2,61	0,030	1,796	8,800
Maspalomas I Mar	14500	3,50	0,041	2,408	11,800
Maspalomas II	25200	3,04	0,035	2,092	10,250
UNELCO II	600	3,50	0,041	2,408	11,800
Ayto. San Nicolas	5000	3,04	0,035	2,092	10,250
Agricultores de la Aldea	5400	3,04	0,035	2,092	10,250
Sureste III	8000	3,50	0,041	2,408	11,800
Aeropuerto I	1000	3,50	0,041	2,408	11,800
Salinetas	16000	3,50	0,041	2,408	11,800
Aeropuerto II	500	3,50	0,041	2,408	11,800
Hoya León	1500	3,50	0,041	2,408	11,800
Bco. García Ruiz	1000	3,50	0,041	2,408	11,800
Mando Aéreo de Canarias	1000	3,50	0,041	2,408	11,800
UNELCO I	1000	3,50	0,041	2,408	11,800
Anfi del Mar	1500	3,04	0,035	2,092	10,250
Norcrost, S.A.	170	3,04	0,035	2,092	10,250
Adeje Arona	30000	3,04	0,035	2,093	10,257

Gran Hotel Anthelia Park		3,04	0,035	2,093	10,257
La Caleta (Ayto. Adeje)		3,04	0,035	2,093	10,257
Hotel Sheraton La Caleta		3,04	0,035	2,093	10,257
Hotel Gran Tacande		3,04	0,035	2,093	10,257
Hotel Rocas de Nivaria, Playa Paraíso		3,04	0,035	2,093	10,257
Hotel Bahía del Duque, Costa Adeje		3,04	0,035	2,093	10,257
Siam Park		3,04	0,035	2,093	10,257
Tenerife-Sol S. A.		3,04	0,035	2,093	10,257
Hotel Conquistador, P. de Las Américas		3,04	0,035	2,093	10,257
Arona Gran Hotel, Los Cristianos		3,04	0,035	2,093	10,257
Bonny S.A., Finca El Fraile.		3,04	0,035	2,093	10,257
El Toscal, La Estrella (Las Galletas)		3,04	0,035	2,093	10,257
Complejo Mare Nostrum, P. Las Américas		3,04	0,035	2,093	10,257
Hotel Villa Cortés		3,04	0,035	2,093	10,257
Buenavista Golf S.A,		3,04	0,035	2,093	10,257
Rural Teno		3,04	0,035	2,093	10,257
Ropa Rent, S.A. (P.I. Güímar)		3,04	0,035	2,093	10,257
Unelco	600	3,50	0,041	2,410	11,810
I.T.E.R. Cabildo de Tenerife	14	3,50	0,041	2,410	11,810
C.T. en P.I. de Granadilla		3,50	0,041	2,410	11,810
Bonny S.A., Finca El Confital.		3,50	0,041	2,410	11,810
Polígono Industrial de Granadilla (portátil)		3,50	0,041	2,410	11,810
Guía de ISORA Hoya de la leña		3,50	0,041	2,410	11,810
Club Campo Guía de Isora, Abama		3,50	0,041	2,410	11,810
Hotel Meliá Palacio de Isora, Alcalá.		3,50	0,041	2,410	11,810
Loro Parque		3,50	0,041	2,410	11,810
Santa Cruz I	20000	3,04	0,035	2,093	10,257
Recinto Portuario Santa Cruz (portátil)		3,04	0,035	2,093	10,257
CEPSA	1000	3,04	0,035	2,093	10,257
Hotel Playa la Arena		3,04	0,035	2,093	10,257
Hotel Jardín Tecina	2000	3,04	0,035	1,966	9,632
La Restinga	500	3,50	0,041	1,246	6,107
La Restinga	1200	3,04	0,035	1,083	5,304
El Cangrejo	1200	3,04	0,035	1,083	5,304
El Cangrejo	1200	3,04	0,035	1,083	5,304
El Golfo	1350	3,04	0,035	1,083	5,304

Tabla 4.45. Desaladoras de agua marina existentes en las Islas Canarias. FCCA 2013. REE 2020.

En este sentido se puede confirmar que para una producción anual de agua desalada en Canarias aproximadamente de 660000 m³/día y considerando un consumo energético medio de 3,04 kWh/m³ introduciendo equipos recuperadores de energía de la salmuera, se tiene una huella del Carbono de 1203,84 tCO₂/día por tanto al año son 439402 tCO₂, según se comenta en el capítulo 3. Por otro lado, siguiendo este mismo criterio y utilizando un coeficiente global de la huella ecológica para el cálculo de la misma [88, 92, 93,120], se obtiene un valor de 219701 ha/año de superficie para compensar la huella ecológica que tenemos por la producción de agua desalinizada en

Canarias, siendo la superficie de las Islas Canarias de 749300 ha. Esta huella ecológica por persona, según se explica en el capítulo 3 y teniendo en cuenta que Canarias tiene una población h_{RE} de 2207225 habitantes, supone un valor de 0,1 ha/persona/año y las emisiones por habitante y año son 0,2 t_{CO_2} /persona/año frente a los 3,38 t_{CO_2} /persona/año a nivel mundial, siendo:

h_{RE} = número de habitantes o personas de la región

h_{PR} = número de habitantes o personas de la provincia

h_{MU} = número de habitantes o personas del municipio

h_{PA} = número de habitantes o personas del país

De esta manera, teniendo en cuenta el consumo anual de 2019 de 8878271 MWh en generación no renovable del mix energético actual (diésel, gas, vapor y ciclo combinado) del sistema eléctrico de Canarias, ya que en generación renovable no se producen emisiones y con acuerdo a las tecnologías que satisficieron la demanda se obtiene un valor medio de 0,6 t_{CO_2} /MWh como se explica en el epígrafe anterior. Por tanto, del total anterior instalado, se calcula que se pueden emitir 5326963 t_{CO_2} /año lo que supone 2,4 t_{CO_2} /persona/año. Este último valor supera 12 veces las admisiones admisibles por habitante en Canarias sólo teniendo en cuenta el sector de la desalinización de agua marina.

En la figura 4.36 se pueden apreciar las plantas más significativas de Canarias en tamaño que producen la mayor parte de la huella ecológica anteriormente comentada.

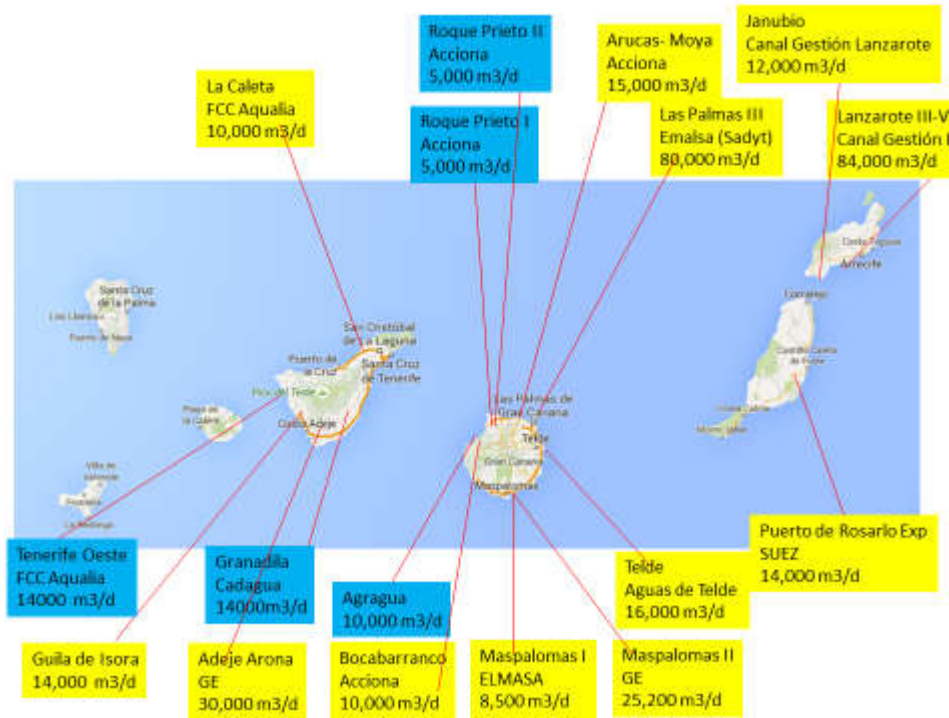


Figura 4.36. Plantas Desalinizadoras de agua de mar más significativas (2019)

De esta manera, se calcula la huella ecológica y del carbono para el escenario de menor consumo de energía (tabla 4.46) y mayor consumo de energía (tabla 4.47), utilizando los valores medios de consumo de energía entre el año 0 y 5 con y sin reemplazo, como se muestra a continuación.

Huella del Carbono (HC) kgCO2/m3 y Huella Ecológica (HE) m2/m3 en el caso de menor								
Huella	Gran Canaria	Tenerife	Lanzarote	Fuerteventura	La Palma	La Gomera	El Hierro	Islas Canarias
HC 5 años 0%	1,5348	1,5359	1,3979	1,5341	1,3109	1,4422	0,7943	1,511
HC 5 años 10%	1,5296	1,5308	1,3932	1,5290	1,3065	1,4374	0,7916	1,506
HC 5 años 15%	1,5269	1,5280	1,3906	1,5262	1,3041	1,4348	0,7902	1,503
HC 5 años 20%	1,5238	1,5249	1,3878	1,5231	1,3015	1,4319	0,7886	1,500
HE 5 años 0%	7,5206	7,5260	6,8495	7,5173	6,4232	7,0670	3,8920	7,405
HE 5 años 10%	7,4953	7,5007	6,8265	7,4920	6,4016	7,0432	3,8789	7,380
HE 5 años 15%	7,4818	7,4872	6,8142	7,4785	6,3901	7,0305	3,8719	7,367
HE 5 años 20%	7,4666	7,4720	6,8004	7,4634	6,3772	7,0163	3,8641	7,352

Tabla 4.46. Huella del Carbono y Ecológica para el caso de menor consumo energético

Huella de Carbono (HC) kgCO ₂ /m ³ y Huella Ecológica (HE) m ² /m ³ en el caso de mayor								
Huella	Gran Canaria	Tenerife	Lanzarote	Fuerteventura	La Palma	La Gomera	El Hierro	Islas Canarias
HC 5 años 0%	4,1000	4,1030	3,7342	4,0983	3,5018	3,8528	2,1218	4,0375
HC 5 años 10%	4,0405	4,0435	3,6800	4,0388	3,4510	3,7968	2,0910	3,9789
HC 5 años 15%	4,0096	4,0125	3,6518	4,0078	3,4245	3,7677	2,0750	3,9484
HC 5 años 20%	3,9769	3,9798	3,6220	3,9751	3,3966	3,7370	2,0581	3,9162
HE 5 años 0%	20,0902	20,1048	18,2975	20,0815	17,1589	18,8786	10,3969	19,7837
HE 5 años 10%	19,7986	19,8130	18,0319	19,7899	16,9098	18,6045	10,2460	19,4964
HE 5 años 15%	19,6468	19,6611	17,8937	19,6383	16,7802	18,4619	10,1675	19,3470
HE 5 años 20%	19,4867	19,5008	17,7479	19,4782	16,6434	18,3114	10,0846	19,1893

Tabla 4.47. Huella del Carbono y Ecológica para el escenario de mayor consumo energético

Se puede hacer una comparación de resultados entre las plantas desalinizadoras de la Península y de las Islas Canarias, en función del diferente factor mix de emisiones en cada una de ellas por ser sistemas aislados frente a la Península por m³ de agua producido. Para hacer la comparación tomamos el caso de menor consumo energético al que aspiramos llegar tanto para Península, según los pilotajes realizados en Carboneras, como para todas las Islas Canarias considerando elementos de bajo consumo energético, recuperadores de energía y reemplazos de membranas anuales de un 20%. En este sentido se puede apreciar en la tabla 4.48 como los resultados en la huella de carbono de la Península son inferiores al de todas las Islas Canarias, debido principalmente a que el valor que hemos tenido en cuenta del factor mix de Península regido por Red Eléctrica Española, S.A. [122] es considerablemente inferior al de todas las islas.

Factor Mix kgCO ₂ /kWh, Huella de Carbono (HC) kgCO ₂ /m ³ y Huella Ecológica (HE) m ² /m ³									
Huella	Gran Canaria	Tenerife	Lanzarote	Fuente-ventura	La Palma	La Gomera	El Hierro	Islas Canarias	Península
Factor Mix	0,6881	0,6886	0,6267	0,6878	0,5877	0,6466	0,3561	0,6776	0,2628
HC 5 años 20%	3,9769	3,9798	3,6220	3,9751	3,3966	3,7370	2,0581	3,9162	0,7576
HE 5 años 20%	19,4867	19,5008	17,7479	19,478	16,643	18,3114	10,084	19,1893	3,7122

Tabla 4.48. Huella de Carbono y Ecológica para el caso de mayor consumo energético

En cuanto a la base de datos de las Islas Canarias de las plantas de agua marina en la tabla 4.45, se calcula la siguiente tabla 4.49 incluyendo la energía consumida (kWh) por metro cúbico producido en cada isla, la huella de carbono, la huella ecológica y también un factor de carbono por isla y metro cúbico producido.

Consumo energético (kWh/m³), Factor CO₂/m³, Huella de Carbono y Huella Ecológica						
	Gran Canaria	Tenerife	Lanzarote	Fuerteventura	La Gomera	El Hierro
kWh/día	724910,80	241038,60	282486,42	306377,10	6080,00	16798,00
kWh/m³	3,28	2,27	3,23	3,38	3,04	3,08
HC (ton/día)	498,79	165,98	177,04	210,74	3,93	5,98
Factor CO₂/m³	0,0023	0,0016	0,0020	0,0023	0,0020	0,0011
HE (ha/día)	244,41	81,33	86,75	103,26	1,93	2,93

Tabla 4.49. Consumo energético, huella de carbono, huella ecológica y factor de CO₂ por isla y m³ de agua producido en las Islas Canarias. Año 2013.

Además, se puede añadir los porcentajes de agua consumida en los diferentes sectores y para todas las islas, como se muestra en la tabla 4.50.

Consumo de agua en Canarias por sectores (%)							
Consumos	Lanzarote	Fuerteventura	Gran Canaria	Tenerife	La Gomera	El Hierro	La Palma
Población	26%	29%	32%	27%	9%	23%	8%
Turismo	40%	48%	11%	10%	9%	3%	2%
Industria	3%	4%	4%	5%	0%	1%	0%
Regadío	23%	11%	43%	49%	69%	63%	77%
Pérdidas	7%	9%	9%	9%	13%	9%	13%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabla 4.50. Porcentajes de consumos de agua por islas y sectores (%). Año 2017. [122]

Se pueden comparar también con el número de turistas y residentes en cada isla al año. Seguidamente se muestra en la tabla 4.51 esta información.

Número de personas por isla separando turistas y residentes al año (m³)							
Islas	Lanzarote	Fuerteventura	Gran Canaria	Tenerife	La Gomera	El Hierro	La Palma
Turistas	2929000	2219000	4478000	5928000	700000	23000	294000
Residentes	144140	112299	855496	908644	21398	10770	82956
Estancia	8,79	9,49	10,02	9,56	11	4,6	10,87

Tabla 4.51. Población por isla dividida en turistas y residentes al año (m³). Año 2014. [123]

Por tanto, se estudian los consumos de agua entre turistas y residentes canarios, como se muestra en la tabla 4.52 destacando el mayor consumo de agua en las islas capitalinas debido a los segundos frente a los primeros.

Consumo de agua (miles de m³), Huella de carbono (ton CO₂) y Huella ecológica (ha) en Canarias para turistas y residentes por año						
	Lanzarote	Fuerteventura	Gran Canaria	Tenerife	La Gomera	El Hierro
Turistas (m³)	9011	7370	15704	19835	2695	37
Residentes (m³)	7516	5845	44626	47445	1096	521
Huella de carbono de turistas	18,24	17,11	35,46	31,05	5,30	0,04
Huella de carbono de residentes	15,21	13,57	100,78	74,27	2,15	0,57
Huella ecológica de turistas	8,94	8,39	17,38	15,22	2,60	0,02
Huella ecológica de residentes	7,46	6,65	49,40	36,41	1,06	0,28
Huella de carbono por turista (kg CO₂)	0,0062	0,0077	0,0079	0,0052	0,0076	0,0018
Huella de carbono por residente (kg CO₂)	0,1055	0,1209	0,1178	0,0817	0,1007	0,0531
Huella ecológica por turista (m²)	0,0305	0,0378	0,0388	0,0257	0,0371	0,0087
Huella ecológica por residente (m²)	0,5173	0,5925	0,5775	0,4007	0,4935	0,2603

Tabla 4.52. Consumos de agua, huella de carbono y ecológica por islas para turistas y residentes canarios en un año (m³). Año 2017. [123]

Se puede apreciar resultados distintos para las Islas Canarias. En este sentido, se pueden establecer objetivos de emisiones de CO₂ para los turistas y los residentes, teniendo en cuenta que una estrategia de reemplazo de membranas que reduzca el consumo de energía en las plantas desaladoras. De lo anteriormente explicado se puede apreciar que para las Islas Canarias es viable el compromiso de una huella de carbono inferior a 1,50 kg CO₂/m³ y una huella ecológica de 7.35 m²/m³ con un 20% de reemplazo de membranas en las plantas desalinizadoras. Por otro lado, en la tabla 4.48 se puede apreciar cómo las emisiones del turismo en el consumo de agua desalinizada suponen en Gran Canaria 35,46 ton CO₂ frente a 100,78 ton CO₂ de los residentes; y una huella ecológica de 17,38 ha para los turistas y 49,40 ha para los residentes. Esto permite establecer líneas futuras para marcar objetivos de emisiones para los turistas y residentes e introducir energías renovables que ayuden a alcanzarlos.

Diagrama de Pareto territorial

El diagrama de Pareto, ya comentado en el capítulo 3, se ha estudiado a nivel territorial para el área de Canarias donde se recogen para este trabajo un total de 180 plantas de desalinizadoras de agua de mar. En este sentido se muestra a continuación en la figura 4.37 el diagrama de Pareto que se corresponde.

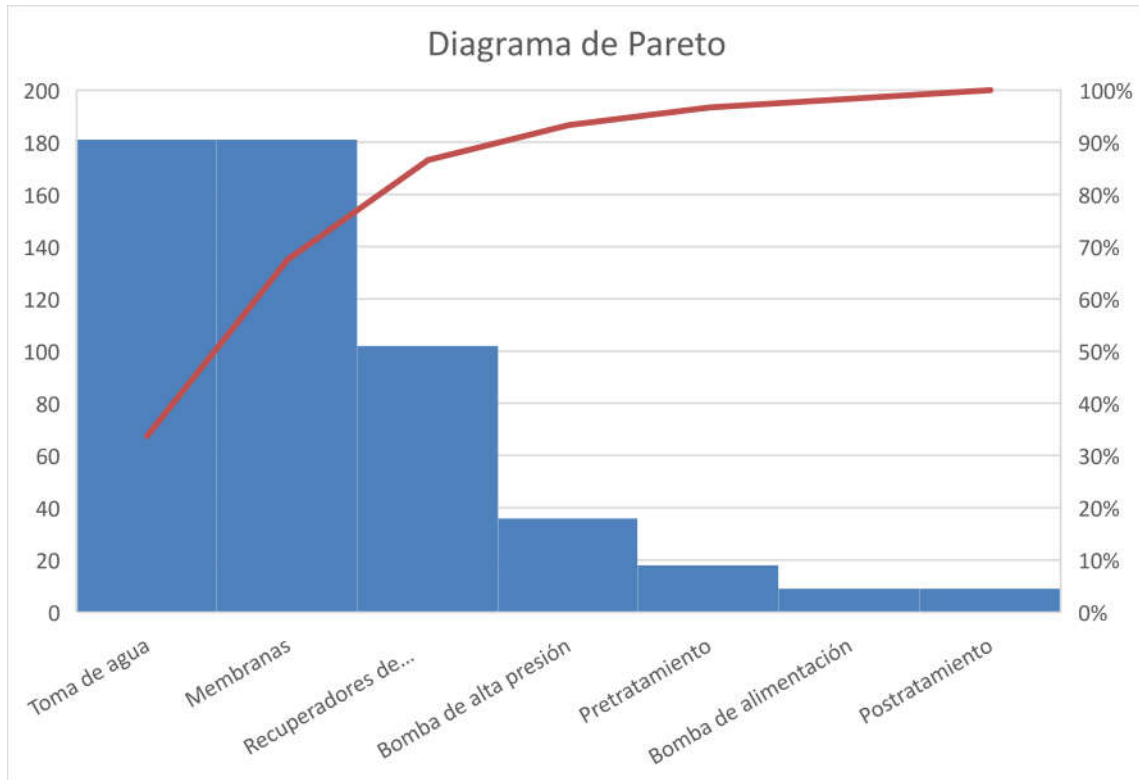


Figura 4.37. Diagrama de Pareto de la planta desalinizadora

Se puede observar como las tomas de decisiones más importantes se basan en la decisión sobre la captación de agua de alimentación, las membranas y los recuperadores de energía, que influyen en el 90% de la posible mejora energética del sistema. En este sentido se van a estudiar principalmente los dos primeros elementos en cuanto a la toma de decisiones sobre la toma de agua de alimentación y el tipo de membranas a escoger para la instalación, lo que representa entre el 70% y el 80% de la influencia en la mejora energética propuesta. El tercer aspecto, los recuperadores de energía, no son objeto de este estudio porque no está sujeto a posibles pilotajes en planta sino a la instalación o no de los mismos, cuyo funcionamiento está demostrado en plantas de agua de mar. De todas formas, se aconseja siempre que sea posible introducir equipos de recuperación de energía tipo Dweer o ERI que aprovechen al máximo la presión del rechazo.

En cuanto a la toma de decisiones sobre los elementos de OI, se puede realizar sobre la base de un pilotaje en planta, con el tipo de agua específica a la que se va a enfrentar, o basarnos directamente en las proyecciones y garantías del suministrador. En este sentido, mediante las especificaciones técnicas del fabricante Toray se puede observar como en el caso de la planta desalinizadora de agua de mar de Carboneras con la salinidad propia del lugar a la temperatura intermedia de 15,5°C la conductividad de permeado esperada es de 367 uS/cm mientras que en datos tomados en planta es de

329 uS/cm. Esto significa una diferencia del 19,2%, es decir, tenemos una incertidumbre en torno al 20% siendo las especificaciones del fabricante más conservadoras y aún más las garantías del sistema que se pidieran a posteriori sobre las cuales dependiendo del proyecto vendrían unos factores de seguridad. De esta manera se demuestra la necesidad de la realización de un pilotaje en una planta desalinizadora para eliminar esta incertidumbre prácticamente sin coste alguno para el operador, ya que normalmente las membranas para estas pruebas se suministran gratuitamente por el proveedor evitando el riesgo de equivocarnos con el modelo de membrana, con los costes de todo tipo que ello supone, y se prueban en un tubo preparado que se libera de la planta para esta prueba.

En cuanto a las decisiones sobre la captación de alimentación, si es posible se aconseja toma de pozo playero o sondeo para aprovechar la filtración del terreno y mejorar la calidad del agua de alimentación, siendo ésta más limpia y menos contaminada. Si no es posible por las dimensiones de la planta optaríamos por toma abierta y tanto en un caso como en otro a la profundidad adecuada para estabilizar lo máximo posible la temperatura de trabajo. Del mismo modo a mayor profundidad menor salinidad del agua de mar por lo que se disminuye la presión osmótica y consecuentemente el consumo energético de la instalación.

En este sentido una toma más profunda, estabiliza la Temperatura y disminuye su valor en los períodos de verano-otoño en que ésta es mayor en el agua mejorando el rechazo de boro en los meses más críticos. Esto ayuda a que, mediante la confirmación de pilotajes, se puede optar por elementos de menor consumo de energía frente a los que tienen un alto rechazo de sales que consumen mucho más. Según las especificaciones del fabricante Toray, en el caso y las condiciones de trabajo de la planta desalinizadora de Carboneras, optar por una membrana de alto rechazo de boro modelo TM820K-440 hace trabajar a la planta a una presión de alimentación de 68,1 bar mientras que al aumentar la profundidad de la toma abierta reduciendo la temperatura en los meses críticos para el boro se puede trabajar con la membrana de bajo consumo energético TM820R-440 a 60,1 bar, es decir, 8 bar menos lo que significa un ahorro económico y energético del 11,7%. Aumentar la profundidad de la toma supone también un coste económico basado en el coste de la tubería de PRFV en torno a 35 EUR/m y si fuere necesario una bomba superior de mayor presión que en el caso de Grundfos supone un 5,5% más de coste, aunque normalmente nos vale la misma bomba. Aun así, estos costes son amortizables rápidamente frente al gran ahorro energético y económico que se puede obtener por metro cúbico de agua producida. De esta manera, se justifica

también la relevancia que tiene la elección adecuada de la toma de agua de mar en las plantas desaladoras.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En la presente tesis se ha desarrollado una metodología de análisis para la valoración de la eficiencia energética de las desaladoras de agua de mar, mediante una serie de dimensiones tales como: la energía, la huella de carbono, la huella ecológica, la calidad de agua y los pilotajes para evaluar la operación de nuevas membranas en planta. En este sentido, se pueden exponer las siguientes conclusiones:

- La operación con elementos de OI de alto rechazo a altas presiones de trabajo supone un mayor consumo energético del sistema y por tanto un aumento del coste económico.
- El coste y la energía requerida en el proceso dependen de la calidad de agua exigida y del tipo de membrana utilizada.
- El estudio de elementos estándar de OI para una desaladora de agua marina ayuda a escoger un elemento de ósmosis inversa que disminuya el consumo energético, y por ende los costes operativos de la planta ya que la energía es lo más costoso de la misma.
- Dentro del coste total de la producción de agua lo que más influye es la energía consumida y el tipo de elemento de OI escogida.
- El envejecimiento de las membranas es un factor decisivo con respecto a la energía consumida en la planta, al caudal de agua permeada y a las emisiones producidas. Por ello, se establece una metodología de estudio para tomar decisiones sobre ello.
- La toma de decisión del cambio de membranas es un parámetro muy significativo en la vida de la instalación y se deben tener en cuenta múltiples variables para ello, tales como la presión de trabajo, la calidad del agua de alimentación y el permeado del sistema de ósmosis inversa, la conversión, la temperatura, etc.
- Con la introducción de membranas de última generación de bajo consumo energético y alto rechazo de sales podemos producir agua con la calidad requerida en condiciones más eficientes y sostenibles que con membranas estándar.
- Mediante el análisis del factor mix de emisiones se puede establecer una metodología de cálculo para estimar la huella del carbono del mix energético en el período de tiempo de referencia, teniendo en cuenta la sumatoria de las energías de cada tecnología y el factor mix de emisiones de cada una de ellas.
- Dentro de la metodología propuesta se ha establecido la determinación de la producción de agua por isla en función del factor de emisiones de cada territorio y teniendo en cuenta que se trata de sistemas eléctricos aislados.

- El factor de contaminación asociado a la producción de agua es diferente en cada isla debido a que se trata de sistemas eléctricos aislados y el mix energético del sistema de energía eléctrica es distinto. Por ello, se ha establecido una metodología asociada a cada isla.
- El factor de contaminación de la producción de agua en Canarias es distinto a la Península o el Continente de 0,2628 kgCO₂/kWh, siendo el valor medio en Canarias de 0,6776 kgCO₂/kWh con los siguientes valores por islas de menos a más: El Hierro 0,3561 kgCO₂/kWh, La Palma 0,5877 kgCO₂/kWh, Lanzarote 0,6267 kgCO₂/kWh, La Gomera 0,6466 kgCO₂/kWh, Fuerteventura 0,6878 kgCO₂/kWh, Gran Canaria 0,6881 kgCO₂/kWh y Tenerife 0,6886 kgCO₂/kWh.
- Debido a que el sistema de energía eléctrica es diferente en cada isla, se ocasiona que también exista diferencia en el factor de contaminación para la producción de agua. Por esta razón, se realiza una técnica para la estimación de un factor más adecuado a la realidad en cada isla.
- Una reducción del consumo energético va a repercutir directamente en una mejora medio ambiental por medio de la huella del carbono que producen estas plantas desalinizadoras y de la huella ecológica de las mismas.
- Del mismo modo, el m³ de agua producido en una isla determinada produce una huella ecológica diferente a la de otra isla, debido a que sus factores de contaminación también lo son.
- Los resultados en la huella de carbono de la Península son inferiores al de todas las Islas Canarias, debido principalmente al valor más reducido del factor mix de Península. En este sentido, la huella de carbono del agua producida en Canarias es de 3,9162 kgCO₂/m³ frente a 0,7576 kgCO₂/m³ de la Península, siendo por ejemplo el caso más desfavorable en las islas de Tenerife y Gran Canaria con 19,5008 kgCO₂/m³ y 19,4867 kgCO₂/m³ respectivamente.
- En cuanto a la huella ecológica del agua producida los resultados son similares, siendo en la Península 3,7122 m²/m³ y en Canarias 19,1893 m²/m³, donde los casos más desfavorables se encuentran igualmente en Gran Canaria y Tenerife con 3,9798 kgCO₂/m³ y 3,9769 kgCO₂/m³ respectivamente.
- En el caso de la huella ecológica por habitante, se consideran residentes y turistas por separado. La huella ecológica por turista al año debido a su consumo de agua en el menor de los casos es en la isla de El Hierro con 0,0087 m² mientras que el mayor valor se encuentra en Gran Canaria con 0,0388 m². En cuanto a la huella ecológica por residente al año, el menor de los casos se encuentra también en la isla de El Hierro con 0,2603 m² mientras que el mayor valor se encuentra en Fuerteventura con 0,5925 m².

- La introducción de un pilotaje por OI en una planta desalinizadora de agua marina, cuyos consumos energéticos son muy altos y la salinidad de entrada es mayor que para el tratamiento de otros tipos de agua, es fundamental para optimizar sus recursos. De ahí la necesidad de la realización de un análisis para la valoración de la eficiencia energética de las mismas.
- En este sentido se desarrolló un modelo específico para identificar la calidad del agua según la operación, asociado a la concentración de boro en la instalación desaladora del Canal de Alicante 1.
- Del mismo modo, basados en la experiencia de la prueba piloto en la planta desalinizadora de Carboneras se concluye la necesidad de la realización de pilotajes insitu (medición de temperaturas, conductividades, boro, caudales, presiones, etc.), que conduzcan a comparar el rendimiento de las membranas de diferentes fabricantes para recopilar la información necesaria, y basar las futuras decisiones en relación con los reemplazos y actualizaciones en planta con las nuevas membranas existentes en el mercado.

En cuanto a las líneas futuras a desarrollar a partir de este estudio se pueden destacar las siguientes:

- Las emisiones totales asociadas a la producción del agua en las plantas desalinizadoras dependen de la relación entre la fracción renovable y no renovable del sistema eléctrico del que se consume la energía para las plantas, y de la energía renovable que se produzca por la propia instalación. Por ello, se plantea la inclusión de energías renovables en cierta tipología de plantas que puedan reducir la huella de carbono y ecológica de las mismas introduciendo preferentemente energía solar fotovoltaica, energía eólica e incluso sistemas basados en hidrógeno.
- Se sugiere, antes de hacer una inversión considerable en membranas, la realización de un estudio de pilotajes a pequeña escala de una membrana o un tubo de membranas, en las condiciones de trabajo de cada planta, para asegurarnos el buen funcionamiento de las mismas y el éxito cuando se vaya a llevar a cabo a nivel industrial la instalación evaluando energéticamente y económicamente previamente el sistema.
- Se puede implementar también dentro de la metodología establecida el estudio de la producción de agua distribuida en plantas pequeñas y localizadas en el lugar de la demanda, ya que puede ser más eficiente en algunos escenarios de trabajo que una producción concentrada en una planta pública. En este sentido, con una producción de agua distribuida la introducción de energías renovables insitu, tanto eólica como solar, es más flexible y evitamos el problema del transporte de energía eléctrica e

incluso el transporte de agua. De esta forma se reducen los costes, las emisiones de CO₂ y la huella ecológica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Instituto Nacional de Estadística (INE). “Estadísticas e Indicadores del Agua” (2008).
- [2] OMS. Informe de la Organización Mundial de la Salud, Agua potable y Saneamiento (2012).
- [3] AS Richey, BF Thomas, MH Lo, JS Famiglietti, S Swenson, M Rodell, “Uncertainty in global groundwater storage estimates in a Total Groundwater Stress framework”. *Water Resources Research* Vol 51-7 (2015) 5198-5216
- [4] AS Richey, BF Thomas, MH Lo, JT Reager, JS Famiglietti, K Voss, S Swenson, M Rodell, “Quantifying renewable groundwater stress with GRACE”. *Water Resources Research* Vol 51-7 (2015) 5217-5328
- [5] VG Gude, “Desalination and Sustainability – An Appraisal and Current Perspective”. *Water Research* (2105), doi: 10.1016/j.watres.2015.11.012
- [6] M Amado, J Sanchis, JG Castillo, M Bartolome, J Cabero, A Castillo, “Censo de ETAPs Españolas: análisis de problemáticas, líneas de tratamiento y costes de explotación” XXXIII Jornadas Técnicas Asociación Española de Abastecimiento de agua y Saneamiento (2014) Burgos. <http://www.aeas.es/servlet/mgc>
- [7] MK Wittholz, BK O’Neill, CB Colby, D Lewis, “estimating the cost of Desalination plants using a cost database”. *Desalination* 229 (2008) 10-20
- [8] JJ Sadhwani, JM Veza, “Desalination and energy consumption in Canary Islands”. *Desalination* 221 (2008) 143-150
- [9] F Martín, JM Sánchez, “Mejora de la eficiencia energética de las plantas desaladoras: nuevos sistemas de recuperación de energía”. *Ingeniería y territorio* 72(2005) 74-79
- [10] E Lapuente, “Full cost in desalination. A case study of Segura River Basin”. *Desalination* 300 (2012) 40-45
- [11] A Al-Karaghoul, “Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24 (2013)343-356
- [12] N Ghaffour, TM Missimer, GL Amy, “Technical review and evaluation of the economics of water desalination: current and future challenges for better water supply sustainability”. *Desalination* 309 (2013) 197-207
- [13] WaterReuse Association. “Seawater desalination power consumption” (2011).
- [14] Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. “Estudio prospectiva: Consumo energético en el Sector Agua” (2010).
- [15] Borja Montañó Sanz. “Análisis económico de la desalinización” (2011).
- [16] F. A. León, A. Ramos. “Analysis of high efficiency membrane pilot testing for membrane design optimization”. *Desalination and Water Treatment* 73 (2017) 208–214 April**

- [17] **A. Ruiz-García, F.A. León, A. Ramos-Martín, “Different boron rejection behavior in two RO membranes installed in the same full-scale SWRO desalination plant”. *Desalination* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.012>**
- [18] James D Birkett. “A brief illustrated history of desalination. From bible to 1.940”. *Desalination* 50 (1984) 17-52
- [19] E. Delyannis , “Historic background of desalination and renewable energy”. *Solar Energy* 75 (2003) 357-366
- [20] E Delyannis, V Belessiotis, “Desalination: the recent development path”. *Desalination* 264 (2010) 206-213
- [21] WT Andrews, DS Laker, “A twelve-year history of large scale application of workexchanger energy recovery technology” *Desalination* 138 (2001) 201-206
- [22] J Schallenberg-Rodriguez, JM Veza, A Blanco-Marigorta. “Energy efficiency and desalination in the Canary Islands”. *Renewable and sustainable Energy Reviews* 40 (2014) 741- 748
- [23] IDA. “IDA desalination yearbook 2014-2015”. Media Analytics Ltd – ISBN 9781907467301
- [24] IDA. “IDA desalination yearbook 2015-2016”. Media Analytics Ltd – ISBN 9781907467400
- [25] P Palomar, IJ Losada, “Desalination in Spain: Recent developments and recommendations”. *Desalination* 255 (2010) 97-106
- [26] M Schiffler, “Perspectives and challenges for desalination in 21st century”. *Desalination* 165 (2004) 1-9
- [27] A Bennett, “Developments in desalination and water reuse”. *Filtration&Separation*, Vol 52 Issue 4 (2015) 28-33
- [28] JA Nollet. “Recherches sur les causes du bouillonnement des liquides Mémoires de Mathématique et de Physique“. Tirés des registres de l'Académie Royale des Sciences de l'année 1748, pp. 57–104;
- [29] M Mulder, “Basic principles of membrane technology”. Kluber Academic Publishers (1991) - ISBN 0792309782
- [30] J Glater, « The early history of reverse osmosis membrane development”. *Desalination* 117 (1998) 297-309
- [31] M Fujiwara, Y Aoshima, T Miki, “Development of the polyamide composite reverse osmosis membrane and reverse osmosis membrane system. A case study of Toray Industries Inc” (2010) Hitotsubashi University
- [32] M Fariñas, “Osmosis inversa, fundamentos, tecnología y aplicaciones”. Mc Graw Hill (1999) - ISBN 8440121260
- [33] S Shenvi, AM Isloor, AF Ismail, “A review on RO membrane technology: developments and challenges”. *Desalination* 368 (2015) 10-26
- [34] KP Lee, TC Arnot, D Mattia, “A review of reverse osmosis membrane materials for desalination – development to date and future potential”. *Journal of membrane science* 370 (2011) 1-22

- [35] AF Ismail, M Padaki, N Hilal, T Matsuura, WJ Lau, "Thin film composite membrane – Recent development and future potential". *Desalination* 356 (2015) 140-148
- [36] RA Bergman, JC Lozier, "Large-diameter membrane elements and their increasing global use" *IDA Journal - Desalination and Water Reuse* (2010) 16- 23
- [37] Nitto Denko. "Nitto Denko supplies 16-inch RO membranes elements for desalination plant in Israel" *Membrane technology*, Vol 2011, issue 2 (2011) 4-5
- [38] W Lee, C Kwon, G Jun, B Park, J Lee, Y Park, J Min, S Park, S You, S Woo, "Plant using 16-inch membranes in Korea" *The IDA World Congress on Desalination and Water Reuse* (2015) San Diego, USA.
- [39] M Busch, WE Mickols, Reducing energy consumption in seawater desalination. *Desalination* 165 (2004) 299-312
- [40] V García Molina, "Evolución tecnología de membranas". DOW water http://www.engineersbcn.cat/media/upload/pdf/evoluci_ntecnolog_ademembranas_INSCRIP_ACTIVITATS_332_1.pdf
- [41] Dow Filmtec. <http://www.dow.com/en-us/water-and-process-solutions/products/reverse-osmosis>
- [42] Hydranautics – Nittogroup. http://www.membranes.com/index.php?pagename=spec_sheet
- [43] Toray. http://www.toraywater.com/products/ro/ro_003_01.html
- [44] LG Water Solutions (LG NanoH2O). <http://www.lgwatersolutions.com/products/qfx-sw-440-es>
- [45] M Kurihara, H Yumamura, T Nakanishi, S Jinno, "Operation and reliability of very high-recovery seawater desalination technologies by brine conversion two-stage RO desalination system". *Desalination* 138 (2001) 191-199
- [46] T Loveday, "The real value of commercial-scale testing". *Desalination & Water Reuse Vol 24-3* (2014) 32-35
- [47] EG Bruch, S Coker, B Keinan, B Salgado, "Key aspects of the membrane technology implemented in the Carlsbad desalination project". *The IDA World Congress on Desalination and Water Reuse* (2015) San Diego, USA.
- [48] S Daer, J Kharraz, A Giwa, SW Hasan, "Recent Applications of nanomaterials in water desalination: a critical review and future opportunities". *Desalination* 367 (2015) 37-48
- [49] GR Xu, JN Wang, CJ Li, "Strategies for improving the performance of the polyamide thin film composite (PA-TFC) reverse osmosis (RO) membranes: surface modifications and nanoparticles incorporations". *Desalination* 328 (2013) 83-100
- [50] A Subramani, N Voutchkov, JG Jacangelo, "Desalination energy minimization using thin film nanocomposite membranes". *Desalination* 350 (2014) 35-43
- [51] B Hofs, R Schurer, DJH Harmsen, C Ceccarelli, EF Beerendonk, ER Cornelissen, "Characterization and performance of a commercial thin film nanocomposite seawater reverse osmosis membrane and comparison with a thin film composite". *Journal of membrane Science* 446 (2013) 68-78

- [52] CJ Kurth, RL Burk, J Green, "Improving seawater desalination with nanocomposite membranes". IDA Journal, third quarter (2010) 26-31
- [53] LG Water Solutions (LG Nano H2O). <http://www.lgwatersolutions.com/case-studies>
- [54] CR Bertels, R Franks, W Bates, "Design Advantages for SWRO using Advanced Membrane Technology" IDA Journal – Desalination and Water Reuse, Vol2-4 (2010) 21-25
- [55] J Cabero, "Ampliación de la planta desaladora de agua de mar con membranas NanoH2O Thin Film Nanocomposite (TFN) SWRO. Santa Barbara" Cod.28 X Congreso Internacional AEDyR, Sevilla (2014)
- [56] InfoEnviro "Desaladora de Sagunto (Valencia)". InfoEnviro Ene/feb (2011) 1-15
- [57] T Hamano, H Tsuge, T Goto, "Innovations perform well in first year of operation". Desalination & Water Reuse, Vol 16-1 (2006) 31-37
- [58] Fedco – Comparison of different turbocharger manufacturers. <https://www.fedco-usa.com/sites/default/files/HPB-ERI%20Turbo.pdf>
- [59] D J Woodcock, I Morgan White, "The application of pelton type impulse turbines for energy recovery on sea water reverse osmosis systems". Desalination 39 (1981) 447-458
- [60] Flowserve energy recovery devices – Calder ERT (Energy Recovery Turbine). http://www.flowserve.com/es_ES/Products/Energy-Recovery-Devices
- [61] Dweer – Flowserve Calder energy recovery devices para SWRO. Bulletin FPD-18i (2015) <http://www.flowserve.com/files/Files/Literature/ProductLiterature/Pumps/fpd-18-ea4.pdf>
- [62] RL Stover, "Seawater reverse osmosis with isobaric energy recovery devices". Desalination 203 (2007) 168-175
- [63] Nikolay Voutchkov, "Osmorec Energy Recovery System Review". Water Globe Consulting, LLC (2012)
- [64] B Peñate, JA de la Fuente, M Barreto, "Operation of RO kinetic energy recovery system: description and real experiences". Desalination 252 (2010) 179-185
- [65] RL Stover, "Development of a fourth generation energy recovery device. A "CTO's notebook", Desalination 165 (2004) 313-321
- [66] Ministerio de la Presidencia. "Real Decreto 140/2003 de 7 de febrero" B.O.E. Núm. 45(2003) 7.228-7.245
- [67] The Council of the European Union. "Council Directive 98/83/ec of November 3 (1998)" Official journal 330, (05/12/1998) 32-54
- [68] OMS. "Guidelines for drinking water quality 4th edition" WHO -World Health Organization (2011) – ISBN 9789241548151
- [69] AD Khawaji, IK Kutubkhanah, JM Wie, "Advances in seawater desalination technologies". Desalination 221 (2008) 47-69
- [70] M Taniguchi, Y Fusaoka, T Nishikawa, M Kurihara , "Boron removal in RO seawater desalination". Desalination 167 (2004) 419-426

- [71] Klaus Wagnick. "The historical development of the desalination market" (1995).
- [72] V. Agrait. "Nuevas membranas de alta resistencia para ósmosis inversa" (1984). Primeras jornadas sobre tratamiento de aguas. Expoquímica-84.
- [73] Antonio Valero, Javier Uche, Luis Serra. "La desalación como alternativa al PHN" (2001). (Gobierno de Aragón).
- [74] Alejandro Bello Puerta, Rosa Gemma Raluy Rivera, Baltasar Peñate Suárez, Ignacio onseca Barrio. "Destilación por membranas: situación actual y potencialidades futuras" (2011).
- [75] Akili D. Khawaji, Ibrahim K. Kutubhana, Jong-Mihn Wie. "Advances in seawater desalination technologies" (2008). Akili D. Khawaji, Ibrahim K. Kutubhana, Jong-Mihn Wie
- [76] Williams P.M., Ahmad M., Connolly B.S. "Technology for freeze concentration in the desalination industry" (2015).
- [77] German Eduardo Dévora Isiordia, Rodrigo Gonzales Enríquez, Saúl Ruiz Cruz. "Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México" (2013). Instituto Tecnológico de Sonora, México.
- [78] Ecoagua Ingenieros. Servi-qualita. "Desalinización del agua" (2015). www.serviqualita.es
- [79] Ecoagua Ingenieros. "Desalación mediante compresión de vapor" (2009).
- [80] Román Monasterio Larrinaga, Pedro Hernández Martín, Javier Saiz Fernández. "Compresión mecánica de vapor" (2013).
- [81] Jaime Sadhwani, Jose Miguel Veza. "Desalination and energy consumption in the Canary Islands" (2008).
- [82] Víctor Manuel Pérez Lozano. "Desalinización de aguas salobres mediante sistemas de electrodiálisis alimentados con energía solar fotovoltaica" (2015).
- [83] De Armas, J.C., Pérez, J.L., Von Gottberg,A.J.M. "Desalination of municipal sewage effluent with electrodialysis reversal in Tenerife" (1999).
- [84] Antonio Ros Moreno. "Procesos de desalación. Intercambio Iónico" (2011).
- [85] Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria (CIAGC). "Plan hidrológico de Canarias", (2015).
- [86] Acciona Agua. "IDAM Arucas-Moya", 2006. www.accion-aqua.com
- [87] Red Eléctrica de España (REE). "Servicio de interrumpibilidad" (2014). www.ree.es
- [88] Adolfo Carballo Penela, Utilidad de la huella ecológica y del carbono en el ámbito de la responsabilidad social corporativa (RSC) y el ecoetiquetado de bienes y servicios, (2009), <http://www.eumed.net/rev/delos/08>
- [89] Alessandro Galli, Justin Kitzes, Valentina Niccolucci, Mathis Wackernagel, Yoshihiko Wada, Nadia Marchettini, Assessing the global environmental consequences of economic growth through the Ecological Footprint: A focus on China and India, Ecological Indicators, Volume 17, June 2012, Pages 99-107, ISSN 1470-160X

- [90] Turkish G20 presidency priorities for 201 (2015) <https://g20.org/wp-content/uploads/2014/12/2015-TURKEY-G-20-PRESIDENCY-FINAL.pdf>
- [91] Antonio Caro Orellana, Territorio y sostenibilidad. Aproximación a la huella ecológica de Andalucía, (2007)
- [92] Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, La huella ecológica de Andalucía, una herramienta para medir la sostenibilidad, (2006)
- [93] Ministerio de medio ambiente medio rural y marino, Análisis de la huella ecológica de España, (2008)
- [94] Antonio Cano-Orellana, Manuel Delgado-Cabeza, Local ecological footprint using Principal Component Analysis: A case study of localities in Andalusia (Spain), Ecological Indicators, Volume 57, October 2015, Pages 573-579, ISSN 1470-160X
- [95] Sharqawy, M. H., Lienhard V, J. H. y Zubair, S. M. (2011) On exergy calculations of seawater with applications in desalination systems, International Journal of Thermal Sciences. Elsevier Masson SAS, 50(2), pp. 187-196. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2010.09.013.
- [96] Sharqawy, M. H., Zubair, S. M. y Lienhard, J. H. (2011) Second law analysis of reverse osmosis desalination plants: An alternative design using pressure retarded osmosis, Energy. Elsevier Ltd, 36(11), pp. 6617-6626. doi: 10.1016/j.energy.2011.08.056.
- [97] Justin Kitzes, Alessandro Galli, Marco Bagliani, John Barrett, Gorm Dige, Sharon Ede, Karlheinz Erb, Stefan Giljum, Helmut Haberl, Chris Hails, Laurent Jolia-Ferrier, Sally Jungwirth, Manfred Lenzen, Kevin Lewis, Jonathan Loh, Nadia Marchettini, Hans Messinger, Krista Milne, Richard Moles, Chad Monfreda, Dan Moran, Katsura Nakano, Aili Pyhälä, William Rees, Craig Simmons, Mathis Wackernagel, Yoshihiko Wada, Connor Walsh, Thomas Wiedmann, A research agenda for improving national Ecological Footprint accounts, Ecological Economics, Volume 68, Issue 7, 15 May 2009, Pages 1991-2007, ISSN 0921-8009
- [98] Manfred Lenzen, Shauna A. Murray, Britta Korte, Christopher J. Dey, Environmental impact assessment including indirect effects—a case study using input–output analysis, Environmental Impact Assessment Review, Volume 23, Issue 3, (May 2003), Pages 263-282, ISSN 0195-9255
- [99] Mathis Wackernagel and Chad Monfreda, Ecological Footprints and Energy, In Encyclopedia of Energy, edited by Cutler J. Cleveland, Elsevier, New York, (2004), Pages 1-11, ISBN 9780121764807
- [100] Global footprint network standards committee, Ecological Footprint standarts 2009, (2009)
- [101] J.L. Doménech, Methodology guide for calculating the enterprise ecological footprint, Third International Meeting over Sustainable Development and Villages., Málaga University, Spain, (2006)
- [102] Daiwang Song, Yue Wang, et al. Analysis, experiment and application of a power-saving actuator applied in the piston type energy recovery device. Desalination 361 (2015) 65-71.
- [103] Evangelos Dimitriou, Essam Mohamed, et al. Experimental comparison of the performance of two reverse osmosis desalination units equipped with different energy recovery devices. Desalination and Water Treatment. Vol. 55 N° 11 (2015) 3019-3026.

- [104] Evangelos Dimitriou, Essam Mohamed, et al. Experimental investigation of the 22 performance of a reverse osmosis desalination unit under full-and part-load operation. *Desalination and Water Treatment*. Vol. 53 N° 12 (2015) 3170-3178.
- [105] Francisco J. García Latorre, Sebastián O. Pérez Báez and Antonio Gómez Gotor. Energy performance of a reverse osmosis desalination plant operating with variable pressure and flow. *Desalination* 366 (2015) 146-153.
- [106] Jamel Kherjl, Armine Mnif, et al. Study of the influence of operating parameters on boron removal by a reverse osmosis membrane. *Desalination and Water Treatment*. Vol. 56 N° 10 (2015) 2653-2662.
- [107] Julieta Schallenberg-Rodriguez, José Miguel Veza and Ana Blanco-Marigorta. Energy efficiency and desalination in the Canary Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40 (2014) 741-748.
- [108] Cohen, Y., et al. A perspective on reverse osmosis water desalination: Quest for sustainability, 2017.
- [109] White, Frank and Xue, Henry. 2021. *Fluids Mechanic*. 9th edition. McGraw-Hill. ISBN 978-84-481-6603-8.
- [110] Noel Dow, Stephen Gray, et al. Pilot trial of membrane distillation driven by low grade waste heat: Membrane fouling and energy assessment. *Desalination* (2016).
- [111] Nur Muna Mazlan, Dimitar Peshev, Adrew G. Livingston. Energy consumption for desalination – A comparison of forward osmosis with reverse osmosis, and the potential for perfect membranes. *Desalination* 377 (2016) 138-151.
- [112] S. Boerlage, N. Nada. Algal toxin removal in seawater desalination processes. *Desalination and Water Treatment*. Vol. 55 N° 10 (2015) 2575-2593.
- [113] T. Bilstand, E. Protasova, et al. Wind-powered RO desalination. *Desalination and Water Treatment*. Vol. 55 N° 11 (2015) 3106-3110.
- [114] Veera Gnaneswar Gude. Desalination and sustainability – An appraisal and current perspective. *Water Research* 89 (2016) 87-106.
- [115] Jiménez, Carlos. Seawater temperature measured at the surface and at two depths (7 and 12 m) in one coral reef at Culebra Bay, Gulf of Papagayo, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 49. Supl. 2 (2001) 153-161.
- [116] Odum, H. T. *Environment, power, and society*; WileyInterscience: New York; 1971.
- [117] Bastianoni S. et al. The solar transformity of petroleum fuels. *Ecological Modeling* 220 (2009) 40-50.
- [118] Yawei Du et al. Economic, Energy, Exergo-Economic, and Environmental Analyses and Multiobjective Optimization of Seawater Reverse Osmosis Desalination Systems with Boron Removal. *Industrial and Engineering Chemical Research*. <http://pubs.acs.org/action/showCitFormats?doi=10.1021/acs.iecr.9b01933>
- [119] Burn, Stewart et al. Desalination techniques — A review of the opportunities for desalination in agriculture. *Desalination* 364 (2015) 2–16.

- [120] Llinares Pascual, Javier. Propuesta metodológica para la determinación de la huella ecológica en el sector hotelero. Aplicación para las islas Canarias. Tesis. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (2015).
- [121] Anuario Energético de Canarias 2017. Dirección General de Industria y Energía. Gobierno de Canarias.
- [122] Red Eléctrica Española. <https://demanda.ree.es/visiona/canarias/gcanaria/tablas/2017-05-11/3>
- [123] Plan de Ecogestión en la Producción y Distribución de aguas de Canarias. 2014-2020. Gobierno de Canarias y Turismo Canarias. Dirección General de Aguas. Instituto Tecnológico de Canarias.
- [124] Remineralización de aguas desaladas. Manual para el diseño de lechos de calcita de flujo ascendente y altura constante. Manuel Hernández Suárez. 2017. FCCA. DRINTEC.
- [125] Guía para la remineralización de aguas desaladas. Manuel Hernández Suárez. 2010. Ministerio de Medio Ambiente, y medio rural y marino. ACUAMED. Centro Canario del Agua.
- [126] **F. A. León, A. Ramos-Martín., C. A. Mendieta-Pino. “Prueba piloto de membranas de alta eficiencia para la optimización del sistema de membranas en la planta de desalinización de Carboneras”. DYNA. 2020.**
- [127] **F. León Zerpa, A. Ramos Martín. “Sistema de medición en continuo de bajo coste para determinar la relación entre la conductividad eléctrica “EC” y la temperatura “T” en aguas salobres”. DYNA. DOI: <https://dx.doi.org/10.6037>**
- [128] **F. A. León, A. Ramos-Martín, C. A. Mendieta-Pino. “Low-cost continuous measurement system to learn the relationship between the electrical conductivity “EC” and the temperature “T” in brackish waters”. Desalination and Water Treatment. 2020.**
- [129] **F. A. León, A. Ramos-Martín, C. A. Mendieta-Pino. “Results of high efficiency membrane pilot testing for membrane design optimization”. Desalination and Water Treatment. 2020.**
- [130] **F. A. León, A. Ramos-Martín. “Water production by RO for the manufacture of paint in the automotive industry”. Desalination and Water Treatment. 2020.**
- [131] **F. A. León, A. Ramos. “Study of high efficiency membrane pilot test for membrane design optimization in order to reduce the electrical consumption”. Journal of energy and power engineering. July 2016. Vol 10.**
- [132] **F. A. León, A. Ramos. “Analysis of high efficiency membrane pilot testing for membrane design optimization”. Electrical Engineering Electronic Journal. Art. 14216. July 2016. Vol. 1. Number 3.**

ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES

A1.1. INTRODUCCIÓN

A través de este capítulo se describen las instalaciones donde se llevan a cabo los estudios y pilotajes de membranas de ósmosis inversa en plantas desalinizadoras de agua de mar situadas en el Mediterraneo sur occidental.

A continuación, se indican los detalles de cada una de estas instalaciones que abastecen de agua potable a dos ciudades españolas. Seguidamente por tanto se explican en detalle los procesos de las mismas, incluyendo toma de agua de mar, pretratamiento físico químico y ósmosis inversa.

A1.2. DATOS DE PARTIDA

- **Planta Desalinizadora del Canal de Alicante 1**

La desaladora del Canal de Alicante I fue arrancada en septiembre de 2003, con una producción anual de agua potable de unos 18 hectómetros cúbicos. Las obras de ampliación ya inauguradas elevan la producción anual de la planta hasta los 24 hectómetros cúbicos, lo que representa un incremento anual de 6 hectómetros cúbicos. La ampliación de la planta ha sido llevada a cabo por una UTE formada por las empresas Ferrovial, Cadagua, Acciona Agua y Acciona Infraestructuras.

Los caudales aportados por la desaladora ampliada se consumen directamente en los municipios alicantinos de Alicante, Elche, Santa Pola y San Vicente del Raspeig, con una población superior a los 600000 habitantes, que llega hasta el millón en agosto.

Las obras han consistido, esencialmente, en la ejecución de nuevos pozos costeros de captación de agua de mar, en la ampliación de la filtración previa, en la instalación de dos nuevas líneas de producción, adicionales a las siete anteriores, y en la mejora medioambiental del vertido del agua de rechazo (salmuera), sustituyendo su vertido directo inicial por un vertido diluido en proporción no inferior a dos partes de agua de mar por una parte de salmuera, tanto de la generada por la desalinizadora ampliada como de la correspondiente a la nueva desalinizadora, recientemente adjudicada y cuyas obras de movimiento de tierras ya han sido iniciadas. Está previsto que esta nueva planta proporcione unos 24 hectómetros cúbicos adicionales desde el primer trimestre de 2008.

La planta desaladora existente tenía una capacidad de producción neta de 50000 m³/día de agua producida, operando de forma continua (24 horas/día) y, por tanto, equivalente a un caudal horario de 2083,4 m³, mediante 7 líneas de producción. La ampliación se ha realizado mediante la inclusión de 2 líneas nuevas, idénticas a las 7 líneas existentes, en la superficie que se dejó preparada para tal efecto en el interior de la nave de producción. De esta forma la capacidad de la planta se amplía a 64300 m³/día de agua producida, operando de forma continua (24 horas/día) y, por tanto, equivalente a un caudal horario de 2680 m³/h.

Toma de agua de mar

Para la producción anterior de 50000 m³/día se habían construido 22 pozos (encamisados con tubería de material plástico) de los cuales 18 tienen una profundidad de 50 m y 4 de 100 m. Para la nueva toma de agua de mar, se han construido de 11 nuevas perforaciones, idénticas a las anteriores, pero con una profundidad de 150 m.

Bombeo de agua de mar

Por cada pozo se ha instalado una bomba sumergible de 75 kW de potencia, 11 unidades, idénticas a las existentes, con variador de frecuencia, capaces cada una de ellas de impulsar 90 l/s, dependiendo del nivel existente en cada pozo de bombeo. En cada pozo se ha construido en su parte superior una arqueta de hormigón donde se ha instalado la correspondiente válvula de retención, válvula de aislamiento motorizada y medidor de caudal.

Se ha instalado asimismo un colector de impulsión de agua de mar, de diámetro DN 1000, hasta el colector de impulsión existente de diámetro DN 1100. El colector se ha fabricado en PRFV. Para la eliminación del golpe de ariete se instalaron dos válvulas de venteo de 1" y 2" por cada bombeo. Paralelo al colector de impulsión se ha instalado una tubería de PRFV DN 250 y se le ha dotado a cada bombeo de una válvula de mariposa motorizada, también de ese mismo tamaño, para conectarla con la tubería de impulsión; de esta forma se podrán enviar los primeros bombeos de cada pozo al colector de salmuera y evitar que envíen los detritus de los pozos y demás suciedades a los filtros de arena.

Pretratamiento

Se describen a continuación los equipos de pretratamiento existentes en la planta y que se utilizan también en la ampliación. Tan sólo se ha instalado un nuevo filtro de cartuchos. El pretratamiento del agua de mar sirve para garantizar las condiciones óptimas del agua de

alimentación a los bastidores de osmosis inversa, desde el punto de vista de las propiedades físicas y químicas. Consta de las ocho etapas siguientes:

- Dosificación de hipoclorito sódico
- Dosificación de coagulante
- Filtración sobre arena
- Bombeo del agua de mar filtrada
- Dosificación de ácido sulfúrico
- Adición de dispersante
- Filtros de cartuchos
- Dosificación de bisulfito sódico

Se consideró un pretratamiento completo para asegurar un adecuado equipamiento de la instalación ante cualquier eventualidad que pudiera surgir con el agua bruta a tratar. Las etapas del pretratamiento que se precisan para la operación de la planta (desde el punto de vista del proceso) son las siguientes:

- Filtración sobre arena
- Control del pH (dosificación de ácido)
- Filtros de cartuchos

En cualquier caso, la inclusión de los equipos dosificadores de hipoclorito sódico, coagulante, dispersante y bisulfito sódico fue obligada para una planta de la capacidad que se construyó.

Dosificación de hipoclorito sódico

En el caso de que se detecte una importante actividad biológica en el agua bruta de mar, se procede a una desinfección mediante cloración en cabecera. Como oxidante se emplea hipoclorito sódico a una dosis máxima de diseño de 2 mg/l como cloro activo. El equipo de dosificación consta de un depósito de 30000 litros, dos bombas dosificadoras (una de reserva) y una bomba de carga desde el camión. La instalación existente era suficiente para cubrir las necesidades de las dos nuevas líneas de funcionamiento de que consta la ampliación.

Dosificación de coagulante

Gracias a la toma de pozo, el agua bruta tiene un bajo índice de colmatación (SDI) y no se precisa la coagulación. El equipo de dosificación consta de un depósito de 30000 litros, dos bombas dosificadoras (una de reserva) y una bomba de carga desde el camión. La instalación existente también era suficiente para cubrir las necesidades de las dos nuevas líneas de funcionamiento de la ampliación.

Filtración sobre arena

El agua de mar se filtra a través de 10 filtros de gravedad, construidos en hormigón, utilizándose los existentes para la ampliación de las nuevas líneas. El lecho de los filtros es de arena, con una altura de la capa filtrante de 1000 mm. La velocidad de filtración, con la ampliación pasa de 8,36 m/h en condiciones normales ó 9,29 m/h cuando un filtro se esté lavando a 10,83 m/h ó 12,04 m/h.

Para el lavado del lecho filtrante se emplea la técnica combinada de aireagua, utilizando agua de mar filtrada. El ciclo de servicio de los filtros (horas de operación entre lavados) depende de la calidad del agua bruta. La secuencia de lavado se efectúa de forma automática, y para ello se instalaron válvulas con accionamiento neumático.

Los diez filtros disponen de un sistema de pérdida de carga que origina la alarma por ensuciamiento del lecho de arena.

Los filtros se cubrieron adecuadamente, para evitar el crecimiento biológico por la luz solar.

Bombeo de agua filtrada

El agua filtrada pasa a un depósito construido en hormigón con impermeabilización interior. Para el lavado de los filtros de arena se instalaron 3 grupos motobombas (uno de reserva) de 900 m³/h a 9 m.c.a., no necesitándose incrementar el lavado para esta ampliación. Desde este mismo depósito se bombea el agua filtrada a los filtros de cartuchos, mediante 6 grupos (uno de reserva, para la fase de siete bastidores), de 1050 m³/h a 59 m. Por tanto, en la fase actual (nueve bastidores) se utilizan los seis grupos de bombeo instalados.

Las seis bombas de agua filtrada en servicio se dotaron de variadores de velocidad con el fin de optimizar el consumo energético de la planta, reduciendo la energía disipada en la válvula de

control aguas arriba de los bastidores de membranas, así como de adaptarse al caudal demandado por los bastidores en operación.

Dosificación de ácido sulfúrico

La acidificación del agua de mar se precisa para evitar la precipitación de carbonato cálcico sobre las membranas y las características del agua de mar obligan a dicha acidificación para conseguir un índice Stiff and Davis (S&D) negativo en el concentrado o salmuera.

Para el estudio de la dosis adecuada de ácido sulfúrico se consideraron los siguientes criterios:

- Un valor del índice Stiff and Davis ligeramente negativo es aceptable desde un punto de vista de la precipitación, del CaCO_3
- No existe para este índice diferencia apreciable entre las temperaturas mínima (18°C) y máxima (22°C) consideradas en el proyecto
- Por las consideraciones anteriores, hemos efectuado el diseño de los equipos de dosificación de ácido para ajustar un pH final de alimentación a bastidores de 7,0 independientemente de que posteriormente se decidiese trabajar a pH más altos. La dosis resultante para una acidificación a $\text{pH} = 7,0$ fue de 19 ppm de H_2SO_4 al 100%, y se tomó una dosis de diseño de 30 ppm para el dimensionado del equipo de dosificación. El equipo dosificador consta de:
 - Un depósito de almacenamiento de H_2SO_4 al 98%, de 30000 litros.
 - Una bomba centrífuga para trasiego del ácido desde el camión cisterna a dicho depósito.
 - Dos bombas dosificadoras (una de reserva).

El control de la dosificación de ácido sulfúrico se efectúa mediante un controlador de pH que gobierna los variadores de velocidad de las bombas dosificadoras. La instalación existente era suficiente para cubrir las necesidades de las dos nuevas líneas de funcionamiento.

Adición de dispersante

Para las nuevas condiciones de operación de la planta era recomendable la adición de un dispersante o antiincrustante dado el elevado valor de la salinidad en el rechazo. Las proyecciones o cálculos realizados con el programa del fabricante de las membranas recomendaban una dosis de dispersante de 2,0 mg/l. No obstante, y para garantizar la seguridad

de las membranas frente a posibles precipitaciones de CaSO_4 , BaSO_4 , SrSO_4 y CaF_2 , (sales poco solubles que podrían colmatarlas), se adoptó una dosis de 3,0 mg/l.

Se adoptó un polímero orgánico como dispersante y la dosis de diseño considerada fue de 3,0 mg/l. El equipo de dosificación consta de 2 cubas, una en dosificación y otra en preparación de la solución al 10% y dos bombas dosificadoras (una de reserva). La instalación existente era suficiente para cubrir las necesidades de las dos nuevas líneas de funcionamiento.

El agua de mar pretratada y debidamente acondicionada, pasaba a través de 6 filtros de cartuchos trabajando en paralelo, de modo que la reposición de cartuchos de uno de ellos no obligue a la parada de una línea de producción.

Para la nueva ampliación de dos bastidores más de membranas se ha instalado un nuevo filtro de cartuchos, con lo que la instalación pasa de tener 6 unidades a tener 7. Los elementos filtrantes son de polipropileno, con un grado de filtración de 5 micras nominales.

El ensuciamiento de los cartuchos se controla mediante un manómetro de presión diferencial que originará la alarma correspondiente y de la medida de caudal independiente de cada filtro de cartuchos.

Dosificación de bisulfito sódico

Debido a la posible cloración del agua de mar, el agua filtrada puede contener cloro libre residual a unos niveles de aproximadamente 0,5 mg/l, siendo precisa su reducción total, ya que dicho oxidante degradaría irreversiblemente las membranas de poliamida. Para conseguir dicha reducción se dosifica bisulfito sódico, siendo la dosis considerada de 5 mg/l.

El equipo de dosificación consta de una cuba de 2000 litros provista de agitador, que se instaló en una sala aislada para la preparación de la dilución, una bomba de trasiego para enviar el producto preparado a las cubas de almacenamiento, dos cubas para almacenar cada una de ellas 2000 litros provistas de sus correspondientes agitadores y tres bombas dosificadoras (una de reserva), con variadores de velocidad, para dosificar el producto antes y después de los filtros de cartucho. La instalación existente era suficiente para cubrir las necesidades de la ampliación.

El control de la dosificación de bisulfito sódico se efectúa mediante un sistema de regulación automática que, teniendo en cuenta el potencial Red-Ox en el agua de alimentación, gobierna el caudal de las bombas dosificadoras actuando sobre los variadores de velocidad de los motores correspondientes.

La medición general de los parámetros principales del agua de alimentación (pH, potencial redox, conductividad) se realiza en cada una de las dos mitades del colector común de alimentación, antes de la bifurcación hacia el primer tren de O.I. Como medida de seguridad, se instalaron medidores de potencial Red-Ox en la aspiración de cada una de las bombas de alta presión.

Ósmosis Inversa

Según lo explicado en puntos anteriores, debido a la composición química del agua de mar que se envía a la Planta, la conversión necesaria es del 40%.

Número de líneas

La capacidad de la planta se obtuvo con 7 líneas de producción, cada una de ellas proyectada para 7200 m³ brutos/día de agua desalada. Para la nueva ampliación se han instalado dos líneas más, idénticas a las existentes, en las bancadas, canales, etc, que se dejaron preparadas cuando se instalaron las anteriores líneas.

Cada nueva línea es exacta a las anteriormente existentes formadas por dos sistemas dispuestos en serie: bombeo de alta presión y bastidor de ósmosis inversa.

A continuación, describiremos la osmosis inversa propiamente dicha, la cual consta de 3 partes esenciales:

- Bombeo de alta presión.
- Bastidores de ósmosis inversa.
- Sistema de desplazamiento y limpieza química.

Bombeo de alta presión y recuperación de energía

La instalación de ampliación se ha proyectado con 2 grupos de alta presión (un grupo por cada bastidor de módulos).

Cada grupo de alta presión consta de:

- Bomba de alta presión, centrífuga, horizontal y multietapa, doble voluta, partida horizontalmente, impulsores en oposición y simple aspiración
- Turbina Pelton de recuperación de energía, con servomotor lineal y ajuste de posición con inyector por control remoto

- Motor eléctrico de accionamiento, doble extensión de eje, tropicalizado, con resistencias de caldeo y RTD's en devanados
- Bancada común a bomba, motor y turbina. Cada bomba incluye:
- Acoplamiento flexible con espaciador entre motor y bomba
- Guarda-acoplamiento
- Sellado de los ejes mediante cierresmecánicos simples y equilibrados
- Tubería de inyección a los cierres de la primera etapa (API plan 11)
- Cojinetes radiales de camisa y de empuje de bolas
- Lubricación por anillo de aceite, con aceitador de nivel constante
- Termorresistencias en cajas de cojinetes
- Rotor equilibrado estática y dinámicamente

Cada turbina incluye:

- Dos toberas de accionamiento (una manual y otra motorizada)
- Rueda equilibrada dinámicamente

Bastidores de osmosis inversa

Las membranas consideradas por la UTE para la ampliación son de arrollamiento en espiral, fabricadas en poliamida, por Toray. Las características más significativas de las membranas reflejadas en esta ampliación son las siguientes:

- Fabricante: Toray
- Modelo: SU-820 FA
- Material: Poliamida (TFC)
- Presión máxima de operación: 70 bar Las características principales de cada bastidor de la ampliación son las siguientes:
- Conversión: 40%

- Disposición: Un paso y una etapa
- Nº de bastidores: 2
- Nº de tubos por bastidor: 104
- Nº de membranas: 7 por tubo
- Nº de tubos en total: 208
- Nº de membranas en total: 1456
- Producción por cada bastidor: 7200 m³/día
- Salinidad del permeado: < 400 mg/l

Sistema de desplazamiento y limpieza química

Se consideró un sistema para el desplazamiento del agua de mar y para limpieza química de las membranas. Los componentes principales de dicho sistema son los siguientes:

- Un depósito construido en PRFV de 25000 litros para desplazamiento
- Dos bombas centrífugas (1 + 1R) de 350 m³/h
- Un depósito de productos químicos de 25000 litros para la limpieza
- Un filtro de cartuchos

El sistema de limpieza química se emplaza en el edificio de bombeo de agua producto, y el depósito de desplazamiento se sitúa en la entrada de la tubería de agua permeada al depósito.

De esta manera, las bombas de limpieza química y desplazamiento pueden aspirar del depósito de limpieza química o del depósito de desplazamiento para realizar la introducción de productos de limpieza a las membranas o para desplazar el agua de mar/salmuera de su interior, respectivamente. La instalación existente era suficiente para cubrir las necesidades de la ampliación.

Sistema de desplazamiento

El desplazamiento es una función de rutina que se realiza cuando la planta se pone fuera de servicio por un tiempo apreciable. Su objeto es aclarar las altas concentraciones salinas

existentes en las membranas y bombas, previniendo las posibles precipitaciones que afectarían al rendimiento y vida de los equipos.

Asimismo, el desplazamiento se requiere antes, durante y después de la limpieza química de las membranas. El agua dulce requerida para el desplazamiento del agua de mar se toma de un depósito instalado a tal efecto en la entrada de agua permeada al depósito de almacenamiento.

Sistema de limpieza química

La limpieza química es una operación que se realiza para eliminar acumulaciones de suciedad en las membranas y que ocurren después de períodos relativamente largos de servicio.

La técnica consiste en recircular la solución limpiadora a alta velocidad a través de todas las membranas. La frecuencia de una limpieza química dependerá de la calidad del agua de alimentación a la ósmosis inversa, y de la operación general de la planta. La necesidad para una limpieza química puede estar determinada por cualquiera de estas circunstancias:

- Alta presión diferencial (alimentación / concentrado)
- Pérdida de productividad (bajo caudal de agua producida)
- Deterioro de la calidad del agua producida (alta conductividad)

El tipo de solución limpiadora requerida, depende de la causa del ensuciamiento, y los diferentes procedimientos de limpieza química se llevan a cabo conforme con las guías expresas del fabricante de las membranas.

Remineralización

Para la remineralización del agua de la ampliación se utilizan los equipos existentes aumentando la dosificación en función del nuevo caudal de agua producida. El permeado de la ósmosis inversa se somete a un proceso de remineralización al objeto de que el agua producida posea valores en el entorno de los 25 mg/l Ca. Se considera que este valor es suficiente ya que en el abastecimiento este agua se mezcla con otras aguas superficiales con lo cual se consiguen valores de dureza por encima de los 60 mg/l Ca indicados en la legislación.

Dosificación de hidróxido cálcico

El sistema de manejo, preparación y dosificación de cal existente, era suficiente para cubrir las necesidades de las dos nuevas líneas de funcionamiento y que consta de las siguientes partes:

- Un silo de 50 m³ equipado con sus correspondientes filtros de mangas, extractores vibrantes, etc.
- Dos transportadores de sin-fin
- Dos cubas para la preparación de la suspensión de cal de 3000 litros
- Dos grupos motobombas (una de reserva) para envío de la lechada de cal a la cámara de remineralización de 20 m³/h

Depósito de agua producida (permeado)

El agua producida por los diferentes bastidores de O.I. se recoge en un colector general, a partir del cual se conduce directamente al depósito de agua producida de 2000 m³ de capacidad construido en hormigón armado de sección rectangular e impermeabilizada interiormente. Además de servir como regulador del bombeo al exterior, este depósito tiene principalmente la labor de abastecer al consumo interior de la propia IDAM. El agua que debe usarse para la preparación de reactivos, limpiezas químicas, desplazamientos, en definitiva, que tomará contacto con las membranas debe de estar exenta de cloro y poseer un carácter ácido. Por tanto, se instaló un depósito de 25 m³ de capacidad construido en PRFV en la entrada del agua permeada al depósito, de tal forma que los reactivos que se dosifican en esta agua nunca puedan entrar en él, sirviendo éste como depósito de desplazamiento.

Bombeo de agua producida

Se consideró una estación de bombeo de agua producida por la IDAM hasta el depósito regulador, formado por cuatro grupos motobombas iguales (uno de reserva), con una capacidad total de bombeo de 50000 m³/día (695 m³/h por unidad). Sin embargo en la sala de bombas de agua producto se dejó ejecutada la obra civil necesaria para la instalación de dos bombas más, capaces de impulsar junto a las instaladas 81000 m³/día. Por tanto para esta ampliación se han instalado las dos bombas de impulsión de agua producto con sus correspondientes juegos de tuberías y válvulas tanto en aspiración como en impulsión.

Tubería de impulsión

La tubería de impulsión de la IDAM hasta el depósito regulador tiene la capacidad requerida para la producción de 81000 m³/día, por lo que no ha sido necesaria obra alguna para esta ampliación.

Se instaló una conducción de 21884 m de longitud de los que 8230 m son de tubería de acero helicosoldada de 1100 mm de diámetro nominal y 9,50 mm de espesor y el resto de DN 700, fabricada en fundición dúctil con recubrimiento interior de mortero de cemento.

En los terrenos de la desaladora se instaló el sistema antiarriete de dicha conducción consistente en dos depósitos de 50000 litros de capacidad y 20 kg/cm² de presión máxima de servicio y el P.K. 16,428 se construyó una chimenea de equilibrio de 3,5 m de diámetro.

Dosificación de hipoclorito sódico

El agua producida debe contener cloro libre residual y para ello se dosifica hipoclorito sódico a una dosis de diseño de 0,5 g Cl₂/m³ de agua. El equipo de dosificación consta de un depósito de 8000 litros y dos bombas dosificadoras (una de reserva). La instalación existente era suficiente para cubrir las necesidades de la ampliación.

Evacuación del vertido

Los vertidos generados por la IDAM son salmuera o rechazo de la O.I., agua de lavado de los filtros de arena, vertidos de limpieza de membranas y drenajes de suelos y otros vertidos de menor relevancia. Los vertidos correspondientes a la salmuera son continuos y los demás son intermitentes o esporádicos.

La instalación existente era suficiente para cubrir las necesidades de la ampliación.

Entre las recomendaciones del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Ampliación de la Desaladora del Canal de Alicante, figuraba la conveniencia de diluir el rechazo del agua de rechazo, antes del vertido, con agua de mar.

Teniendo en cuenta que la conducción y la obra de vertido del agua de rechazo existente se utiliza para verter los rechazos tanto de la actual desaladora, una vez ampliada, como de la futura desaladora (Alicante II), el caudal del agua de rechazo de ambas plantas será de 160000 m³/día. Los estudios de modelos de dilución realizados han puesto de manifiesto que la proporción aceptable es 1/1. No obstante se consideró aconsejable dimensionar la toma de

agua de mar para que pueda aportar, si resulta necesario, 320000 m³/día, con lo que la proporción de dilución, con las dos plantas a pleno rendimiento, es de 2/1.

Para la dilución del agua de rechazo se proyectaron las siguientes obras:

- Obra de toma en el mar
- Estación de bombeo
- Conducción hasta la obra de vertido
- Conexión con la obra de vertido
- Equipos eléctricos y de comunicación
- **Planta Desalinizadora de Carboneras**

La planta desalinización de Carboneras, propiedad de Acuamed, fue proyectada en 1999. Con una capacidad de producción de 42 hm³/año, aproximadamente 120000 m³/día, y una red de tuberías de distribución de 120 km. En ese momento fue la planta de desalinización más grande de Europa, y un modelo tecnológico ideal para grandes plantas desaladoras tal y como se muestra en la figura A1.1.

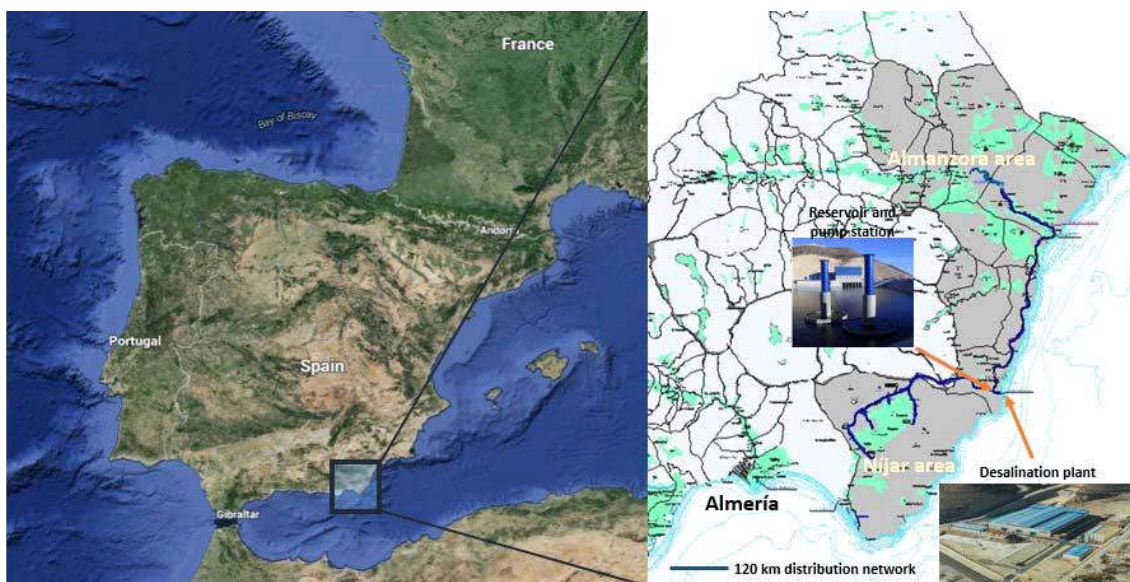


Figura A1.1. Planta de desalinización y ubicación de la red de distribución

La planta es capaz de proporcionar 24,5 hm³/año el agua para regar 7000 ha de invernaderos y cultivos intensivos en el área de Níjar y 17,5 hm³/año para el consumo humano al municipio de Níjar y otros 16 municipios adicionales localizados en el área de Almanzora baja. En mayo de 2011, se completó el trabajo de la construcción de sistema de captación de agua salada de la planta de desalación de Las Carboneras (Almería-España) como se indica en la figura A1.2.



Figura A1.2. Nuevo consumo de agua de mar (HDPE de 2000 mm, 1051 m de largo, -38 m de profundidad)

Desde entonces, la captación de agua fue localizada a 35 metros de profundidad en vez de los 14 m de profundidad de la captación anterior. El resultado más significativo fue un nuevo escenario térmico: más estable en el tiempo, y temperaturas máximas más bajas.

Temperaturas máximas más bajas favorecen requerimiento the calidad de agua, ya que el rendimiento de las membranas mejora a temperaturas más bajas. Por este motivo nuevos diseños y oportunidades de operación aparecieron para mejorar el rendimiento energético del proceso.

La eficiencia energética, es uno de los factores más importantes para Acuamed, dado que los precios de la energía han aumentado sobre el 60 % en los últimos 10 años en España para las empresas medianas, y representa un 50% de los costes de operación de planta desaladora de capacidad de producción media-alta. Además, mejores prácticas en el consumo energético y en la contratación del suministro de energía han sido aplicadas, con el objetivo de minimizar los costes de energía. Cualquier reducción del consumo específico o en coste de compra de energía,

llevara a importantes ahorros económicos. De esta forma, el diseño óptimo de la configuración de la membrana, es un factor clave para la eficiencia energética para la planta de desalinización.

Teniendo en cuenta el proceso de sustitución y proyectos de modernización se iban a cometer en la planta de Las Carboneras, una prueba piloto fue ejecutada, bajo este nuevo escenario térmico.

El propósito de este estudio fue, por una parte, comparar el rendimiento de las membranas de los diferentes fabricantes, y por el otro lado, determinar la configuración óptima de la membrana, requerida para conseguir la calidad y cantidad de agua necesarias bajo las nuevas.

Aspectos destacados

La captación del agua de mar (en toma de mar) se lleva a cabo mediante 2 colectores de 2 metros de diámetro y 300 de longitud colocados en el fondo marino.

Dosificación de hipoclorito sódico para al agua bruta.

Bombeo de agua bruta mediante 14 bombas que proporcionan un caudal de 965 m³/h cada una.

Filtración sobre arena mediante 14 filtros metálicos horizontales ebonitados de 3200 mm de diámetro y 11000 mm de longitud.

Sistema de dosificación de dispersante/antiincrustante para evitar la posible precipitación de las sales en el sistema.

Sistemas de filtración de seguridad compuesta por 14 filtros de cartuchos horizontales. Cada uno de ellos contiene 12 cartuchos de 20 micras absolutas.

Dosificación de metabisulfito para neutralizar el agente oxidante inyectado en la fase anterior.

Bombeo de alta presión y recuperación de energía mediante 14 grupos turbobomba (12+2 reserva) compuestos por bomba, motor y turbina Pelton.

12 bastidores con una capacidad de producción de 10000 m³/día formado por 140 tubos de presión y dentro de cada tuno 7 membranas de poliamida aromática.

Conversión 45%.

Remineralización mediante Cal y CO₂.

Depósitos de agua tratada de 2500 m³ y 16500 m³.

Dilución de la salmuera de rechazo en dilución 4:1 con agua de mar para evitar cualquier impacto en la Posedonia Oceánica.

ANEXO 2. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS Y DIFUSIÓN DE RESULTADOS

TÍTULO:	Different boron rejection behavior in two RO membranes installed in the same full-scale SWRO desalination plant.
AUTORES:	Federico Antonio León Zerpa – Alejandro Ramos Martín – Alejandro Ruiz García
REVISTA:	Desalination
IMPACTO:	6,035 (JCR)
ISSN:	0011-9164
EDITORIAL:	Elsevier
MES Y AÑO:	Enero, 2019
VOLUMEN:	449
PÁGINAS:	131-138

TÍTULO:	Analysis of high efficiency membrane pilot testing for membrane design optimization
AUTORES:	Federico Antonio León Zerpa – Alejandro Ramos
REVISTA:	Desalination and Water Treatment
IMPACTO:	1,234 (JCR)
ISSN:	1944-3994
EDITORIAL:	Desalination Publications
MES Y AÑO:	Febrero, 2017
VOLUMEN:	73
PÁGINAS:	208-214

TÍTULO:	Sistemas de medición en continuo de bajo coste para determinar la relación entre la conductividad eléctrica "EC" y la temperatura "T" en aguas salobres
AUTORES:	Federico Antonio León Zerpa – Alejandro Ramos Martín
REVISTA:	DYNA. Ingeniería e industria.
IMPACTO:	0,781 (JCR)
ISSN:	0012-7361
EDITORIAL:	Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España
MES Y AÑO:	Septiembre, 2020
DOI:	http://dx.doi.org/10.6036/9812

TÍTULO:	Low-cost continuous measurement system to learn the relationship between the electrical conductivity "EC" and the temperature "T" in brackish waters
AUTORES:	Federico Antonio León Zerpa – Alejandro Ramos – Carlos Alberto Mendieta Pino
REVISTA:	Desalination and Water Treatment
IMPACTO:	1,320 (JCR)
ISSN:	1944-3994
EDITORIAL:	Desalination Publications
MES Y AÑO:	Septiembre, 2020
DOI:	Pendiente

TÍTULO :	Water production by RO for the manufacture of paint in the automotive industry
AUTORES:	Federico Antonio León Zerpa – Alejandro Ramos
REVISTA:	Desalination and Water Treatment
IMPACTO:	1,234 (JCR)
ISSN:	1944-3994
EDITORIAL:	Desalination Publications
MES Y AÑO:	Septiembre, 2020
DOI:	Pendiente

TÍTULO :	Prueba piloto de membranas de alta eficiencia para la optimización del sistema de membranas en la planta de desalinización de Carboneras
AUTORES:	Federico Antonio León Zerpa – Alejandro Ramos Martín
REVISTA:	DYNA. Ingeniería e industria.
IMPACTO:	0,781 (JCR)
ISSN:	0012-7361
EDITORIAL:	Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España
MES Y AÑO:	Septiembre, 2020
DOI:	Pendiente

TÍTULO :	Results of high efficiency membrane pilot testing for membrane design optimisation
AUTORES:	Federico Antonio León Zerpa – Alejandro Ramos
REVISTA:	Desalination and Water Treatment
IMPACTO:	1,234 (JCR)
ISSN:	1944-3994
EDITORIAL:	Desalination Publications
MES Y AÑO:	Septiembre, 2020
DOI:	Pendiente

TÍTULO :	Study of high efficiency membrane pilot test for membrane design optimization in order to reduce the electrical consumption
AUTORES:	Federico Antonio León Zerpa – Alejandro Ramos
REVISTA:	Journal of energy and power engineering
IMPACTO:	0,639 (Global Impact Factor)
ISSN:	1934-8975
EDITORIAL:	David Publishing Company
MES Y AÑO:	Julio, 2016
VOLUMEN:	10
PÁGINAS:	7

TÍTULO :	Study of high efficiency membrane pilot test for membrane design optimization in order to reduce the electrical consumption
AUTORES:	Federico Antonio León Zerpa – Alejandro Ramos
REVISTA:	Electrical Engineering Electronic Journal
ISSN:	2172-1446
EDITORIAL:	AEDIE
MES Y AÑO:	Julio, 2016
VOLUMEN:	Vol. 1, Nº 3
PÁGINAS:	Art. 14216

TÍTULO :	Long-term operating data of a full-scale SWRO desalination plant. Performance analysis
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	European Desalination Society
LUGAR:	Atenas
ENTIDAD ORGANIZADORA:	EDS
FECHA:	2018
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	Water production by RO for the manufacture of paint in the automotive industry
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	European Desalination Society
LUGAR:	Atenas
ENTIDAD ORGANIZADORA:	EDS
FECHA:	2018
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	A global analysis of five years management of slurry with natural treatment systems for wastewater (NTSW) in Gran Canaria using a pilot plant
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	European Desalination Society
LUGAR:	Atenas
ENTIDAD ORGANIZADORA:	EDS
FECHA:	2018
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	TORAY, EUROPE MEMBRANE, POLYMEM and FUJIFILM
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Euromembrane 2018
LUGAR:	Valencia
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Universidad Politécnica de Valencia
FECHA:	2018
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	Estudio del rendimiento de membranas de alta eficiencia para desalinización de agua de mar para reducir el consumo energético
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Canagua y Energía
LUGAR:	Recinto Ferial de Las Palmas de Gran Canaria
ENTIDAD ORGANIZADORA:	ULPGC - Canagua
FECHA:	2017
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	Analysis of high efficiency membrane pilot testing for membrane design optimization
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	European Desalination Society
LUGAR:	Roma
ENTIDAD ORGANIZADORA:	EDS
FECHA:	2016
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	Sistema de medición en continuo de bajo coste para aprender la relación entre la conductividad eléctrica "EC" y la temperatura "T" en aguas salobres
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	InnoeducaTIC
LUGAR:	Las Palmas de Gran Canaria
ENTIDAD ORGANIZADORA:	ULPGC
FECHA:	2016
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	La Enseñanza a distancia y el EEES. Metodología empleada en Expresión Gráfica
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	InnoeducaTIC
LUGAR:	Las Palmas de Gran Canaria
ENTIDAD ORGANIZADORA:	ULPGC
FECHA:	2016
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	Study of high efficiency membrane pilot test for membrane design optimization in order to reduce the electrical consumption
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	ICMEPE
LUGAR:	Las Palmas de Gran Canaria
ENTIDAD ORGANIZADORA:	ULPGC
FECHA:	2016
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	Performance analysis of a full-scale SWRO desalination plant. Five years of operation
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	3rd International Conference on Desalination using Membrane Technology (Las Palmas de Gran Canaria)
LUGAR:	Las Palmas de Gran Canaria
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Elsevier. Desalination Journal.
FECHA:	2016
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO:	Performance analysis of three different spiral wound membrane modules.
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	3rd International Conference on Desalination using Membrane Technology (Las Palmas de Gran Canaria)
LUGAR:	Las Palmas de Gran Canaria
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Elsevier. Desalination Journal.
FECHA:	2016
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO:	Ecological Footprint in Sea Water Reverse Osmosis Desalination Plants for a sustainable consume of drinking water around the world
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	7th International Congress Energy and Environment Engineering and Management (Las Palmas de Gran Canaria)
LUGAR:	Las Palmas de Gran Canaria
ENTIDAD ORGANIZADORA:	ULPGC
FECHA:	2017
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	Proposal for the determination of the mathematical model that relates the electrical conductivity and the total dissolved solids in brackish water
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	2 nd Applied Computing in Science & Engineering (Las Palmas de Gran Canaria)
LUGAR:	Las Palmas de Gran Canaria
ENTIDAD ORGANIZADORA:	ULPGC
FECHA:	2017
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	Mathematical model and control strategy for a Capacitive Deionization (CDI) System for water desalination, with a buck-boost bidirectional converter powered by photovoltaic solar cell, and a supercapacitor
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	2 nd Applied Computing in Science & Engineering (Las Palmas de Gran Canaria)
LUGAR:	Las Palmas de Gran Canaria
ENTIDAD ORGANIZADORA:	ULPGC
FECHA:	2017
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	Toray Membrane Spain
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	The International Water Association (IWA) Conference
LUGAR:	Jerez
ENTIDAD ORGANIZADORA:	IWA
FECHA:	2015
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	Toray Membrane Spain
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	II Workshop “Estudio, aprovechamiento y gestión del agua en terrenos e islas volcánicas”
LUGAR:	Las Palmas de Gran Canaria
ENTIDAD ORGANIZADORA:	ULPGC
FECHA:	2015
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	Ingeniería del mantenimiento
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	I Congreso Internacional de Ingeniería del Mantenimiento (TBN), Las Palmas de Gran Canaria
LUGAR:	Las Palmas de Gran Canaria
ENTIDAD ORGANIZADORA:	TBN
FECHA:	2016
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	Ingeniería del mantenimiento
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	II Congreso Internacional de Ingeniería del Mantenimiento (TBN), Las Palmas de Gran Canaria
LUGAR:	Las Palmas de Gran Canaria
ENTIDAD ORGANIZADORA:	TBN
FECHA:	2019
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	Desalination and the Enviroment
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	European Desalination Sociaty
LUGAR:	Santa Margherita Ligure, Italia
ENTIDAD ORGANIZADORA:	EDS
FECHA:	26/05/2005
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO :	Desalación, innovación y desarrollo sostenible
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	II Seminario Internacional de Desalación desarrollado en Antofagasta.
LUGAR:	Antofagasta, Chile.
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Universidad Católica del Norte, CEITSAZA y Aguas Antofagasta.
FECHA:	01/12/2010
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO:	Energías Renovables en Canarias
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Canagua 99. VII Salón Internacional del Agua, Energía y Medio Ambiente
LUGAR:	Gran Canaria
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Instituto Tecnológico de Canarias, CIEA y Gobierno de Canarias.
FECHA:	10/11/1999
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Desalación de Aguas. Toray Membrane Europe.
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Congreso de Desalación y Reutilización
LUGAR:	Toledo
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Aedyr
FECHA:	23-25 Octubre de 2018
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Desalación de Aguas. Toray Membrane Europe.
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Congreso de Desalación y Reutilización
LUGAR:	Valencia
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Aedyr
FECHA:	19-21 Octubre de 2016
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Desalación de Aguas. Toray Membrane Europe.
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Congreso de Desalación y Reutilización
LUGAR:	Sevilla
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Aedyr
FECHA:	26-28 Noviembre de 2014
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Desalación de Aguas. Toray Membrane Europe.
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Asociación Española de Desalación – Aedyr
LUGAR:	Madrid
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Aedyr - AquaEspaña
FECHA:	12-15 Noviembre de 2012
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Desalación de Aguas. Toray Membrane Europe.
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Congreso de Desalación y Reutilización
LUGAR:	Barcelona
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Aedyr
FECHA:	Septiembre de 2010
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Desalación de Aguas. Toray Membrane Europe.
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Congreso de Desalación y Reutilización
LUGAR:	Bilbao
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Aedyr
FECHA:	Diciembre de 2008
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Desalación de Aguas. Toray Membrane Europe.
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Congreso de Desalación y Reutilización
LUGAR:	Palma de Mallorca
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Aedyr
FECHA:	Noviembre de 2006
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Desalación de Aguas. Toray Membrane Europe.
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Congreso de Desalación y Reutilización
LUGAR:	Almería
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Aedyr
FECHA:	Noviembre de 2004
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Membranas de Desalación de Aguas. Toray Membrane Europe.
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Desalación y Depuración de Aguas – Aedyr
LUGAR:	Alicante
ENTIDAD ORGANIZADORA:	UCAGUA - Aedyr
FECHA:	2011
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Procesos de Desalación de Aguas por membranas.
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Desalación de Aguas – Universidad Politécnica de Madrid
LUGAR:	Universidad de Verano de La Granja de San Ildefonso
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Universidad Politécnica de Madrid
FECHA:	Julio 2009
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Procesos de Desalación de Aguas por membranas.
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Desalación de Aguas – Universidad Politécnica de Madrid
LUGAR:	Universidad de Verano de La Granja de San Ildefonso
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Universidad Politécnica de Madrid
FECHA:	Julio 2010
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Procesos de Desalación de Aguas por membranas.
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Desalación de Aguas – Universidad Politécnica de Madrid
LUGAR:	Universidad de Verano de La Granja de San Ildefonso
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Universidad Politécnica de Madrid
FECHA:	Julio 2011
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Procesos de Desalación de Aguas por membranas.
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Desalación de Aguas – Universidad Politécnica de Madrid
LUGAR:	Universidad de Verano de La Granja de San Ildefonso
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Universidad Politécnica de Madrid
FECHA:	Julio 2012
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO :	Desalination
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	European Desalination Society
LUGAR:	Barcelona, España
ENTIDAD ORGANIZADORA:	EDS
FECHA:	26/04/2012
NACIONAL / INTERNACIONAL	Internacional

TÍTULO:	Toray Membranes.
AUTORES:	Federico León Zepa
CONGRESO:	Aquatech 2008
LUGAR:	Amsterdam
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Aquatech
FECHA:	Noviembre 2008
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Toray Membranes.
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	Aquatech 2006
LUGAR:	Amsterdam
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Aquatech
FECHA:	Noviembre 2006
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Membranas Toray – Toray Membrane Europe
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	Toray Industries
LUGAR:	Tokio, Japón
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Toray
FECHA:	18/06/2009
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Ingeniería de Membranas
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	Encuentros Técnicos y Ciclos Institucionales de Ingeniería
LUGAR:	Las Palmas de Gran Canaria
ENTIDAD ORGANIZADORA:	COIIC (Colegio Oficial de Ingenieros Superiores Industriales de Canarias)
FECHA:	23/08/2002
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Desalination Using Membrane Technology
AUTORES:	Federico León Zerpa
CONGRESO:	Primer Congreso Internacional de Sitges: "First International Conference on Desalination Using Membrane Technology"
LUGAR:	Sitges (Barcelona)
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Editorial Científica Elsevier
FECHA:	07/04/2013 – 10/04/2013
NACIONAL/ INTERNACIONAL:	Internacional

TÍTULO:	Nuevo Programa de Desalación
AUTORES:	Federico León Zerpa – Recoletos
CONGRESO:	Grupo Recoletos (Actualidad Económica – Expansión)
LUGAR:	Madrid
ENTIDAD ORGANIZADORA:	Recoletos (Nacional)
FECHA:	Octubre, 2004

ANEXO 3. CÁLCULOS DE PROYECCIONES EN DISTINTOS ESCENARIOS

Los cálculos de las proyecciones se encuentran solo en formato digital, no en formato papel, ya que son 928 páginas.

