



GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MARC MARÍ ROIG

Estudio sobre la eficiencia energética de la IDAM Santa
Eulalia

Autor: Marc Marí Roig

Director: María del Mar Cledera Castro

Co-Director: Carlos Morales Polo

Madrid

Septiembre de 2019

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título Estudio sobre la eficiencia energética de la IDAM Santa Eulalia

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2018-2019 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Marc Mari Roig

Fecha: 19 / 09 / 2019



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Mar Cledera Castro

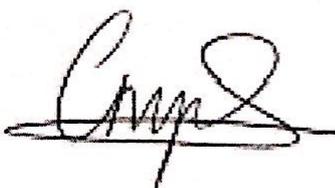
Fecha: / /



Firmado digitalmente por
Maria del Mar Cledera Castro
Fecha: 2019.09.19 13:57:53
+02'00'

Fdo.: Carlos Morales Polo

Fecha: / /



Firmado
digitalmente por
Carlos Morales Polo
Fecha: 2019.09.19
15:01:10 +02'00'

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Marc Mari Roig DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: Estudio sobre la eficiencia energética de la IDAM Santa Eulalia, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran

ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a de de

ACEPTA

Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MARC MARÍ ROIG

Estudio sobre la eficiencia energética de la IDAM Santa
Eulalia

Autor: Marc Marí Roig

Director: María del Mar Cledera Castro

Co-Director: Carlos Morales Polo

Madrid

Septiembre de 2019

ESTUDIO SOBRE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA IDAM SANTA EULALIA

AUTOR: MARC MARÍ ROIG

DIRECTOR: MAR CLEDERA CASTRO

ENTIDAD COLABORADORA: ICAI – Universidad Pontificia de Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto se estudiará tanto la viabilidad técnica, económica y social de la mejora del sistema de recuperación de energía de la planta desalinizadora de Santa Eulalia del Río. Dicha planta además suministra agua a toda la isla junto a las otras dos plantas ya en funcionamiento, la IDAM Santa Eulalia es la que más consumo energético tiene de las tres plantas debido a su obsoleta tecnología de recuperación de energía.

Para entender la necesidad del proyecto, a lo largo de este trabajo se explica la situación hidrológica de toda la isla de Ibiza, con fin de poner en contexto al lector sobre la acuciante necesidad de mejorar el abastecimiento de agua en la isla de Ibiza. El mayor problema que tiene la desalación es el consumo de energía, por lo que una mejora en el uso de energía es de gran ayuda a la hora de reducir el coste en la factura de los usuarios, así como para reducir el impacto ambiental asociado al consumo elevado de energía.

Se estudia el proceso íntegro de la desalación desde la entrada del agua a la cántara de captación hasta la distribución a los distintos depósitos situados en la isla, además se estudia la tecnología actual de la planta y la viabilidad de la sustitución de los equipos actuales por una tecnología más actual y puntera que domina el mercado.

Se dimensiona y se estima el coste asociado a la sustitución, así como una previsión de retorno de la inversión en función energético que esta modificación conlleva.

TITLE: STUDY ON THE ENERGY EFFICIENCY OF IDAM SANTA EULALIA

AUTHOR: MARC MARÍ ROIG

DIRECTOR: MAR CLEDERA CASTRO

COLLABORATING ENTITY: ICAI - Comillas Pontifical University

ABSTRACT

This project will study both the technical, economic and social feasibility of improving the energy recovery system of the Santa Eulalia del Río desalination plant. This plant also supplies water to the entire island along with the other two plants already in operation, the IDAM Santa Eulalia is the one with the most energy consumption of the three plants due to its obsolete energy recovery technology.

To understand the need for the project, throughout this work the hydrological situation of the entire island of Ibiza is explained, in order to put the reader in context on the pressing need to improve the water supply on the island of Ibiza. The biggest problem that desalination has is the consumption of energy, so an improvement in the use of energy is of great help when it comes to reducing the cost in the invoice of the users, as well as to reduce the environmental impact associated with the high energy consumption

The entire process of desalination is studied from the entrance of the water to the catchment tank to the distribution to the different deposits located on the island, in addition to studying the current technology of the plant and the feasibility of replacing the current equipment with a more current and cutting-edge technology that dominates the market.

The cost associated with the substitution is estimated and estimated, as well as a return on investment forecast based on the savings that this technology entails.

ÍNDICE

1.- Memoria.....	15
1.1-Memoria descriptiva.....	15
1.1.1-Objetivo.....	15
1.1.2- Estado del arte.....	15
1.1.2.1- Situación hidrológica e impacto social.....	15
1.1.2.2- Teoría de la desalación.....	20
1.1.2.3.- Estado actual de la instalación.....	28
1.1.3- Propuesta.....	29
1.1.3.1- Recuperación de energía.....	29
1.1.3.2- Variador de frecuencia en la bomba de alta.....	35
1.2- Cálculos.....	36
1.2.1- Consumo actual de la planta.....	37
1.2.2 – Consumo con PX-ERI 300.....	43
1.2.3 – Variador de frecuencia en bomba de alta.....	47
1.2.4 – Variador de frecuencia en bomba de alta y PX.....	48
2. Presupuesto.....	52
2.1 Instalación de PX-ERI 300.....	52
3 – Estudio medioambiental.....	56
4 – Conclusiones.....	58
5 – Bibliografía.....	60
6 - ANEXOS.....	63
ANEXO A.....	63
ANEXO B.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Red hidrográfica general de Ibiza y Formentera.	16
Ilustración 2: Evolución de la población 1998-2018.....	17
Ilustración 3: Población flotante en la isla de Ibiza en el año 2018.	17
Ilustración 4. Esquema de depósitos, desaladoras y interconexiones proyectados y en la actualidad.	19
Ilustración 5. Filtros tricapa IDAM Santa Eulalia.	23
Ilustración 6. Filtros de cartucho IDAM Santa Eulalia.	24
Ilustración 7. Disposición de los filtros verticales, turbobombas y bastidores de la planta.	25
Ilustración 8. Membrana de IDAM Santa Eulalia seccionada.....	26
Ilustración 9. Diagrama funcionamiento membranas OI.....	27
Ilustración 10. Esquema de una turbina Pelton..	29
Ilustración 11. Esquema de turbina Francis.....	30
Ilustración 12. Esquema simplificado de la instalación actual.....	37
Ilustración 13. Esquema de la instalación propuesta con PX.....	43
Ilustración 14. Esquema simplificado PX+VF en bomba de alta.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de diseño del agua de captación de la IDAM Santa Eulalia.....	21
Tabla 2. Datos comunes a todos los apartados	36
Tabla 3. Cálculos de la bomba de alta.	38
Tabla 4. Recuperación de energía turbina Pelton.	39
Tabla 5. Consumo bomba de alta + turbina Pelton.	41
Tabla 6. Estimación consumo bomba de alta con PX.	44
Tabla 7. Consumo bomba booster PX.	45
Tabla 8. Balance consumo energético con PX.	46
Tabla 9. Cálculos bomba de alta con variador de frecuencia.	47
Tabla 10. Cálculos bomba de alta para alimentar dos bastidores con PX.	49
Tabla 11. Cálculos bomba booster para dos bastidores.	50
Tabla 12. Consumo específico y porcentaje de ahorro.	50
Tabla 13. Estimación de la producción mensual y total producción anual.	53
Tabla 14. Ahorro energético y económico anual.	54
Tabla 15. Presupuesto estimado de la inversión.	54
Tabla 16. Estimación de ahorro y costes de explotación asociados a la inversión.	55
Tabla 17. Estudio medioambiental.	56

1.- Memoria

1.1-Memoria descriptiva

1.1.1-Objetivo

El objetivo del proyecto es realizar un estudio sobre la eficiencia energética de la instalación desalzinizadora de agua de Santa Eulalia del río, proponer mejoras y valorar tanto técnica como económicamente su viabilidad.

1.1.2- Estado del arte

1.1.2.1- Situación hidrológica e impacto social

El agua en la cultura ibicenca es un bien muy arraigado, debido a la insularidad y a la escasez de aguas superficiales, los habitantes de la isla han desarrollado una conciencia sobre el aprovechamiento del agua particular. En la isla se pueden encontrar todavía acueductos romanos o restos de estructuras de regadío musulmanas, punteras en su momento.

La pluviometría es un poco superior a la media nacional, destacando junio y julio son los meses más secos y que la mayoría de las precipitaciones se concentran desde octubre hasta enero por la denominada gota fría. Aproximadamente el noventa y cinco por cien de los recursos hídricos de la isla son subterráneos teniendo que ser extraídos mediante bombeos. Estudiando la orografía de la isla se entiende el motivo de la poca acumulación de agua superficial, con una red hidrográfica densa, con un gran número de torrentes sin recursos permanentes y cuencas poco extensas de suelo principalmente calcáreo. (INYPSA-ITGE)

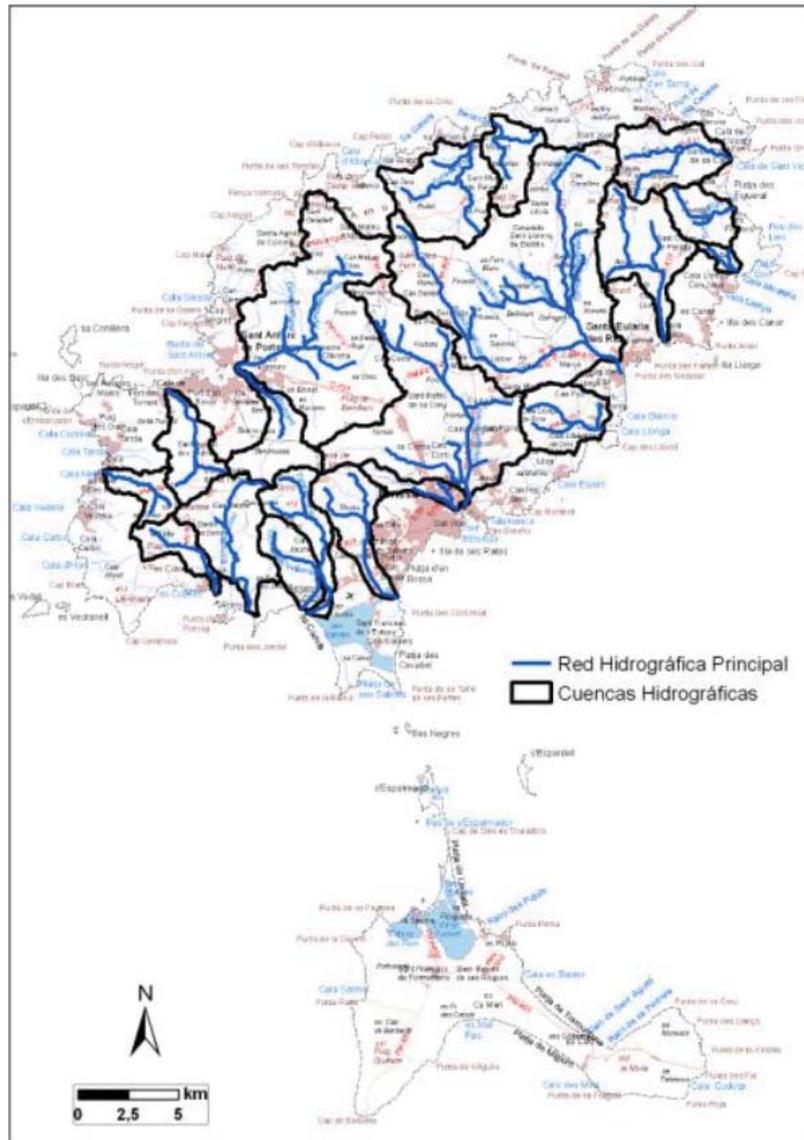


Ilustración 1. Red hidrográfica general de Ibiza y Formentera. Fuente: PHIB 2015-2018 mod septiembre 2018.

La población residente en la isla era de 144.659 habitantes inscritos en los padrones municipales de toda la isla a día 1 de enero de 2018.

Se muestra a continuación en la figura la evolución la población desde el año 1998 hasta el 2018. Se observa un continuo crecimiento de la población exceptuando 2003 y 2004. A partir del 2009 decrece el crecimiento poblacional, estabilizándose entre 2013 y 2016, creciendo mínimamente en 2017 y 2018.

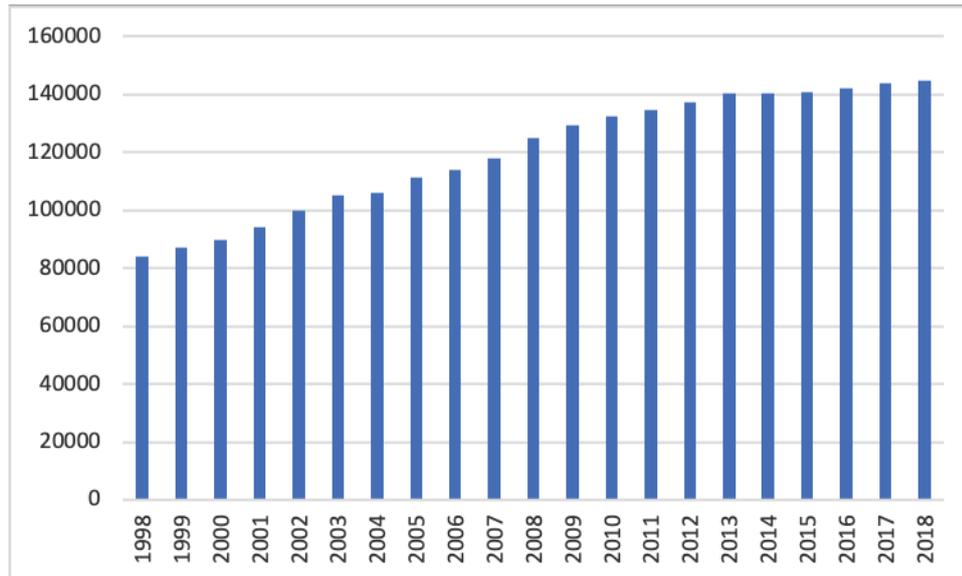


Ilustración 2: Evolución de la población 1998-2018. Fuente: IBESTAT

La mayoría de población se concentra en los núcleos urbanos de Ibiza, la capital, con 51.302 habitantes. En el pueblo de Santa Eulalia con 38.201 habitantes, y en San Antonio hay una población de 24.603 habitantes.

Para entender la estacionalidad de la demanda, en la figura a continuación, se han recogido los datos de población flotante, que tiene en cuenta los residentes y turistas a lo largo de 2018. (AETIB, 2018)

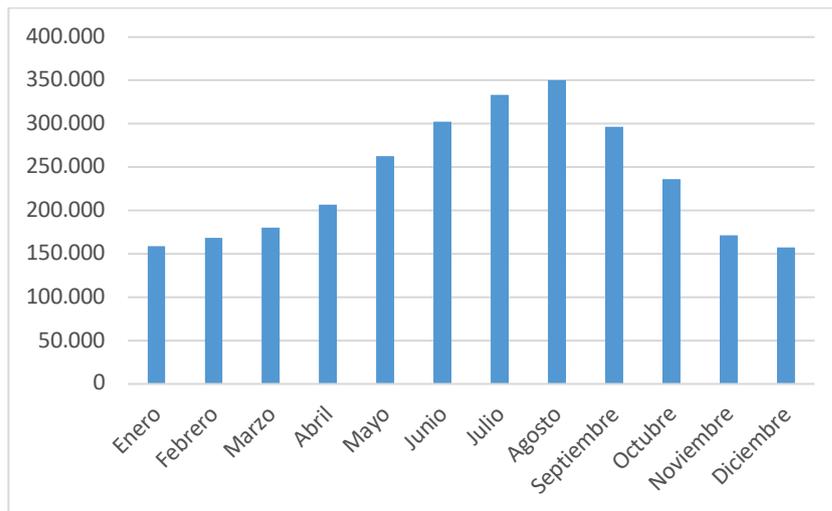


Ilustración 3: Población flotante en la isla de Ibiza en el año 2018. Fuente: IBESTAT

En los meses punta se sobrepasa el doble de la población fija de la isla, por lo que la demanda de agua aumenta en proporción, provocando que en los últimos años se haya producido una situación de emergencia en el abastecimiento, en la zona sur de la isla se ha llegado a declarar no apta para el consumo el agua suministrada a los clientes debido a la salinización de los pozos. Muchas de las reservas hídricas subterráneas de la isla han sido sobreexplotadas, llegando a agotarse o salinizarse, agravando aun más la situación de emergencia de la isla.

La estacionalidad de la demanda es el mayor problema que existe en la isla, pues los problemas de abastecimiento se acumulan en los meses de mayor afluencia de turistas. Esto provoca que las instalaciones pasen de estar sobredimensionadas a no ser capaces de abastecer la demanda. En la temporada actual, 2019, las empresas que explotan las desaladoras han manifestado su preocupación por no poder abastecer la demanda en el período punta, y avisando a ABAQUA que deben de volver a explotar los pozos subterráneos y por lo tanto abastecer agua de menor calidad y salinizada. (Análisis de la gestión del agua en la isla de Ibiza, 2015)

En este momento la isla dispone de tres plantas desalinizadoras de agua capaces de producir un total de 45.500 m³ de agua desalada al día, situadas en San Antonio (17.500m³/día), Ibiza ciudad (13.000m³/día) y Santa Eulalia (15.000m³/día), además estas se encuentran interconectadas en la parte central de la isla en el depósito de Sa Llawanera, por lo que toda la isla es capaz de recibir agua desalinizada de calidad. (Ilustración 3).

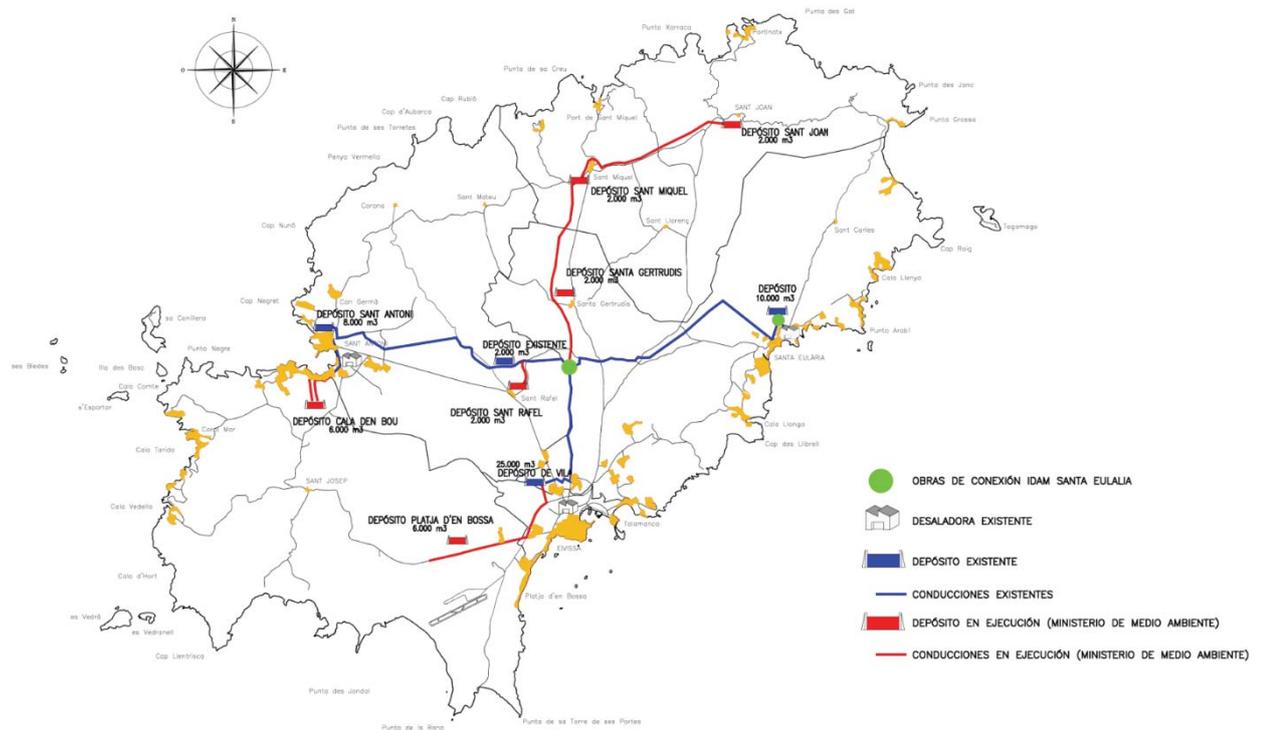


Ilustración 4. Esquema de depósitos, desaladoras y interconexiones proyectados y en la actualidad. Fuente ABAQUA.

Muchos establecimientos hoteleros que antes se autoabastecían de agua de un pozo, ahora están obligados a conectarse a la red municipal de aguas, por lo que la demanda de agua desalada en los próximos años aumentará exponencialmente.

Uno de los mayores problemas que supone el agua desalada a la población en general es el elevado coste que tiene producir y por tanto repercute en la factura de los consumidores, hasta ahora al estar explotando agua subterránea, los costes de extracción y procesamiento del agua eran mínimos, pero al introducir el agua desalada, los consumidores experimentarán una notable subida en sus facturas mensuales de agua. Es por ello la importancia que tiene este proyecto, para poder reducir el coste de la producción del agua además de abaratar la factura a los consumidores.

1.1.2.2- Teoría de la desalación.

La desalación es uno de los procesos más extendidos a la hora de potabilizar agua para consumo industrial o humano, sobretodo en zonas costeras dónde abunda el agua de mar, principal recurso de este proceso.

Hay muchas técnicas distintas para desalinizar el agua, pero este proyecto se centrará en el proceso más extendido en el mundo industrial, la osmosis inversa (OI), además se estudiará las distintas fases a las que se somete al agua desde la captación hasta la distribución a los consumidores para tener una visión general del proceso. Se pondrá como ejemplo de estudio la desaladora de estudio de este proyecto, la IDAM Santa Eulalia. Se adjunta en el anexo A un esquema de funcionamiento de la planta.

El agua que se capta en la desalinizadora de la planta de estudio tiene los siguientes parámetros:

Parámetros de diseño	Valores máximos
PH	8,2
TEMPERATURA (°C)	14-26
TDS (ppm)	40.670
Calcio (mg/l)	580
Magnesio (mg/l)	1.676
Sodio (mg/l)	11.800
Potasio (mg/l)	910
Bicarbonatos (mg/l)	102,11
Carbonatos (mg/l)	14,77
Sulfatos (mg/l)	2.764,88
Cloruro (mg/l)	22.813,77
Fluoruro (mg/l)	0,58
Nitratos (mg/l)	0,01
Boro (mg/l)	4,81
Dióxido de carbono (mg/l)	0,40
Sílice (mg/l)	0,00
Amonio (mg/l)	0,01

Tabla 1. Parámetros de diseño del agua de captación de la IDAM Santa Eulalia. Fuente: Proyecto de construcción y explotación de la instalación desaladora de agua marina de Santa Eulalia del río.

El proceso de la desalación se puede dividir en cuatro partes: captación, pretratamiento, ósmosis inversa y distribución.

- Captación

Parte inicial del proceso dónde se capta el agua del mar, el tipo de extracción puede ser abierta, si está situada en el fondo marino o cerrada si se encuentra en un pozo subterráneo bajo el fondo marino. La prioridad a la hora de diseñar la captación de la planta es evitar oscilaciones en temperatura, pues estas afectan a la capacidad de producción de agua producto, y evitar en medida de lo posible el impacto medioambiental. En el caso de la IDAM Santa Eulalia, el inmisario de captación se encuentra a quince metros de profundidad, rodeado de una pradera de posidonia. Las oscilaciones de temperatura en la toma varían entre los 15°C en invierno y los 26°C en verano, por lo que el consumo energético para la producción de agua varía de verano a invierno, siendo mayor en invierno pues se necesita mayor presión en las membranas para poder someter el agua al proceso de OI. La planta dispone de 4 bombas para la extracción de agua que son capaces de bombear el agua hasta la entrada de los filtros de arena.

- Pretratamiento

El pretratamiento engloba todos los procesos a los que se somete el agua desde que entra a la planta hasta que entran en las bombas de alta presión.

Al entrar en la planta, el agua tiene una presión de aproximadamente 2,5 bares y se le baja el PH hasta 6,5 con ácido sulfúrico para reducir la carga microbiológica a la salida de los filtros tricapa de arena, granate y antracita (Ilustración 4), la planta dispone de 6 de estos filtros y el caudal se reparte equitativamente entre ellos. Para el correcto funcionamiento de estos, es de vital importancia prestar atención al diferencial de presión entre la entrada y la salida de estos, a mayor diferencial de presión, mayor suciedad que puede causar el mal funcionamiento e incluso la rotura de los filtros por sobrepresión. La limpieza de estos filtros es costosa en cuanto a energía por lo es de vital importancia controlar la turbidez y SDI del agua de captación por si hay algún tipo de anomalía que pudiera estropear o ensuciar excesivamente los filtros.



Ilustración 5. Filtros tricapa IDAM Santa Eulalia. Fuente: Reportaje planta desalinizadora de Santa Eulalia del Río, Aqualia, 2012.

Tras el filtrado, se añade hipoclorito de sodio para eliminar toda la posible carga microbiológica que pueda quedar tras el filtrado tricapa con unos filtros de cartucho (Ilustración 4). La planta dispone de seis filtros de este tipo. Tanto el ácido sulfúrico como el hipoclorito añadidos, además de reducir la carga microbiológica, son necesarios para el control del Boro en el agua, el cual en los meses más cálidos es un problema pues aumenta su cantidad en el agua del mar a causa de la temperatura, es un problema no solo en temas sanitarios, sino también porque puede atascar y romper las membranas de ósmosis por lo que es uno de los parámetros más críticos en cualquier instalación desalinizadora del mundo.



Ilustración 6. Filtros de cartucho IDAM Santa Eulalia. Fuente propia.

Tras el filtrado se añade un dispersante para evitar que las partículas restantes puedan atascar las membranas, además previene que el borato que se haya podido formar se adhiera y atasque las membranas.

- Ósmosis inversa

Al salir de los filtros verticales, el agua pasa directamente a las bombas de alta presión, en dónde se eleva su presión de 2,5 a 65 bares aproximadamente, esta es la parte del proceso dónde se consume la mayor parte de la energía. La planta dispone de tres turbo bombas acopladas a una turbina Pelton para recuperar energía del agua de la salmuera que se rechaza en los bastidores, cada turbo bomba tiene una potencia nominal de 780kW. Tras elevar la presión, el agua es bombeada al bastidor dónde se encuentran las membranas de ósmosis inversa.



Ilustración 7. Disposición de los filtros verticales, turbobombas y bastidores de la planta. Fuente: Reportaje planta desalinizadora de Santa Eulalia del Río, Aqualia, 2012.

La ósmosis inversa consiste en invertir el proceso natural de la ósmosis, el cual consiste en el flujo natural de un fluido a través de una membrana semipermeable, las membranas no dejan pasar sólidos disueltos pero si disolventes, la dirección del flujo del disolvente es determinado por su potencial químico, el cual depende de la presión, temperatura y concentración en sólidos disueltos. En este caso, se eleva la presión para que el agua que circula por las membranas pase de una elevada concentración de sales a una considerablemente menor.

La IDAM Santa Eulalia dispone de tres bastidores, cada uno dispone de 154 membranas del modelo SW30HRLE-440i de FILMTEC (Ilustración 7), haciendo un total de 462 membranas, dado el elevado coste que estas tienen, hay que tener especial cuidado a la hora de operar la planta pues son elementos sumamente delicados y cualquier perturbación puede desembocar en una parada de la producción. Dichas membranas tienen un factor de producción de agua producto del 45%.

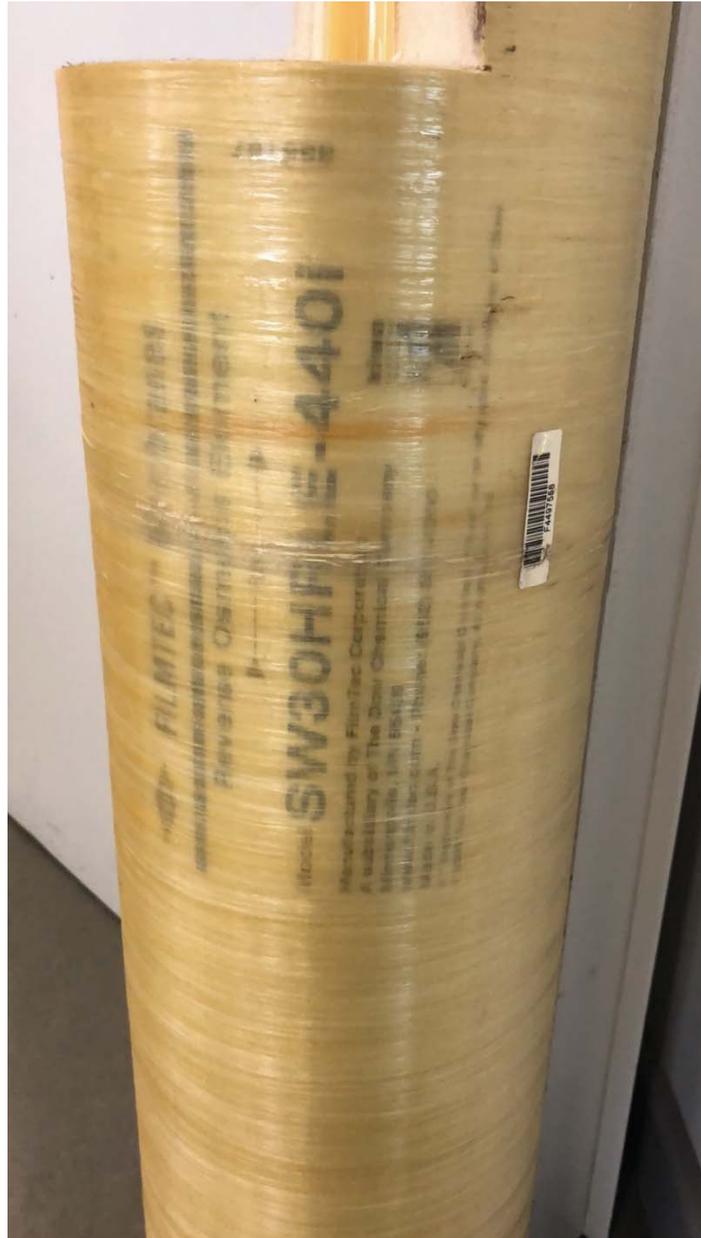


Ilustración 8. Membrana de IDAM Santa Eulalia seccionada. Fuente propia.

El agua producto sale a presión atmosférica por el tubo central de las membranas, mientras que la salmuera sale a unos 60 bares de presión por el exterior de estas (Ilustración 8), antes había una línea de agua en la producción, ahora hay dos que deben ser sometidas a distintos tratamientos, la línea de agua producto y la línea de salmuera.

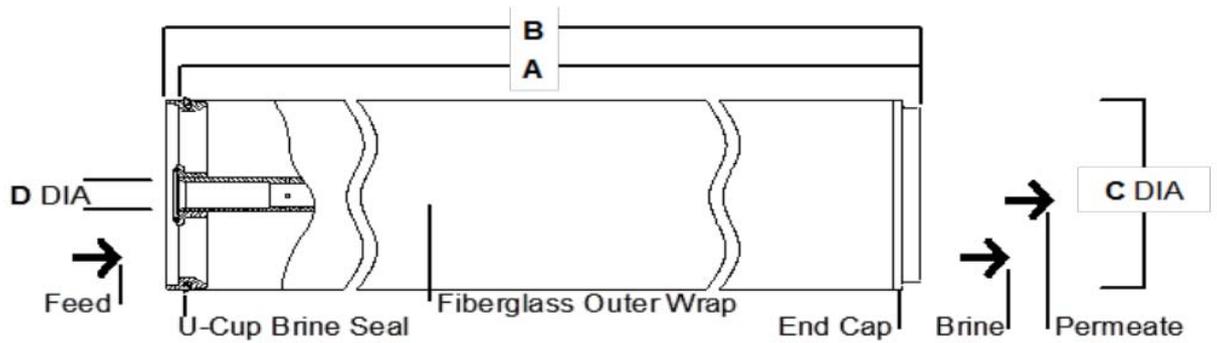


Ilustración 9. Diagrama funcionamiento membranas OI. Fuente: Product data sheet FILMTEC™ SW30HRLE-440i Element.

Se recupera la energía de la línea de salmuera, pues al encontrarse esta a una alta presión se puede aprovechar para reducir los costes de energéticos de la planta. La IDAM Santa Eulalia dispone de un sistema recuperador de energía compuesto por una turbina Pelton acoplada al eje de la turbobomba, dicho sistema tiene un rendimiento del 86%. En el mundo de la desalación el mayor impacto que hay es el energético, es por ello que, esta parte de la instalación es de vital importancia, para reducir costes e impacto medioambiental. La salmuera tiene una conductividad de $\sim 88.000 \mu\text{S}/\text{cm}$, hay que tener especial cuidado en esta instalación pues el emisario se encuentra rodeado de la pradera de posidonia, por lo que se dispone de tres bombas de dilución, situadas en la estación de captación de la planta para diluir la salmuera con agua marina y así disminuir el impacto causado por su elevada salinidad así como los productos químicos utilizados hasta el momento.

El agua producto tiene una conductividad de $\sim 400 \mu\text{S}/\text{cm}$, prácticamente sin sales, por lo que a la salida de los bastidores no es apta para el consumo humano, el agua se somete a un proceso de remineralización mediante cal y CO_2 , dónde además, se sube el PH hasta 8,2. (ACUAMED, CCA). Y ya, viene la última fase del proceso, la distribución.

- Distribución

Una vez el agua ha sido remineralizada, se le añade el cloro necesario para cumplir con la normativa y se almacena en el depósito de la planta. La planta de estudio, dispone de un depósito de 2000m³, y un equipo de bombeo compuesto por cuatro bombas de 4,3kW con un caudal nominal de 230m³/h, que es capaz de bombear el agua hasta el depósito municipal situado en can Guasch, para su posterior distribución a la población.

1.1.2.3.- Estado actual de la instalación

La IDAM Santa Eulalia es una construcción que desde el día que se puso en marcha, 4 de julio de 2018, ha estado obsoleta tecnológicamente, así como en un estado deplorable de mantenimiento, todo esto es debido a que la planta, debido a unos sobrecostes de 8.020.812,12€ paralizaron la puesta en marcha de la instalación durante más de siete años. No fue hasta principios del año 2018 que el Govern de les Illes Balears, se puso de acuerdo con el Gobierno central para que este se hiciera cargo del sobrecoste debido a modificaciones en el proyecto. Dichas modificaciones fueron porque durante la construcción se decidió aumentar la capacidad de 10.000m³/día a 15.000m³/día. Este sobrecoste adicional supuso un 56,5% adicional al presupuesto inicial. (Conselleria de Medi Ambient, Agricultura i Pesca, 2016)

Es por ello que, la planta al ser diseñada hace más de diez años dispone de una tecnología de recuperación de energía tan poco eficiente, además el contrato actual es de puesta en marcha que llevan a cabo una UTE entre Aqualia y Acciona, por un período de tres años, el cual vence a finales del 2020. En este contrato, los costes de la energía corren a cargo de ABAQUA, que es la empresa que suministra el agua a todos los municipios de la isla de Ibiza.

1.1.3- Propuesta

En vista del elevado coste de explotación que tiene la instalación en cuanto a consumo de energía y en pos de reducir el impacto medioambiental debido al consumo elevado, se proponen distintas medidas para reducir el consumo energético.

1.1.3.1- Recuperación de energía

Se empieza analizando la tecnología actual, la turbina Pelton (Ilustración 9) acoplada al eje de la turbobomba. Con un mantenimiento rutinario de cambio de aceite, cambio de retenes, cambio de la junta tórica y los sellos, es de las tecnologías que menor coste presentan en este aspecto. Como ventaja tiene su simplicidad en cuánto al entramado de tuberías necesario para funcionar. La mayor desventaja de su uso es su bajo rendimiento, que está sobre el 36%. Es por ello que esta tecnología se encuentra prácticamente en desuso.

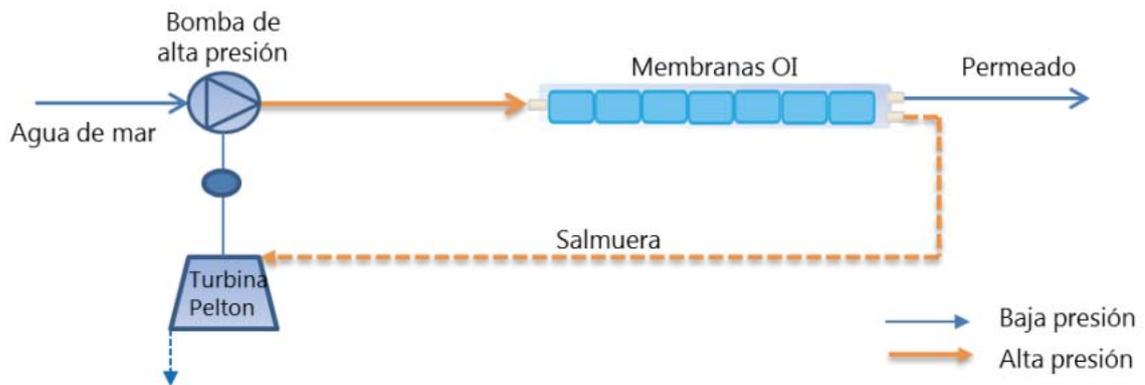


Ilustración 10. Esquema de una turbina Pelton. Fuente: Tesis Doctoral D. Julen Cabero García.

La tecnología más primitiva que existe en el mundo de la desalación es la turbina Francis (Ilustración 10), con un funcionamiento parecido a la turbina Pelton pero con un menor

rendimiento, esta tecnología está totalmente en desuso, su ventaja con respecto a las otras es la simplicidad en el entramado de tuberías.

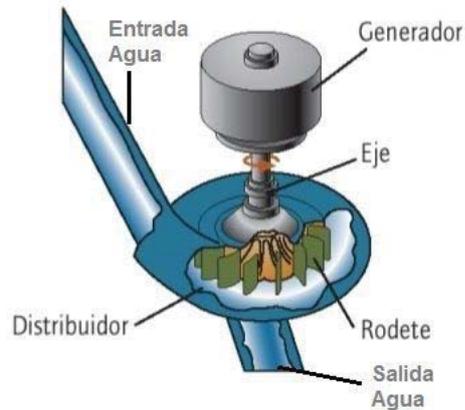


Ilustración 11. Esquema de turbina Francis. Fuente: <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>

Las dos tecnologías mencionadas anteriormente fueron usadas, primero la turbina Francis, y la Pelton siendo su evolución, desde alrededor de 1985 hasta alrededor de 2005. (García, 2015)

A partir del año 2000, empezaron a aparecer los actuales sistemas de recuperación de energía. En sus antípodas eran denominados sistemas de desplazamiento positivo, en la actualidad se les conoce como intercambiadores de presión o cámaras isobáricas.

Su funcionamiento se basa en la transmisión de la presión de la salmuera a el agua de mar a lo largo de un cilindro, ya sea mediante contacto directo de dos líquidos (agua de mar y salmuera) o mediante un elemento sólido (pistón).

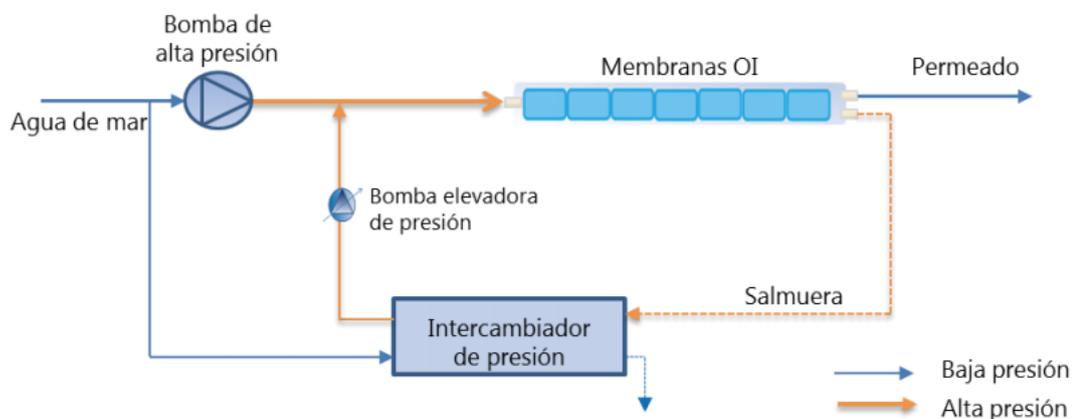


Ilustración 11. Esquema de funcionamiento de una cámara isobárica. Fuente: Tesis Doctoral D. Julen Cabero García.

Estos dispositivos presentan un rendimiento comprendido entre el 95 y el 98%, en la actualidad los dos fabricantes más extendidos para este tipo de cámaras, ERI y DWEER. Existen otras tecnologías, pero con menor uso a nivel mundial como Aqualyng, Osmorec, RO kinetics, ISave ERDs.

Las diferencias entre las distintas tecnologías radican en el contacto en la transmisión de presión en los fluidos, la que será objeto de estudio en este proyecto es PX – ERI. En concreto, se adjunta en el anexo B las especificaciones técnicas, así como planos del modelo PX-300.

En un sistema de ósmosis inversa equipado con equipos PX, la salmuera se dirige al sistema de alimentación del bastidor como se puede apreciar en la ilustración 12. Un rotor gira entre el flujo de agua de entrada y la salmuera, expulsando la salmuera y remplazándola por agua producto. La presión se transmite de la salmuera (G) al flujo de entrada (B). El rotor gira libremente a una velocidad proporcional al flujo de agua y éste se lubrica mediante la salmuera. Se puede insatalar cualquier caudal poniendo mayor número de PX en paralelo.

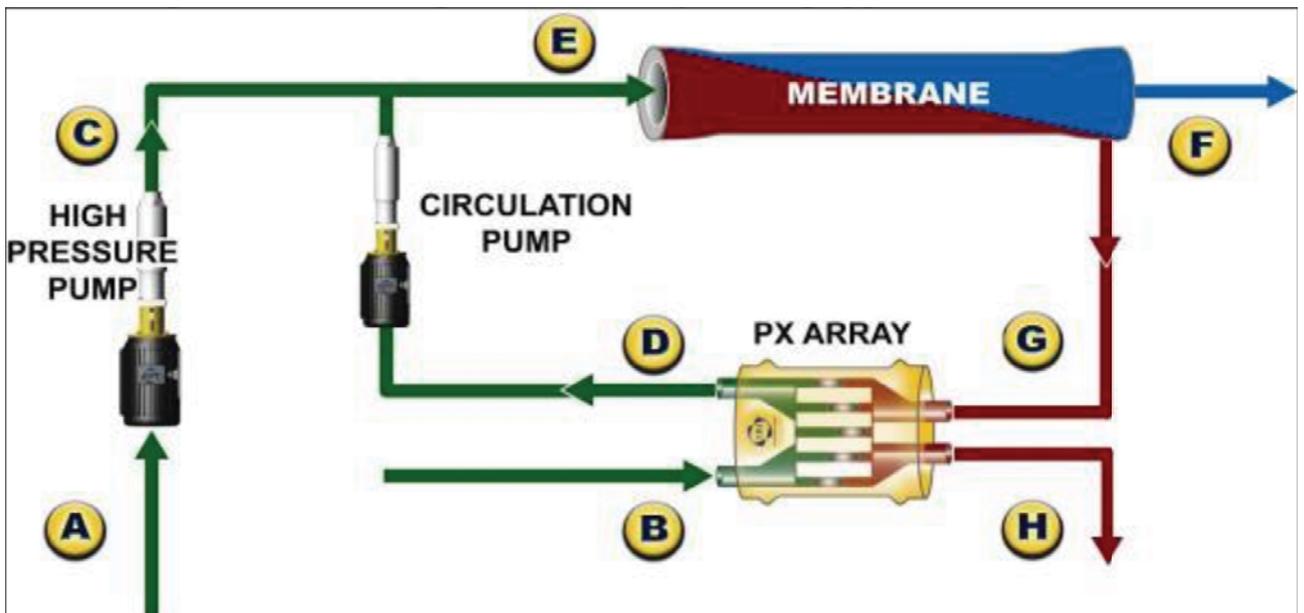


Ilustración 12. Funcionamiento de PX-300. Fuente: Anexo 2

El control y el funcionamiento de un PX o un conjunto de PX se puede entender considerando dos tuberías paralelas; una de alta presión y otra de baja presión fluyendo en direcciones opuestas. El agua a alta presión fluye por un circuito cerrado a través de las membranas, compuesto por el PX, la bomba de circulación y vuelta a las membranas (E-D-G-E) con el flujo controlado por la bomba de circulación. El agua a baja presión proveniente del

pretratamiento pasa a través de las unidades PX y por el sistema de descarga (B-H) con el caudal controlado por las bombas de captación y la válvula de descarga de la salmuera instalada en el dispositivo PX. El caudal de alta presión y el de baja son independientes, por lo que la planta se tiene que diseñar de tal forma que sea capaz de controlar ambos caudales.

En condiciones normales de funcionamiento, el operario debe fijar que el caudal de baja presión (B) que entra en el dispositivo, sea igual que el caudal que abandona el PX por la válvula de descarga (H). Bajo esta condición de funcionamiento equilibrado, y suponiendo un factor de conversión estándar (40%), la salinidad aumenta en las membranas un 2.5%. Como resultado de la inherente flexibilidad del dispositivo PX, este también puede ser operado cuando los caudales de entrada y salida son distintos.

La condición de caudales desiguales se da cuando el caudal de agua a baja presión a través del dispositivo es distinto al caudal de agua a alta presión. Si el caudal de baja presión supera el caudal de alta presión, se dice que el dispositivo opera en *over-flush state*. El caudal de baja “empuja” la salmuera del dispositivo PX reduciendo así el aumento de salinidad debido al contacto, esta es la forma la cual se suelen operar estos dispositivos, pues a pesar de estar perdiendo agua, se reduce considerablemente el incremento de salinidad debido al contacto entre salmuera y agua de entrada. Cuando el dispositivo se opera con un caudal de alta presión mayor que el de baja presión se dice que el dispositivo opera con *lag flow*, esto implica que la salinidad en las membranas aumenta, en la figura 13 se muestra como aumenta la salinidad en función de la diferencia de caudales, no es un régimen de funcionamiento deseado, pero hay que prestar atención al incremento de salinidad en las membranas para saber si hay un malfuncionamiento en algunos de los componentes implicados.

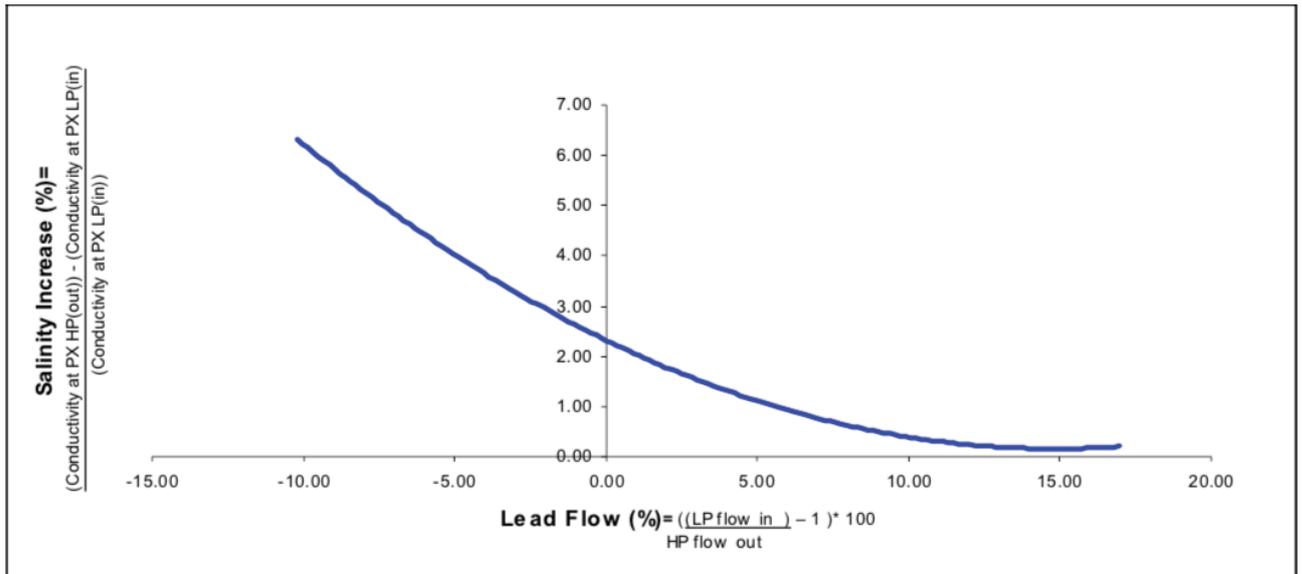


Ilustración 13. Incremento de salinidad en función de la diferencia entre caudal de baja presión y caudal de alta presión.
Fuente: Anexo 2.

El principio en el cual se basa el funcionamiento del PX es el de conservación de la masa en un sistema cerrado, la cual se mantendrá constante sin importar el proceso que esté sucediendo dentro del sistema pues la materia ni se crea ni se destruye. Aplicando esto a la ilustración 12, el dispositivo PX tiene que verificar que los caudales de entrada B y G son igual a los caudales de salida en D y H.

Como el agua que circula a través del PX contiene sal como sólido disuelto; el principio de concentración de la masa también se aplica a la sal disuelta. La conservación de la masa implica que la cantidad total que entra en el PX por las dos entradas es igual que la cantidad de sal que sale del dispositivo por sus dos salidas.

Tanto el PX como la válvula de descarga de la bomba de alta sellan la parte de alta presión del proceso. Durante la OI, el agua se introduce en el bucle de alta presión (D-E-G) por la bomba de alta presión a través de C. En cuanto al caudal de lubricación que necesita el dispositivo se puede calcular haciendo la diferencia del caudal en C y el caudal de permeado F, que normalmente es un 0.5% del caudal total del proceso.

Sabiendo que las membranas que están instaladas en la planta tienen un factor de conversión nominal de 45%, y que el caudal nominal del bastidor es de 466m³/h, tenemos que el caudal que pasa por la bomba de alta presión es de 210m³/h, y 256m³/h pasan por el PX. Es necesario instalar una bomba controlada por un variador de frecuencia para igualar la presión de salida del PX a la bomba de alta para que las presiones sean iguales, la presión que debe subir la bomba es proporcional a la pérdida de carga debido a la circulación del agua a través del bastidor y de las pérdidas por codos y la circulación en las tuberías.

Hay que tener especial cuidado a la hora de operar el dispositivo pues un caudal demasiado grande, tanto en alta como en baja presión puede dañar los componentes cerámicos del PX. Dado que el rotor del dispositivo es accionado por el caudal, si este es demasiado elevado puede causar que el rotor gire a excesivas revoluciones, provocando cavitación en el agua que hay en su interior. El daño puede empezar siendo una pequeña fisura que va creciendo a lo largo del tiempo con consecuencias catastróficas pues puede causar la destrucción total del dispositivo.

Para asegurar el correcto funcionamiento de los PX instalados, es de vital importancia calcular el número de PX que se instalarán, para ello se aplica una restricción y es que, a caudal nominal, se pueda operar con un PX menos de los que hay instalados, es decir, que si hay 5 el bastidor pueda operar con total normalidad con 4. Esto es debido a que si se estropea o atasca un dispositivo no afecte al resto críticamente y que de tiempo a parar el bastidor sin estropear ningún componente más. Tampoco se pueden instalar infinitos dispositivos pues hay una limitación de caudal mínimo, por debajo de ese caudal también se pueden dañar los componentes. Para estos cálculos, se tiene que el caudal nominal de salmuera es de 256m³/h y sabiendo que el caudal máximo que puede pasar por un PX-300 es de 68,3m³/h y el mínimo es de 45,5 m³/h, por tanto:

$$N^{\circ} \text{ mínimo} = \frac{256}{68,3} = 3,75 \sim 4$$

$$N^{\circ} \text{ máximo} = \frac{256}{45,5} = 5,62 \sim 5$$

Por tanto, para garantizar la continuidad del suministro y que se reduzca el número de paradas, se fija que se instalarán cinco PX-300 por bastidor. Como la planta dispone de tres bastidores, cada una con su bomba de alta, se tendrán que comprar 15 PX-300.

En la sección de cálculos se dimensionará y detallará la bomba de circulación necesaria para los PX así como el variador de frecuencia necesario para el control de esta.

1.1.3.2- Variador de frecuencia en la bomba de alta

Se propone cambiar el modo de regular el caudal que tiene la bomba de alta presión, en la actualidad el caudal se regula mediante una electroválvula a la salida de esta, con el porcentaje de apertura se fija el caudal deseado. Este método para la regulación de caudal es poco eficiente energéticamente pues se disipa energía en la válvula, además, la bomba trabaja siempre a su potencia nominal sin poder cambiar el punto de trabajo. Por lo que se propone sustituir dicha válvula por un variador de frecuencia para controlar el caudal de la bomba. Se sabe que la potencia eléctrica necesaria para accionar el sistema es de 604kW, por lo que el variador necesario tiene que ser al menos de 625kW para tener margen de seguridad. Lo más importante del variador es su fiabilidad a la hora de garantizar un funcionamiento continuo durante un período prolongado de uso.

Se propone el variador de frecuencia PowerFlex 7000 de 630kW de la marca Rockwell, en la sección de cálculos se explicará con mayor profundidad la viabilidad de instalar el variador de frecuencia, además se estudiará la propuesta de instalar el variador y los PX para evaluar el ahorro energético que se conseguiría.

1.2- Cálculos

En esta sección se detallarán los cálculos realizados para el dimensionamiento de los componentes. Se dividirá en cuatro secciones diferenciadas, consumo actual con las turbinas Pelton, consumo con los PX, consumo con el variador de frecuencia en bomba de alta y consumo con PX y variador de frecuencia en la bomba de alta. Todos los cálculos se han realizado para un bastidor, como la planta dispone de tres bastidores con las mismas características y funcionamiento, los cálculos son válidos para toda la instalación. Notar que todos los cálculos realizados son para régimen permanente, es decir, no se estudia el caso de arranque del bastidor pues no es relevante.

En la tabla a continuación se presentan los datos comunes a todos los cálculos:

Parámetros de entrada		
Caudal entrada	466	m ³ /h
Producción	210	m ³ /h
Presión de entrada	60	kg/cm ²
Densidad de agua de mar	1024	kg/m ³
Densidad rechazo	1051	kg/m ³
Gravedad	9,81	m/s ²
Temperatura	14	°C

Tabla 2. Datos comunes a todos los apartados

Como caudal de entrada se ha fijado el nominal de los bastidores, la producción es la producción nominal de los mismos. La presión de entrada es la presión a la que tiene que entrar el agua a los bastidores, se calcula a partir de la presión de salida de la bomba y la pérdida de carga entre la salida de la bomba y la entrada de los bastidores. Para poder producir a factor de conversión nominal. Tanto la densidad de agua de mar, como la densidad del rechazo son datos que han sido proporcionados por operarios de la planta desalinizadora en las condiciones de temperatura a 14°C.

Se ha elegido realizar los cálculos a la menor temperatura que alcanza el agua pues se requiere más presión para conseguir el mismo factor de entrada, esto es debido al cambio de densidades que tiene el agua de mar con la temperatura. Para no subdimensionar, por ello se ha elegido el peor de los casos.

1.2.1- Consumo actual de la planta

Se ha realizado el cálculo del consumo eléctrico de la planta con el sistema de recuperación de energía actual, sin variador de frecuencia en la bomba de alta. Se ha dividido el cálculo en tres secciones, bomba de alta, turbina Pelton y total. En la figura a continuación se representa simplificada la instalación. La línea azul corresponde al agua pretratada, la naranja a la salmuera y la verde al permeado que sale de las membranas. El grosor de las líneas indica su presión, cuánto más gruesa, más presión. Este código de colores y líneas es aplicable a todas las figuras que se presentarán en apartados posteriores.

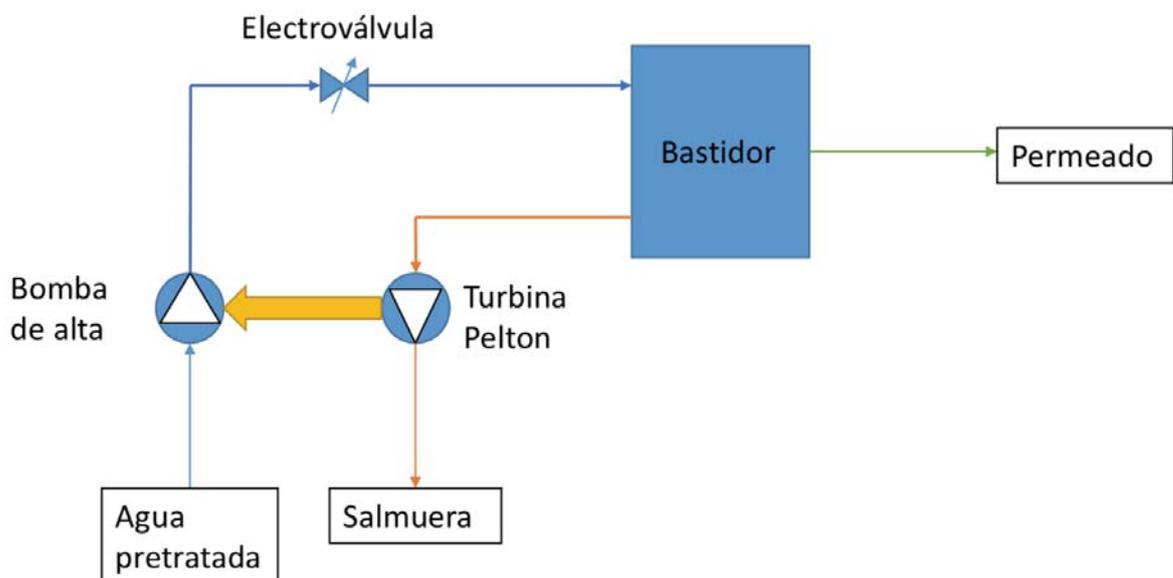


Ilustración 12. Esquema simplificado de la instalación actual.

En la tabla a continuación se presentan la tabla con los datos y cálculos para la bomba de alta.

Bomba de alta presión		
Caudal (Q)	466	m3/h
Presión descarga bomba (H _s)	65	kg/cm2
Pérdida de carga válvula+tuberías+bomba	5	kg/cm2
Presión de aspiración (H _e)	2,5	kg/cm2
TDH bomba	612,92	mca
Potencia hidráulica bomba (P _H)	778,31	kW
Rendimiento bomba (η)	84,5%	%
Potencia eje lado bomba (P _B)	921,08	kW

Tabla 3. Cálculos de la bomba de alta.

- Caudal: el nominal del bastidor.
- Presión descarga bomba (H_s): Presión a la cual sale el agua de la bomba de alta, es un dato conocido pues la bomba opera siempre en el mismo punto, la presión de entrada a los bastidores se consigue regulando una electroválvula instalada a la salida de la bomba.
- Pérdida de carga válvula+tuberías+bomba: la válvula reduce la presión de la salida de la bomba en unos 4 bares, el bar restante se supone de la pérdida de presión por la circulación del fluido a través de la bomba y el entramado de tuberías.
- Presión de aspiración (H_e): es la presión de entrada de la bomba.
- TDH bomba: entendiendo TDH como *Total Dinamic Height*, se ha calculado mediante la siguiente fórmula:

$$TDH = \frac{H_s - H_e}{10000} * 98066,5$$

- Potencia hidráulica de la bomba: es la potencia efectiva que realiza la bomba para conseguir dicha elevación de presión al caudal de agua. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_H = \frac{TDH * Q * 9,81}{3600}$$

- Rendimiento bomba: rendimiento de la bomba instalada en la planta.
- Potencia eje lado bomba: Es la potencia efectiva que se necesita para conseguir la P_H necesaria. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_B = \frac{P_H}{\eta}$$

En la tabla a continuación se presentan los cálculos de la recuperación de energía estimada de la turbina Pelton.

Turbina		
Caudal (Q_s)	256	m ³ /h
Pérdida carga bastidor + tuberías	1,5	kg/cm ²
Presión de aspiración (H_a)	58,5	kg/cm ²
Altura neta disp turbina (H_D)	558,98	mca
Potencia hidráulica bomba (P_H)	389,94	kW
Rendimiento turbina (η_T)	86%	%
Potencia eje lado turbina (P_T)	335,35	kW

Tabla 4. Recuperación de energía turbina Pelton.

- Caudal: Es el 55% del caudal total (466 m³/h), es el caudal de salmuera.
- Pérdida carga bastidor + tuberías: Se estima que la pérdida de carga en el bastidor y en las tuberías es de 1,5 bares.

- Presión de aspiración: Es la presión a la que el agua entra a la turbina, sabiendo la presión de entrada a las membranas (60 bar), hay que restar las pérdidas de carga estimadas.
- Altura neta disp turbina: Es la caída de altura que es turbinada por la Pelton. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$H_D = \frac{H_a - 1}{10000} * 98066,5$$

- Potencia hidráulica de la turbina: La potencia mecánica que atraviesa la turbina. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_H = \frac{H_D * Q_S * 9,81}{3600}$$

- Rendimiento turbina: Rendimiento de la turbina Pelton instalada en la planta.
- Potencia eje lado turbina: La potencia efectiva que se transmite al eje desde la turbina. La ecuación es:

$$P_T = P_H * \eta_T$$

Con estos cálculos, se puede estimar el consumo del conjunto bomba de alta y turbina Pelton de la planta, y así comparar con las propuestas expuestas anteriormente. En la tabla a continuación se presentan los resultados.

Conjunto turbobomba		
Potencia Eje motor turbobomba (P_{TB})	582,78	kW
Rendimiento motor (η_M)	97%	%
Recuperación	37%	%
Potencia eléctrica motor (P_E)	600,81	kW
Consumo específico	2,86	kWh/m ³

Tabla 5. Consumo bomba de alta + turbina Pelton.

- Potencia eje motor turbobomba: Potencia necesaria para accionar el eje del conjunto turbobomba-Pelton. Se calcula:

$$P_{TB} = P_B - P_T$$

- Rendimiento motor: Rendimiento del motor que acciona la bomba.
- Recuperación: Es el porcentaje de energía que recupera la turbina Pelton. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Recuperación = \frac{P_T}{P_B}$$

- Potencia eléctrica motor: Potencia eléctrica que consume el motor para accionar al conjunto turbobomba-Pelton. La ecuación usada para calcularlo es:

$$P_E = \frac{P_{TB}}{\eta_M}$$

- Consumo específico: Magnitud para poder comparar el consumo de energía por m³ producido, indicador para saber el ahorro energético total. Se calcula:

$$Consumo\ específico = \frac{P_E}{Producción}$$

Ahora que se conoce el consumo energético actual, se puede realizar la comparación con las propuestas y valorar su viabilidad.

1.2.2 – Consumo con PX-ERI 300

En la figura a continuación se presenta la instalación propuesta. El código de colores y grosores de las líneas es el mismo que en el caso anterior.

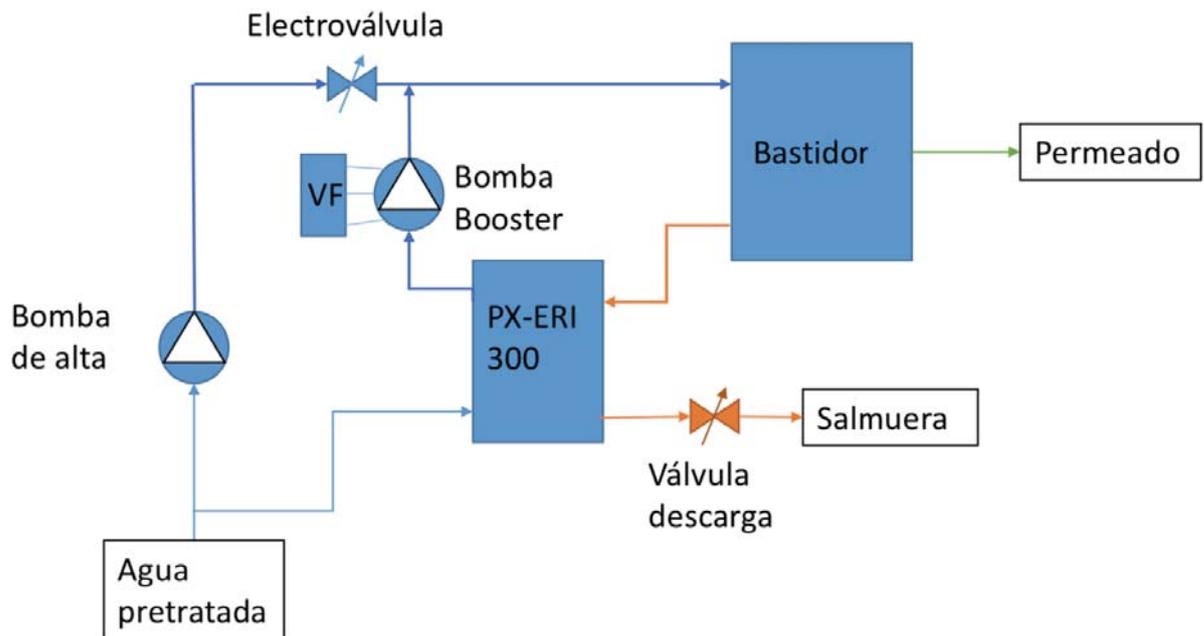


Ilustración 13. Esquema de la instalación propuesta con PX.

Sabiendo el funcionamiento de los PX, se puede estimar cual sería el consumo si se realiza la instalación de estos. En la tabla a continuación se presentan los cálculos de la parte de la bomba de alta presión.

Bomba de alta presión		
Caudal	210	m3/h
Presión descarga bomba	65	kg/cm2
Pérdida carga válvula+tuberías+bomba	5	kg/cm2
Presión aspiración	2,5	kg/cm2
TDH bomba	612,92	mca
Potencia hidráulica bomba	350,74	kW
Rendimiento bomba	84,5%	%
Potencia lado eje bomba	415,08	kW
Rendimiento motor	97%	%
Potencia eléctrica motor (P_{EM})	427,92	kW

Tabla 6. Estimación consumo bomba de alta con PX.

- Caudal: El caudal que pasa por la bomba de alta es el caudal de permeado que sale del bastidor, como se ha explicado anteriormente, el caudal por la bomba de alta es el de producción y por los PX va el caudal de salmuera.

El resto de los parámetros han sido explicados en la tabla 3. Notar que la potencia eléctrica necesaria para accionar la turbobomba se ha reducido considerablemente con el caso anterior, esto es gracias a la reducción de caudal que pasa por ella.

A continuación, se calcula el consumo de la bomba de circulación (*booster*) para poder instalar los PX en el conjunto. Se ha tenido en cuenta el variador de frecuencia necesario para accionar el conjunto.

Bomba booster		
Caudal	256	m3/h
Presión impulsión (H _S)	60	kg/cm2
Pérdida carga bastidor + tuberías (H _{BT})	1,5	kg/cm2
Pérdida carga PX lado alta (H _{PX})	0,8	kg/cm2
Presión aspiración (H _A)	57,7	kg/cm2
TDH bomba	22,56	mca
Potencia hidráulica bomba (P _H)	15,73	kW
Rendimiento bomba	86%	%
Potencia eje lado bomba (P _{BB})	18,30	kW
Rendimiento motor (η _M)	97%	%
Rendimiento variador de frecuencia (η _{VF})	97%	%
Potencia eléctrica motor (P _{EB})	19,45	kW

Tabla 7. Consumo bomba booster PX.

- Caudal: Es el caudal de salmuera, es el que atraviesa el PX hacia la entrada del bastidor.
- Presión impulsión: Presión a la cual tiene que estar el agua que pasa a través del PX a la salida de la bomba booster.
- Pérdida carga bastidor + tuberías: Estimación de la pérdida de carga de la circulación del fluido por el bastidor y el entramado de tuberías hasta la entrada al PX.
- Pérdida de carga PX lado alta: Pérdida de carga estimada en el interior del PX.
- Presión de aspiración: Presión de entrada a la bomba booster. Se calcula:

$$H_A = H_S - H_{BT} - H_{PX}$$

- TDH bomba: La presión que debe elevar la bomba es la misma que las pérdidas.
- Potencia eje lado bomba: Potencia que debe realizar la bomba para elevar ese caudal a la presión requerida.
- Rendimiento motor: Rendimiento del motor que acciona la bomba.

- Rendimiento variador de frecuencia: Rendimiento del variador de frecuencia elegido.
- Potencia eléctrica motor: Potencia eléctrica requerida para conseguir la potencia hidráulica necesaria.

$$P_{EB} = \frac{P_{BB}}{\eta_M * \eta_{VF}}$$

Para la bomba *booster* se necesita una bomba que sea de al menos 19,45kW, y además, que pueda soportar la elevada presión de trabajo. Por tanto, se elige la bomba SIHImulti MSH 22kW de la marca FLOWSERVE, se elige esta por su robustez, y fiabilidad a la hora de asegurar su funcionamiento.

Para el variador de frecuencia, se necesitará que al menos pueda proporcionar los 19,5 kW, para asegurar que nunca va a trabajar a una potencia mayor que la nominal se fija la potencia nominal a 22kW, por lo tanto, se elige el variador de frecuencia trifásico ABB ACS310-03X-48A-4.

En la tabla a continuación se expone el total de los resultados energéticos del conjunto turbobomba + PX

Potencia eléctrica total	447,36	kW
Consumo específico	2,13	kWh/m3
Ahorro PX/Pelton	26%	

Tabla 8. Balance consumo energético con PX.

Como se puede apreciar, los PX son una tecnología revolucionaria en cuanto al ahorro de energía en la desalación, a priori parece una inversión razonable, más adelante se hará el estudio sobre la viabilidad económica de la inversión.

1.2.3 – Variador de frecuencia en bomba de alta.

Se va a estudiar la viabilidad técnica de sustituir la electroválvula para regular la presión de salida de la bomba de alta. Actualmente, la presión de salida de la bomba no es regulable por lo que trabaja todo el rato en el mismo punto de su curva, teniendo que disipar en la válvula la energía sobrante que se le ha transmitido al agua. Se ha estimado que la válvula tiene una pérdida de carga de 4 bares. En la tabla a continuación se exponen los cálculos.

Bomba de alta presión		
Caudal	466	m3/h
Presión descarga bomba	61	kg/cm2
Pérdida de carga válvula+tuberías+bomba	1	kg/cm2
Presión de aspiración	2,5	kg/cm2
TDH bomba	573,69	mca
Potencia hidráulica bomba	728,50	kW
Rendimiento bomba	84,5%	%
Rendimiento variador de frecuencia	97%	%
Potencia eje lado bomba	888,79	kW

Tabla 9. Cálculos bomba de alta con variador de frecuencia.

Se puede apreciar un ahorro de energía con respecto a la potencia necesaria en el eje en el lado de la bomba, dicho ahorro es de un 3,51% con respecto al estado actual. Un factor que debe ser considerado es que los arrancadores suaves que tiene instalados la planta, todavía no están amortizados pues esta sólo lleva un año funcionando. En cuanto al régimen dinámico, en la planta no es necesario un variador de frecuencia pues la planta dispone de arrancadores suaves, por lo que tampoco es necesario para operar con seguridad. El ahorro de energía para un bastidor no compensa la instalación de un componente tan delicado como el variador de frecuencia. (Juan Sagarduy)

1.2.4 – Variador de frecuencia en bomba de alta y PX.

Como se ha comentado en el apartado anterior, hay que tener en cuenta que los equipos instalados actualmente no están amortizados, y además, añadir que la planta no funciona al máximo de su capacidad durante todo el año, por lo que la elevada inversión para realizar esta mejora no parece que sea viable a corto plazo. Aun así, se ha realizado el estudio energético para el largo plazo por si la planta es ampliada, poder operar dos bastidores con una turbobomba. En la figura a continuación se expone la propuesta realizada.

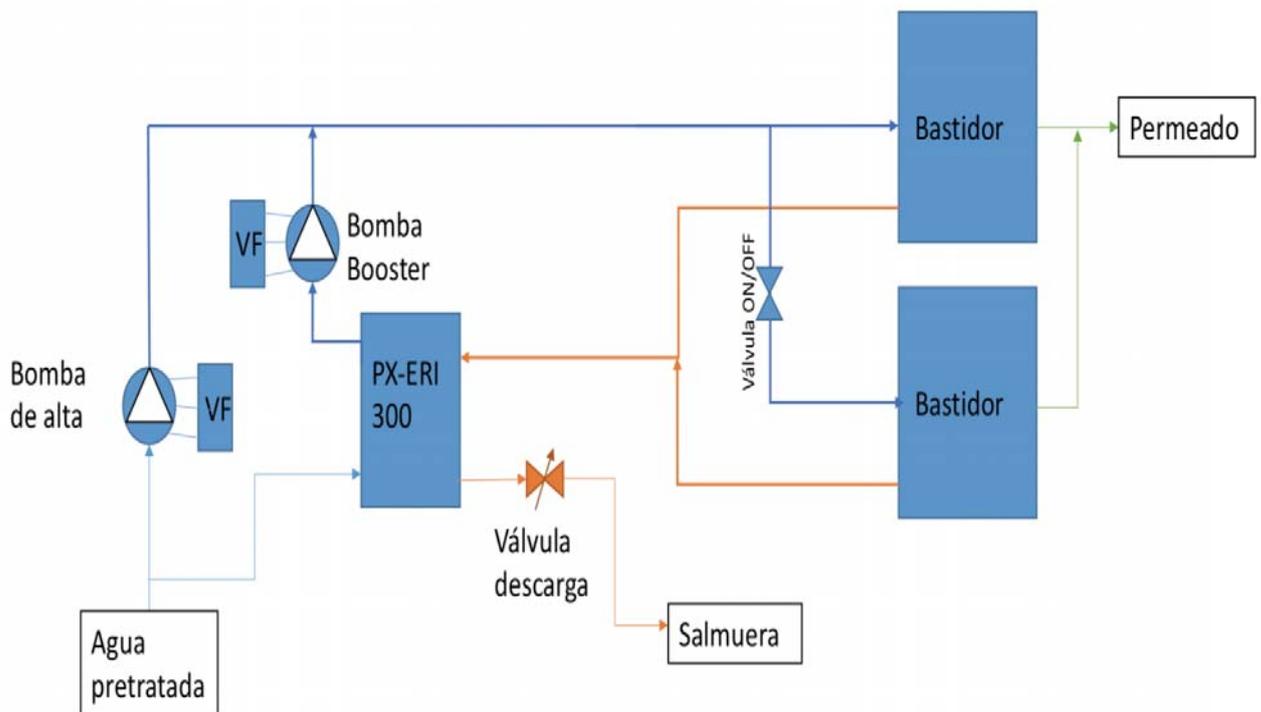


Ilustración 14. Esquema simplificado PX+VF en bomba de alta.

En la tabla a continuación se exponen los cálculos de la bomba de alta.

Bomba de alta presión		
Caudal	420	m3/h
Presión descarga bomba	61	kg/cm2
Pérdida carga tuberías+bomba	1	kg/cm2
Presión aspiración	2,5	kg/cm2
TDH bomba	573,69	mca
Potencia hidráulica bomba	656,59	kW
Rendimiento bomba	84,5%	%
Potencia lado eje bomba	777,03	kW
Rendimiento motor	97%	%
Rendimiento variador de frecuencia	97%	%
Potencia eléctrica motor	825,83	kW

Tabla 10. Cálculos bomba de alta para alimentar dos bastidores con PX.

Notar como el caudal se ha doblado con respecto al caso de sólo con PX, y que la presión de descarga de la bomba se ha reducido en 4 bares.

Primero de todo, es determinar el número de PX que serían necesarios, para ello se utilizarán las ecuaciones utilizadas en apartados anteriores. Se determina que serían necesarios 11 PX-300 para que la instalación pueda funcionar con total seguridad

A continuación, los cálculos para dimensionar la bomba booster en este supuesto.

Bomba booster		
Caudal	512	m3/h
Presión impulsión	60	kg/cm2
Pérdida carga bastidor + tuberías	1,5	kg/cm2
Pérdida carga PX lado alta	0,8	kg/cm2
Presión aspiración	57,7	kg/cm2
TDH bomba	22,56	mca
Potencia hidráulica bomba	31,47	kW
Rendimiento bomba	86%	%
Potencia eje lado bomba	36,59	kW
Rendimiento motor	97%	%
Rendimiento variador de frecuencia	97%	%
Potencia eléctrica motor	38,89	kW

Tabla 11. Cálculos bomba booster para dos bastidores.

Para asegurar el correcto funcionamiento de la instalación se elegiría una bomba de 45 kW así si hay alguna anomalía, la bomba no se estropearía. Se elegiría un variador de frecuencia también de 45 kW.

Por lo tanto, nos queda un consumo energético total de 864,72kW para operar dos bastidores. En la tabla 12 se muestra el consumo específico y el porcentaje de ahorro si los dos bastidores estuvieran operados por dos bombas distintas con una turbina Pelton.

Consumo específico	2,06	kWh/m3
Ahorro PX+VF/PELTON	28%	

Tabla 12. Consumo específico y porcentaje de ahorro.

El consumo específico es el más bajo que se ha conseguido, y el ahorro es un 2% mayor que en el caso del PX sin variador de frecuencia.

No se va a realizar el estudio económico de este supuesto pues sería necesario conocer cómo se realizó la inversión de la planta en un inicio para saber cómo se amortizó la instalación eléctrica necesaria para operar las bombas. Además, se tendría que aumentar la potencia contratada

de la instalación y realizar un complejo entramado de tuberías para poder operar bajo estas condiciones. Notar que es un estudio interesante pues en un medio-largo plazo es muy probable que se realice pues la demanda de agua desalada no hace sino más que aumentar en la isla de Ibiza y por lo tanto será necesario ampliar las plantas existentes.

2. Presupuesto

En este apartado se presentará el presupuesto y estudio sobre la viabilidad económica de la instalación de PX-ERI 300 en los tres bastidores. Se ha consultado a profesionales en el mundo de la desalación para poder conocer un precio aproximado de lo que podría costar la inversión. Las estimaciones económicas se hacen en base al ahorro energético, no en función de la venta del agua producto pues no se conocen ni el consumo total de la planta ni el uso de reactivos.

2.1 Instalación de PX-ERI 300

Para realizar los cálculos se han realizado una serie de hipótesis pues no se dispone de los datos reales, dichas hipótesis se explicarán a continuación. La amortización de la inversión se hará en 6 años.

En la actualidad, la planta produce con un bastidor en funcionamiento continuo los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre. Los meses de abril, mayo y octubre, la planta funciona con dos bastidores, y los meses de mayor afluencia turística, mayo, junio, julio, agosto y septiembre, la planta funciona a máxima capacidad. Además, viendo la tendencia, la demanda fuera de la temporada alta (meses con 3 bastidores en marcha), no hará más que aumentar pues sanidad está advirtiendo a hoteles y particulares dónde antes el agua de la red era de muy mala calidad que deben adherirse a la red municipal.

Viendo la tendencia, es probable que los dos primeros años la planta produzca con un solo bastidor los meses que no son de temporada, y los meses dónde hay dos bastidores en marcha, se pongan los 3 en marcha. Entre el tercer y el quinto año se pongan en marcha dos bastidores todo el año para abastecer a la población. Se han consultado expertos y sus previsiones son que, en cinco años, la demanda de agua desalada de la isla en meses fuera de temporada será de unos 60.000m³/día pues la red es cada vez más extensa y se pretende dejar de extraer agua de los pozos

o reducir considerablemente la explotación de estos. A continuación, se presenta una tabla que expone la producción mensual por cada año y su evolución

	Producción mensual (m3)					
	1	2	3	4	5	6
Enero	150.000	150.000	300.000	300.000	450.000	450.000
Febrero	150.000	150.000	300.000	300.000	450.000	450.000
Marzo	150.000	150.000	300.000	300.000	450.000	450.000
Abril	300.000	300.000	450.000	450.000	450.000	450.000
Mayo	300.000	300.000	450.000	450.000	450.000	450.000
Junio	450.000	450.000	450.000	450.000	450.000	450.000
Julio	450.000	450.000	450.000	450.000	450.000	450.000
Agosto	450.000	450.000	450.000	450.000	450.000	450.000
Septiembre	450.000	450.000	450.000	450.000	450.000	450.000
Octubre	300.000	300.000	450.000	450.000	450.000	450.000
Noviembre	150.000	150.000	300.000	300.000	450.000	450.000
Diciembre	150.000	150.000	300.000	300.000	450.000	450.000
Producción total anual (m3)	3.450.000	3.450.000	4.650.000	4.650.000	5.400.000	5.400.000

Tabla 13. Estimación de la producción mensual y total producción anual.

Con esta estimación de la producción, se puede estimar el ahorro energético que se tendrá anualmente, sabiendo el consumo específico actual y el calculado con PX, el ahorro energético será la diferencia entre estos.

$$\text{Ahorro energético} = 2,86 \frac{kWh}{m^3} - 2,13 \frac{kWh}{m^3} = 0,73 \frac{kWh}{m^3}$$

Por lo que se estima un ahorro energético anual en MWh considerable, según fuentes consultadas en la actualidad, el precio del MWh es de 120€/MWh, por lo que también se puede estimar el ahorro económico que esta inversión conlleva. En la tabla a continuación se exponen los resultados.

	1	2	3	4	5	6
Ahorro energético anual (MWh)	2.519	2.519	3.395	3.395	3.942	3.942
Ahorro económico anual	302.220,00 €	302.220,00 €	407.340,00 €	407.340,00 €	473.040,00 €	473.040,00 €

Tabla 14. Ahorro energético y económico anual.

Para el presupuesto, se conoce el precio de los componentes y se ha estimado el precio de la mano de obra y los materiales necesarios para realizar el entramado de tuberías necesario para los tres bastidores de la planta. La fuente consultada en este caso vuelve a ser las autoridades competentes de explotar las otras plantas de la isla dónde ya se ha realizado esta inversión. En la tabla a continuación se presenta una estimación del presupuesto necesario.

Coste inversión	Cantidad	Precio/U	Total
PX	15	20.000,00 €	300.000,00 €
Bomba booster 22kW	3	2.500,00 €	7.500,00 €
Variador de frecuencia 22kW	3	3.000,00 €	9.000,00 €
Mano de obra	-	150.000,00 €	450.000,00 €
Materiales	3	300.000,00 €	900.000,00 €
Total			1.666.500,00 €

Tabla 15. Presupuesto estimado de la inversión.

En cuanto a los gastos de explotación aumentan considerablemente con respecto a la instalación actual pues la turbina Pelton tiene un mantenimiento bastante sencillo y no es tan sensible a posibles perturbaciones como los PX. Hay que tener en cuenta que los fabricantes del PX-ERI 300 dan una garantía de dos años, dónde las reparaciones corren por su cuenta, por lo que durante los dos primeros años no habrá gastos de reparación, pero si en mantenimiento. Con la instalación de los PX, se instala una bomba y un variador de frecuencia por lo que se tiene que ver la garantía que dan los fabricantes de estos componentes.

Tanto el modelo de la bomba elegida, como el del variador de frecuencia escogidos, tienen una garantía de 18 meses, por lo que hasta la mitad del segundo año no se tendrán que pagar reparaciones durante dicho período de tiempo.

Suponer que, en caso de avería, el tiempo máximo de reparación es de 48 horas, suponiendo que la planta vende el agua a 1€/m³, la planta dejaría de facturar 30.000€ por el hecho de no producir. No se va a tener en cuenta la amortización de los componentes que se van a sustituir pues no se conoce ni el coste ni a cuántos años se amortizaron cuando se hizo la planificación de la planta.

A continuación, se presenta un balance aproximado de los gastos y ahorro de energía previsto para seis años tras la inversión.

Año	Ahorro	Costes explotación	BALANCE
0	- €	1.666.500,00 €	- 1.666.500,00 €
1	302.220,00 €	30.000,00 €	272.220,00 €
2	302.220,00 €	30.000,00 €	272.220,00 €
3	407.340,00 €	80.000,00 €	327.340,00 €
4	407.340,00 €	80.000,00 €	327.340,00 €
5	473.040,00 €	88.000,00 €	385.040,00 €
6	473.040,00 €	96.800,00 €	376.240,00 €

Tabla 16. Estimación de ahorro y costes de explotación asociados a la inversión.

Se calcula el TIR con el período de tiempo estimado y nos da un retorno del 4,54% por lo que se puede afirmar que es una inversión rentable medio plazo, y que a pesar de tener mayores costes de explotación y mantenimiento, el ahorro que esta inversión conlleva es lo suficientemente grande como para compensar la elevada inversión que se requiere.

3 – Estudio medioambiental

El impacto medioambiental asociado a esta modificación en la planta es básicamente el menor consumo de energía eléctrica y por tanto la menor emisión de CO₂ a la atmósfera, para esta aproximación, se utilizarán los datos de las emisiones durante el año 2019. Se elige el presente año pues la interconexión en las islas es una realidad desde el uno de diciembre del 2018.

Para ello, primero se estudiará el sistema eléctrico balear para tener una visión general del sistema eléctrico. Como se ha mencionado anteriormente, la interconexión entre la isla de Ibiza y la de Mallorca era tan urgente como necesaria pues antes de que esta conexión fuera una realidad, las islas de Ibiza y Formentera operaban como entes aislados de la red con su consecuente inestabilidad en la demanda. Además, la isla al carecer de producción mediante energías renovables, toda la demanda energética era proporcionada por motores diésel y turbinas de gas, con su consecuente elevado impacto medioambiental.

Se estima que las toneladas de CO₂ producido por MWh en Ibiza es de 0,40 tCO₂/MWh (Red Eléctrica España, 2018). A continuación, se calcula el consumo anual de energía en MWh para la configuración actual de la planta y para la propuesta.

Impacto medioambiental		
Producción anual	1.839.600,00	m3/año
Consumo específico con Pelton	2,86	kWh/m3
Consumo energético con Pelton	5.263,09	MWh/año
Emisiones en CO ₂ debido a las pelton	2.105,23	tCO ₂ /año
Consumo específico con PX	2,13	kWh/m3
Consumo energético con PX	3.918,88	MWh/año
Emisiones en CO ₂ debido al PX	1.567,55	tCO ₂ /año
Emisiones ahorradas debido a PX	537,68	tCO ₂ /año
Diferencia de emisiones en %	25,54%	%

Tabla 17. Estudio medioambiental.

Desde un punto de vista totalmente ecológico esta modificación en la planta es totalmente necesaria pues al año se están ahorrando 537,68 toneladas de CO₂. Para entender el impacto que tienen estas toneladas, se utiliza un parámetro llamado *social cost of carbon* que en Estados Unidos se estima que es de unos 220\$/tCO₂, esta variable mide el impacto en todos los sectores que se ven afectados por el aumento de las temperaturas y el efecto invernadero provocado por dicho gas. (Ricke, 2018). Por lo que se puede estimar que a efectos del *social cost* el dióxido de carbono no emitido a la atmósfera tiene un coste aproximado de 118.290€ anuales.

4 – Conclusiones

El estudio realizado a lo largo de este proyecto demuestra la viabilidad de la instalación de los PX-ERI en la planta desalinizadora de Santa Eulalia del Río. No solo se demuestra en el aspecto económico y técnico, sino que también queda patente que este proyecto está muy relacionado con una necesidad mundial, y es de reducir las emisiones de dióxido de carbono en pos de reducir el efecto invernadero que tanto preocupa a la sociedad hoy en día.

El proyecto no se va a poder realizar al menos en un lapso de dos años pues en la actualidad la planta se encuentra adjudicada a una UTE en régimen provisional de puesta en marcha para los próximos dos años, por lo que las empresas explotadoras no verían su inversión rentabilizada en caso de que no se les volviera a adjudicar la explotación de la planta. Además, la empresa responsable de realizar estas mejoras en la actualidad es ABAQUA, un ente público con sede en Mallorca que no cree que esta inversión sea prioritaria, pues afecta a la isla de Ibiza.

Desde un aspecto técnico, la isla de Ibiza es un claro ejemplo de políticas mal llevadas en cuanto a la gestión del agua, no solo por la sobreexplotación de los acuíferos lo cual ha provocado la situación de emergencia actual, además, no tiene sentido que la isla disponga de tres plantas desalinizadoras para la superficie que tiene, una solución más lógica sería ampliar las plantas ya existentes antes de la construcción de la desalinizadora de Santa Eulalia, pues la planta de Ibiza todavía puede ser ampliada al doble de su capacidad.

5 – Bibliografía

- ACUAMED, CCA. (s.f.). *Guía para la remineralización de aguas desaladas*.
- AETIB. (2018). *Concentració temporal de la demanda per les illes*.
- Allen-Bradley. (s.f.). *Cuándo utilizar un arrancador suave o un variador de frecuencia variable de CA*.
- Allen-Bradley. (s.f.). *Variadores de CA PowerFlex serie 750*.
- Aqualia Infraestructuras, Aqualia. (2012). *PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN Y EXPLOTACIÓN DE LA INSTALACIÓN DESALADORA DE SANTA EULALIA DEL RÍO*. Aqualia.
- Bernardí Gelabert Ferrer, A. B. (2015). *Análisis de la gestión del agua en la isla de Ibiza*.
- Cardona, J. R. (2017). *Consolidación de Ibiza como destino turístico (Finales del siglo XX)*.
- Conselleria de Medi Ambient, Agricultura i Pesca. (2016). *El Estado continúa siendo el propietario de la desaladora de Santa Eulària*.
- DUPONT. (2019). *FILMTECTM SW30HRLE–440i Element Product data sheet*.
- Energy Recovery Inc. (2009). *Mass Balance in a PX system*.
- Fluid Equipment Develop Company. (2009). *FEDCO HPB Pressure Booster and ERI Pressure Exchanger*.
- García, J. C. (2015). *Proceso de desalacion de agua de mar mediante un sistema de osmosis inversa de muy alta conversión en tres etapas con recirculacion de permado y doble sistema de recuperacion de energia*. Bilbao: ETSI Bilbao.
- INYPASA-ITGE. (s.f.). *Estudio hidrogeológico de Ibiza y Formentera*.
- Juan Sagarduy, J. K. (s.f.). *Dejar lo mejor para el final*. Revista ABB 4/10.
- Red Eléctrica España. (2018). *Declaración ambiental*.
- RETEMA. (2012). *Planta desalinizadora de Santa Eulalia del Río (Ibiza)*.
- Ricke, K. &. (2018). *Country-level social cost of carbon*. Nature Climate Change.

SUÁREZ, M. H. (s.f.). *GUÍA PARA LA REMINERALIZACIÓN DE LAS AGUAS DESALADAS*.

6 - ANEXOS

ANEXO A

ANEXO B