

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL**

## **MEMORIA**

# **ANÁLISIS ENERGÉTICO DE DESLADORA ABASTECIDA POR ENERGÍA EÓLICA**

**TRABAJO PRESENTADO PARA OPTAR AL APROBADO DE**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**POR**

**Juan Francisco Medina Casas**

**La Laguna, JULIO DE 2015**

**TRABAJO FIN DE ASIGNATURA**

Autor:

Juan Francisco Medina Casas

Director o Directores:

Vicente José Romero Ternero

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
1.1	Español .....	1
1.2	English .....	4
<b>2</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>ALCANCE .....</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>9</b>
5.1	Agua en Canarias. ....	9
5.2	Desalinización en Canarias. ....	10
5.3	Energía eólica en Canarias.....	12
5.4	Agua y energía.....	13
<b>6</b>	<b>NORMAS Y REFERENCIAS.....</b>	<b>15</b>
6.1	Normas.....	15
6.2	Bibliografía .....	15
6.3	Programas informáticos .....	15
6.3.1	Genéricos.....	15
6.3.2	Específicos.....	16
6.4	Otras referencias .....	16
<b>7</b>	<b>DEFINICIONES Y ABREVIATURAS .....</b>	<b>17</b>
7.1	Definiciones .....	17
7.2	Abreviaturas.....	18
<b>8</b>	<b>REQUISITOS DE DISEÑO .....</b>	<b>19</b>
8.1	Capacidad y emplazamiento.....	19
8.2	Datos de partida.....	25
8.2.1	Agua.....	25
<b>9</b>	<b>ANÁLISIS DE SOLUCIONES .....</b>	<b>28</b>
9.1	Sistema de desalación.....	28
9.1.1	Esquema general del sistema de desalación .....	28
9.1.2	Consideraciones generales .....	29
9.1.3	Propiedades de los flujos.....	30
9.1.4	Tuberías.....	31
9.1.5	Sistema de captación.....	32
9.1.6	Núcleo de desalación.....	36
9.1.7	Suministro .....	44

---

9.1.8	Resumen.....	46
9.2	Sistema eólico.....	48
9.2.1	Tipo de conexión.....	48
9.2.2	Situación del sistema eólico.....	48
9.2.3	Potencia eólica.....	50
<b>10</b>	<b>EVALUACIÓN ENERGÉTICA.....</b>	<b>52</b>
10.1	Sistema de desalación.....	52
10.2	Evaluación conjunta.....	53
<b>11</b>	<b>SOLUCIÓN ADOPTADA.....</b>	<b>54</b>
11.1	Emplazamiento y capacidad.....	54
11.2	Sistema de captación de agua marina.....	55
11.3	Núcleo de desalación.....	55
11.3.1	Módulo de membranas.....	55
11.3.2	Sistema de recuperación de energía.....	56
11.3.3	Bomba de alta presión.....	56
11.4	Sistema de distribución.....	56
11.5	Vertido de salmuera.....	57
11.6	Sistema eólico.....	57
<b>12</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>58</b>
12.1	Español.....	58
12.2	English.....	60

## Índice de figuras

Figura 1. Esquema general completo.....	3
Figura 2. Estimación de Potencia eólica en Canarias. PECAN 2007. ....	12
Figura 3. Parque eólico de Corralejo.....	14
Figura 4. Localización de Canarias. Google Map. ....	19
Figura 5. Mapa de cultivos de Lanzarote. GRAFCAN.....	21
Figura 6. Localización de desaladoras en Lanzarote. PHL.....	21
Figura 7. Mapa de vientos de Lanzarote. ITC. ....	22
Figura 8. Mapa de vientos en la zona norte de Lanzarote. ITC. ....	22
Figura 9. Zonas protegidas. GRAFCAN. ....	23
Figura 10. Zonas de conservación natural. GRAFCAN. ....	23
Figura 11. Clasificación de suelos. GRAFCAN. ....	24
Figura 12. Sector 1 Charco del palo. Gobierno de Canarias. ....	25
Figura 13. Mapa topográfico del Charco del Palo. GRAFCAN. ....	25
Figura 14. Esquema del sistema de desalación. Elaboración propia.....	28
Figura 15 . Distancia de tuberías.....	32
Figura 16. Captación por toma cerrada mediante pozo costero con bomba sumergida.....	33
Figura 17. Hoja de datos de las bombas de captación. KSB. ....	35
Figura 18. Resultados de membrana SWC4 MAX. IMSdesign.....	37
Figura 19. Ficha técnica de la membrana SWC4 MAX. Hydranautics.....	38

Figura 20. Parámetros de operación para el intercambiador de presión. Energy Recovery.....	40
Figura 21. Curvas características de la bomba booster. EBARA.....	41
Figura 22. Ficha técnica de la bomba de alta presión. Energy Recovery. ....	43
Figura 23. Hoja de datos de bomba de suministro. EBARA. ....	45
Figura 24. Esquema de instalación de desalación.....	47
Figura 25. Situación del parque eólico. WWW.mundivideo.com.....	49
Figura 26. Datos técnicos del aerogenerador G58. GAMESA .....	51
Figura 27. Sector 1 Charco del Palo. ....	54

## Índice de tablas

Tabla 1. Recursos hídricos de Canarias. Tecnoagua 2009. ....	9
Tabla 2. Consumo hídrico de Canarias. Tecnoagua 2009.....	10
Tabla 3. Capacidad de desalación por Com. Autónoma. Tecnoagua 2009.....	10
Tabla 4. Recursos y consumo de agua en Canarias. Tecnoagua 2006. ....	11
Tabla 5. Capacidad según tecnología. Tecnoagua 2006.....	11
Tabla 6. Recursos hídricos en Lanzarote. PHL.....	19
Tabla 7. Consumo hídricos en Lanzarote. PHL. ....	20
Tabla 8. Requerimientos del agua de consumo humano. Real Decreto 140/2003. 26	
Tabla 9. Composición química del agua del Océano Atlántico. FCCA .....	27
Tabla 10. Propiedades de los flujos. ....	30
Tabla 11. Resumen energético de sistema de desalación.....	52

# 1 RESUMEN

## 1.1 Español

Durante el presente documento se elabora un análisis energético de una planta de desalación que utiliza la tecnología de ósmosis inversa y es abastecida por energía eólica.

Inicialmente se busca una necesidad hídrica, la cual aparece en la isla de Lanzarote debido a la ausencia de recursos hídricos convencionales, por lo que se pretende ampliar el agua desalada con una planta de desalación de 2000 m<sup>3</sup>/día.

Dentro de la isla de Lanzarote se estudia el emplazamiento de la planta de desalación teniendo en cuenta factores como son:

- Posibles poblaciones a abastecer.
- Localización de otras plantas de desalación.
- Cercanía a la costa.
- Disponibilidad de recurso eólico.
- Industrialización.
- Accesibilidad.

Con los factores citados anteriormente se concluye con que la mejor zona para la implantación de la planta de desalación es la zona norte de la isla, en el municipio de Tegui, en concreto el Sector 1 del Charco del Palo. En la Figura 12 del apartado 8.1 Capacidad y emplazamiento se muestra el lugar concreto propuesto para la planta de desalación y el sistema eólico.

Una vez fijados la capacidad y el emplazamiento de la planta de desalación se pasa a su análisis energético, para ello se seleccionan los principales equipos de consumo eléctrico en las desaladoras mediante ósmosis inversa, que son las bombas de alimentación, bombas de suministro, bombas de alta presión y sistema de recuperación de energía. El factor determinante a la hora de la selección de equipos será el energético y el técnico, ya que los fabricantes no han aportado información económica respecto a los diferentes equipos.

Tras realizar unas consideraciones generales de funcionamiento para el sistema de estudio (mencionadas en el apartado 9.1.2 Consideraciones generales) se obtiene que la planta deberá tener una conversión del 45% para minimizar su consumo específico. A partir de esta conversión se determinan las dimensiones de las tuberías para la captación, suministro y para el rechazo de salmuera, datos necesarios para poder calcular las pérdidas de carga del fluido a través de las conducciones y dimensionar adecuadamente las bombas hidráulicas.

El sistema de captación seleccionado ha sido mediante pozos costeros, se realizará mediante 3 pozos que funcionarán a pares dejando siempre uno de reserva. Tras determinar el punto de operación de las bombas se realiza un estudio de bombas propuestas por diferentes fabricantes, donde se han elegido las bombas UPA 200B-80/13 de fabricante KSB.

El núcleo de desalación consta de la selección y dimensionado de membranas, que se realizará mediante el software específico del fabricante seleccionado (Hydranautics), elección y cálculo del sistema de recuperación de energía y elección de bomba de alta presión. Al realizar el análisis se obtiene que las membranas que más se adaptan a las necesidades sean las SWC4 MAX, dispuestas en 21 permeadores con 6 membranas en cada uno de ellos. El sistema de recuperación de energía será el más eficiente en la actualidad, los intercambiadores de presión, para ellos se recurre al fabricante Energy Recovery, obteniendo con su software específico la necesidad de 3 intercambiadores de presión modelo PX 220. Los sistemas de intercambiadores de presión requieren de una bomba auxiliar (bomba boosters), en este caso la bomba 100x80FS S2GC5 del fabricante EBARA. Terminando con el núcleo de desalación se selecciona la bomba de alta presión 3x4x7 de Energy Recovery, la cual representa el principal consumo energético de la planta de desalación. La elección de estas bombas se realiza de manera análoga a la bomba de captación.

El sistema de suministro de estudio se limita al transporte del agua producto de la planta de desalación a un depósito regulador. Se realiza con dos bombas en paralelo, de las que funcionará solo una, quedando otra como reserva. La bomba seleccionada son las 3D 65-125/7,5 del fabricante EBARA.

Elegidos los principales consumidores energéticos de la planta de desalación se realiza una evaluación energética haciendo balances energéticos entre los equipos seleccionados teniendo en cuenta su rendimiento, donde se obtiene una potencia de la planta de 270 kW, con un consumo específico de 3,23 kWh/m<sup>3</sup> y un consumo energético anual de 2,12 GWh. La distribución energética en función del proceso (captación, proceso de OI y suministro) se muestra en el apartado 10.1 Sistema de desalación.

Para hacer frente a la demanda energética de la planta de desalación se dispone de un sistema eólico. Este sistema estará interconectado a la red eléctrica, de manera que sea ésta quien compense los altibajos de la potencia producida por el aerogenerador. El parque eólico dispondrá de un único aerogenerador modelo G58 del fabricante GAMESA, el cual se estima que produzca una energía anual de 2,37 GWh, con una potencia promedio de 271 kW, dicha estimación se ha realizado mediante la herramienta de estimación de energía producida por un



aerogenerador del ITC, de WindPower y se ha comprobado con una hoja de cálculos de elaboración propia (ANEXO IV. ELECCIÓN DE EQUIPOS)

Con la energía producida por el aerogenerador se prevé un excedente energético, aun así es importante destacar que será necesario el apoyo de la red eléctrica ya que la potencia producida por el aerogenerador puede ser inferior a la potencia de la planta, debiendo recurrir a la red eléctrica, o superior, donde la diferencia de potencia con la consumida por la planta de desalación será vertido a la red. En el esquema de la Figura 1 se muestra la disposición de los equipos y la conexión entre el aerogenerador y la planta de desalación mostrando el sentido de la corriente frente al caso de déficit o exceso energético.

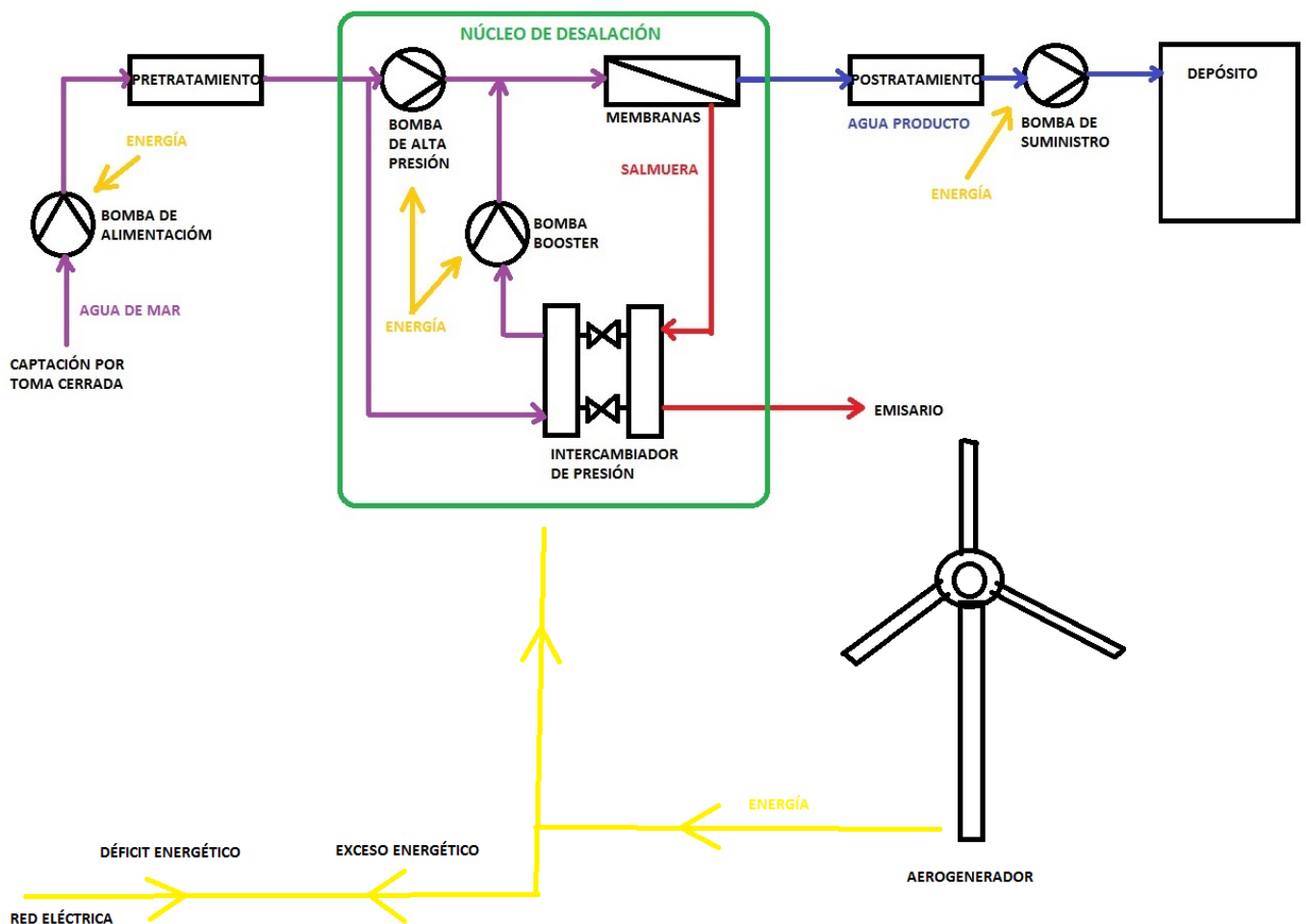


Figura 1. Esquema general completo

---

## 1.2 English

---

The present document proposes an energy analysis for a desalination plant, which employs reverse osmosis and wind power.

The source of water that needs to desalinate is located in the island of Lanzarote due to the absence of conventional hydraulic resources. This is why it is proposed to increase the amount of desalinated water with a desalination plant of around 2000 m<sup>3</sup>/day.

In the island of Lanzarote we study the placement of a desalination plant, taking in account factors such as:

- Populations to supply.
- Locations of other desalination plants
- Proximity to the shore
- Availability of wind power resources
- Industrialization
- Accessibility

With the factors pointed out above we can assume that the best zone to place this plant is in the northern part of the island, specifically in the town of Teguisse, in Sector 1 of "Charco del Palo". In figure 12 of part 8.1 titled "Capacity and placement" shows the specific proposed place to for the desalination plant and its wind-powered system.

Moving on, there is the need to analyze its Energy source. In order to do this, the correct equipment has to be chosen. The main electric consumption equipment used to create the inverse osmosis is a supply pump, a high pressure pump and an Energy Recovery system. The most important factors taken in account when choosing the correct equipment are Energy and technical due do the fact that the manufacturers haven't informed about any economic aspects of the equipment.

After some general considerations of the function of the system proposed (mentioned in 9.1.2 "General Considerations") it is determined that the plant should have a conversion of 45% to minimize its specific consumption. From this conversion, we can determine the dimensions of the pipelines for the storage, supply and the elimination of brine, and the necessary data to calculate the head losses throughout the conduction and properly place the hydraulic bombs.

The seawater intake system chosen is based on coastal Wells. These are three coastal Wells that will function in pair, leaving the other in case of an emergency. After choosing the operation point for the pumps, we analyze the qualities of

theses, proposed by different manufacturers. This has resulted in choosing the pumps UPA 200B-80/13 from the manufacturer KSB.

The desalination core is based on the selection and dimension of the membranes, through the specific software from the chosen manufacturer "HYDRANAUTICS", choosing and calculation of the recuperation system and choosing of the high pressure pump. Once realized this analysis, it is resolved that the most adequate membranes are the SWC4 MAX, divided in 21 permeates with 6 membranes in each one. The recuperation system is the most efficient one. For the changers of pressure we use the manufacturers Energy Recovery obtaining, with its software the necessity of 3 pressure exchangers PX 220. The systems of pressure require an auxiliary pump (booster pump) in this case we use the 100x80FS S2GC5 from the manufacturer EBARA- After this, we chose the high pressure pump 3x4x7 from the manufacturer Energy Recovery, which represents the main energetic consumptions of the desalination plant. The choosing of these pumps is done differently from the choosing of the catchment pumps.

The supply system of the study limits the transportation of water supply from the desalination plant to a deposit. This is done in parallel with two other bombs, which would only function one having the other one as back up. The selected pumps are the 3D 65-125/7,5 from the manufacturer EBARA.

Once chosen the main energetic consumers, we realize an evaluation of the Energy making energetic balances between the chosen equipment taking in account its performance where we obtain a potency of 270 kW, with a specific consumption of 3,23 kWh/m<sup>3</sup> and an annual consumption of 2.12 GWh. The energetic distribution according to the whole process is shown in the title 10.1 "Desalination system".

In order to satisfy the energetic demand of the desalination plant we use a wind powered system. This system will be interconnected to the electric red in order to compensate for the highs and lows of the potency produced by the windmills. The wind powered terrain will have one only model of windmill G58 from the manufacturer GAMESA, which it is estimated to produce an annual Energy of 2.37 GWh, with an average potency of 271 kW. This estimation has been made with the tool produced by an ITC windmill from "WindPower" and has been proven with an elaborated Excel sheet. (ANNEX IV. CHOOSING OF EQUIPMENT).

With the Energy produced by the windmill we can estimate an excess of Energy. Even with this estimation it is necessary to point out the support of an electric red, because the potency produced by the windimill could be inferior to the potency produced by the plant. The drawing of Figure 1 shows the placement of equipment and the connection between the windmill and the desalination plant, demonstrating the flow of the wind in case of an Energy deficit, or excess.

## 2 OBJETIVO

Con el presente trabajo se pretende demostrar y poner en práctica los conocimientos específicos adquiridos durante las enseñanzas en el ``Grado de Ingeniería Mecánica`` de forma sintetizada. El trabajo será autónomo e individual con la supervisión del tutor asignado.

Debido al amplio abanico de competencias que se adquiere en las Ingenierías Industriales, y al reducido tiempo y volumen del Trabajo de fin de grado, será imposible abarcar todos los bloques de conocimientos de la enseñanza, por lo que este proyecto se centrará mayormente en los ámbitos de conocimientos necesarios para abarcar los puntos citados en el alcance del documento. Además, se demostrará la capacidad de redacción y desarrollos de proyectos, teniendo en cuenta las normativas, reglamentos y especificaciones técnicas oportunas.

La correcta ejecución y entrega del presente documento es necesario para superar la asignatura ``Trabajo de fin de grado`` del Grado en Ingeniería Mecánica y culminar así los estudios.

A lo largo del documento se realizará el estudio de una planta de desalación de 2000 m<sup>3</sup>/día alimentada total o parcialmente por energía eólica y situada en la isla de Lanzarote, de la cual, se seleccionaran los principales elementos que la componen, así como el/los aerogeneradores de abastecimiento y se realizará un análisis energético.

### 3 JUSTIFICACIÓN

La justificación de éste proyecto reside en la necesidad hídrica del territorio insular. La finalidad es la de hacer un estudio energético de una propuesta planta de desalación por ósmosis inversa en la isla de Lanzarote, la que estará abastecida completa o parcialmente mediante energía eólica.

Las necesidades hídricas de Lanzarote se cubren prácticamente de manera íntegra de agua desalada, debido a que no existe aprovechamiento de aguas superficiales en funcionamiento y hay escases de agua subterráneas, además, las precipitaciones son escasas por a la poca altitud de la isla.

Con el objetivo de disminuir la dependencia de fuentes de energía basadas en combustibles fósiles, y por lo tanto, reducir emisiones de contaminantes al medio ambiente, se propone un suministro total o parcial de energía eólica para el proceso de desalación.

Se plantea la posibilidad de aumentar el agua destinada al regadío en 2000 m<sup>3</sup>/día ya que hay poca disponibilidad de agua a éste fin y así promover la agricultura insular, además la calidad del agua se ajustará al agua potable para poder hacer frente a posibles demandas de la población.

## 4 ALCANCE

A continuación se citan los ámbitos que formarán parte del proyecto:

- Justificación de capacidad y emplazamiento de la planta de desalación.
- Elección y dimensionado del sistema de captación de agua de mar.
- Elección y dimensionado de sistema de distribución de agua producto hasta un depósito regulador.
- Dimensionado del núcleo de desalación mediante ósmosis inversa:
  - o Elección y dimensionado de membranas y bastidores.
  - o Elección de bomba sistema de recuperación.
  - o Elección de bomba de alta presión.
- Análisis energético de la planta de desalación donde se calculará la potencia de la planta, su energía anual consumida y consumo específico.
- Elección y dimensionado del sistema de energía eólico.
- Análisis energético del sistema eólico seleccionado.
- Análisis energético conjunto de la planta de desalación y el sistema de suministro eólico.

Quedarán excluidos del alcance de este proyecto los ámbitos de:

- Obra civil de la planta de desalación, así como trazado de tuberías, pozos de captación y cimentación de aerogeneradores.
- Instalaciones eléctrica, de climatización, de saneamiento, contra incendios, de automatización... de la planta de desalación.
- Instalación de suministro energético de la planta de desalación interconectada con el sistema eólico.
- Análisis químico-biológico en la fase de pretratamiento del agua de captación.
- Dimensionado de conducciones y elementos de control como válvulas, caudalímetros, manómetros, variadores de frecuencia... dentro de la planta de desalación.
- Análisis químico-biológico en la fase de postratamiento del agua producto.
- Distribución hasta los puntos de consumo tras el depósito regulador.
- Instalaciones para el control de la salmuera.
- Elaboración del análisis de viabilidad de la planta de desalación.
- Elaboración del presupuesto de los equipos seleccionados.
- Elaboración del estudio de impacto medio ambiental.
- Elaboración del estudio de seguridad y salud.

## 5 ANTECEDENTES

### 5.1 Agua en Canarias.

La distribución de recursos hídricos en canarias es muy diferente en cada isla debido a los distintos factores geográficos, climáticos, geológicos, económicos y políticos. Sin embargo, no deja de ser un recurso necesario para el ser humano, y la característica común en la mayoría de las islas es la escasez de recursos naturales, principalmente en las islas orientales de Lanzarote y Fuerteventura.

La irregularidad de las precipitaciones, junto con el tipo de suelos permeables y las grandes pendientes, hacen que no se pueda disponer del agua de lluvia de forma permanente, gran parte de ésta acaba en el mar. Por los motivos anteriores, se disponen de pocos recursos de agua superficiales, quedando como principal recurso convencional el agua subterránea.

Debido a que la demanda de agua es superior al recurso hídrico convencional, éste debe ser suplementado con fuentes alternativas no convencionales como la desalación o la reutilización. En la Tabla 1, se muestran los recursos, donde aproximadamente un 30% proviene de fuentes no convencionales.

Recursos	hm <sup>3</sup>	%
Superficiales	18,9	4%
Subterráneos	344,6	67%
Desalación	121	24%
Reutilización	28,3	6%
Total	512,8	100%

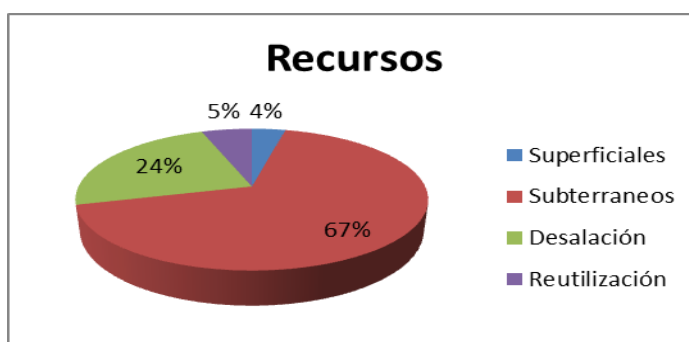


Tabla 1. Recursos hídricos de Canarias. Tecnoagua 2009.

En cuanto a la demanda de agua, pese a que el consumo para uso agrícola ha descendido en los últimos años, aún tiene gran relevancia, representando casi un 50% de la demanda total, como se puede ver en la Tabla 2, de donde el 60% del agua destinada al cultivo en Canarias es utilizada en la isla de Tenerife.

El recurso tradicional en las islas, las aguas subterráneas, se ve afectado, disminuyendo tanto su cantidad como su calidad, debido a la sobreexplotación de los acuíferos, a la infiltración de vertidos y contaminación natural asociada a las interacciones agua-roca y actividad volcánica residual, además existe intrusión de agua marina en los acuíferos situados cerca el litoral.

Por estos motivos y el progresivo aumento de la demanda se emplean recursos no convencionales, principalmente la desalación.

Consumo	hm <sup>3</sup>	%
Agrícola	231,8	47%
Urbano	174,3	35%
Turístico	54,4	11%
Industrial	14,6	3%
Recreativo	18,5	4%
Otros	2,5	1%
Total	496,1	100%

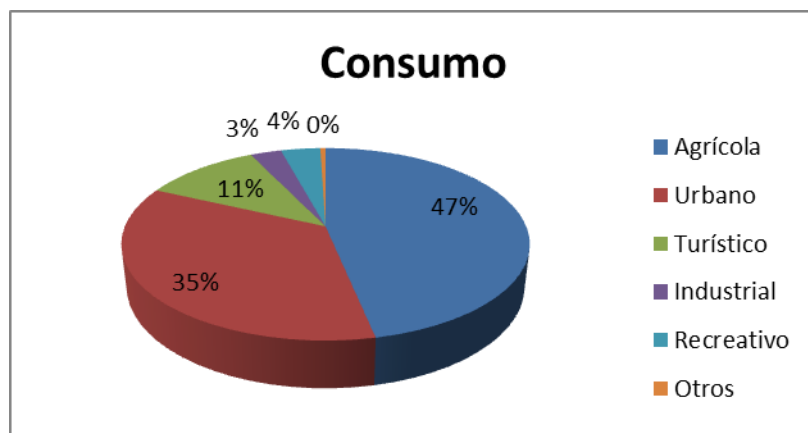


Tabla 2. Consumo hídrico de Canarias. Tecnoagua 2009.

## 5.2 Desalinización en Canarias.

A nivel europeo, Canarias ha sido pionera en desalinización de agua de mar. En 1964 se pone en marcha la primera desalinizadora en Lanzarote para abastecer tanto el consumo urbano como el agrícola, desde entonces hasta la actualidad este recurso ha ido adquiriendo relevancia en Canarias, encabezando la lista de capacidad de desalación de las Comunidades Autónomas de España, y teniendo un lugar relevante en Europa con una capacidad de 0,74 hm<sup>3</sup>/día.

En la Tabla 3 se aprecian las capacidades operativas de desalación de las Comunidades Autónomas españolas y su relevancia en el panorama nacional.

C. Autónoma	hm <sup>3</sup> /día	%
Canarias	0,737	31%
Andalucía	0,541	23%
Murcia	0,423	18%
Cataluña	0,38	16%
Valencia	0,187	8%
Resto	0,127	5%
Total	2,395	100%

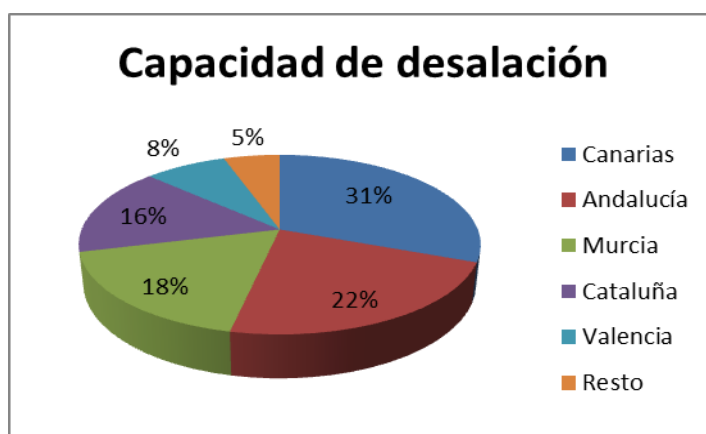


Tabla 3. Capacidad de desalación por Com. Autónoma. Tecnoagua 2009.



La cantidad de desaladoras, así como su capacidad, difiere mucho entre las distintas islas, donde en las islas orientales aumentan notablemente debido a la falta de recurso hídrico convencional. Como se muestra en la Tabla 4, las islas de la provincia de Las Palmas son las que más desaladoras tienen ya que tienen mayor dependencia de este recurso para abastecer la demanda.

C. Autónoma	Nº de desaladoras	hm <sup>3</sup> /año	% del consumo
Lanzarote	49	16,90	99%
Fuerteventura	66	11,90	86%
Gran Canarias	129	77,10	52%
Tenerife	46	18,00	9%
La Gomera	0	0,00	0%
El Hierro	2	0,50	19%
La Palma	1	0,10	0%

Tabla 4. Recursos y consumo de agua en Canarias. Tecnoagua 2006.

Las tecnologías utilizadas en Canarias para la desalación son variadas, sin embargo hay una clara preferencia por la ósmosis inversa debido a su menor consumo energético y menor complejidad de diseño, representando ésta un 84% de la capacidad total de desalinización en Canarias. En la Tabla 5 se ve cómo se reparten las capacidades de desalación en función de la tecnología utilizada.

Tecnología	m <sup>3</sup> /d	%
Ósmosis Inversa (OI)	489982	84%
Electrodialisis reversible (EDR)	42373	7%
Desalación multiefecto (ME)	39600	7%
Compresión de vapor (VC)	11730	2%
Total	583685	100%

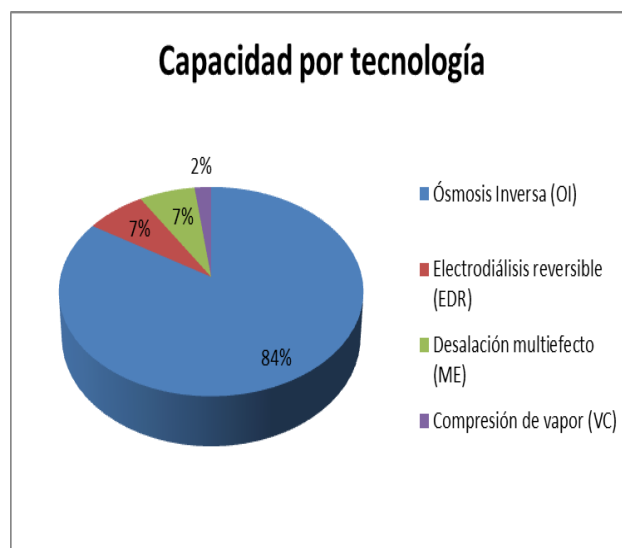


Tabla 5. Capacidad según tecnología. Tecnoagua 2006.

### 5.3 Energía eólica en Canarias.

La importancia de las energías renovables respecto al total de energía primaria consumida es muy inferior en Canarias que en el resto de España y la Unión Europea. Esto se debe principalmente a la gran dependencia de combustible fósil para el transporte.

En el año 2004 las energías renovables sólo aportaron un 0,62% del abastecimiento energético primario en Canarias. Durante estos años la importancia de este recurso ha ido creciendo, y se pretende llegar a un 8% de la demanda de energía primaria, y un 30% de la demanda eléctrica a final de este año 2015.

Pese a la gran importancia de las energías renovables en el panorama actual y para hacerle frente al futuro, ésta no deberá superar el 40% de demanda eléctrica instantánea debido a la imposibilidad de adaptar las fluctuaciones que ofrecen los recursos naturales como el viento o la energía solar con la demanda.

La fuente de energía renovable más importante en Canarias es la eólica, la cual está destinada íntegramente a la generación eléctrica. Su crecimiento se ve afectado por las reducidas dimensiones de la red eléctrica, el riesgo que supone para la estabilidad de la red y la necesidad de preservar el entorno con los planes de ordenación y medioambientales insulares.

En este año se pretende alcanzar una potencia instalada de 1025 MW, lo que corresponde a 7 veces la potencia instalada a final de 2004. En la Figura 2 se muestra la previsión de aumento de potencia eólica instalada que realiza el Plan Energético de Canarias 2007 (PECAN 2007).

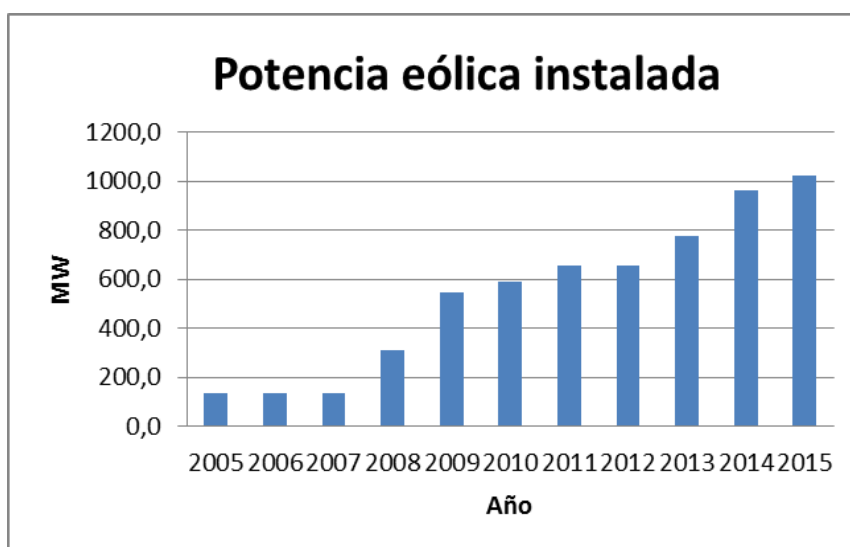


Figura 2. Estimación de Potencia eólica en Canarias. PECAN 2007.

Se prevé que la tendencia de la potencia eólica instalada sea a aumentar, donde las principales islas de explotación eólica son Tenerife y Gran Canarias representando un 80% de la potencia total instalada en el archipiélago.

El motivo por el cual la energía eólica es la energía más importante en Canarias es que las Islas Canarias tienen un gran potencial eólico debido a la influencia de los vientos alisios. La característica que hace tan beneficiosos estos vientos es su constancia tanto en velocidad como en dirección a lo largo del año. Sin embargo, las restricciones frente a esta fuente de energía vienen delimitadas principalmente por las restricciones territoriales, económicas y técnicas.

Desde el punto de vista económico, la inversión de la instalación eólica depende esencialmente de la potencia nominal de aerogenerador, la accesibilidad a la zona, la distancia a la conexión a la red, altura de los aerogeneradores, etc. Actualmente la inversión se podría estimar en 1000 € por kW eólico instalado y unos costes variables de 0,035 €/kWh producidos, aunque se espera que en los próximos años estos costes sufran una reducción de en torno al 15% según el PECAN 2007.

#### **5.4 Agua y energía.**

La obtención y gestión del agua en Canarias está íntimamente ligada a los recursos energéticos dado que los recursos de agua convencionales no son suficientes para cubrir la demanda, por este motivo se requiere energía para la captación, tratamiento y distribución de recursos hídricos no convencionales. Esto se ve reflejado claramente en la isla de Lanzarote, donde un 27% de la energía producida es destinada al abastecimiento de agua, y de esa energía, un 75% está destinado a desalar agua de mar.

Como se deduce, el agua, es uno de los principales consumidores de energía en Canaria y cada vez se le da más importancia en cuanto a ahorro energético siendo las últimas tendencias las de abastecer la gestión del agua mediante fuentes de energía renovables, especialmente la eólica.

Haciendo referencia a la desalación de agua de mar utilizando energía minieólica, actualmente hay en curso un proyecto del Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), el que se inicia a finales del 2009 y está previsto finalizarse a finales de 2015. En el proyecto SODAMEE (Sistema de desalación de agua de mar accionado por energía eólica) se pretende conseguir la puesta a punto y ensayo de un aerogenerador de 15 kW conectado de modo aislado a una planta de desalación de ósmosis inversa con una producción de 18 m<sup>3</sup>/día, optimizando la producción de agua con mínimo coste posible para abastecer lugares aislados y con poco soporte tecnológico.

Otro ejemplo más cercano al presente proyecto lo encontramos en el Parque Eólico de Corralejo en Fuerteventura. Este parque se muestra en la Figura 3, su funcionamiento comienza en 2010, donde con dos aerogeneradores de 850 kW se consigue un potencial eólico de 1,7 MW, destinados a abastecer una planta de desalación por ósmosis inversa de 4000 m<sup>3</sup>/día. Con la energía producida por los aerogeneradores se abastece un 80% de la planta de desalación, y cuando se alcanzan picos de producción eléctrica es abastecida por completo.

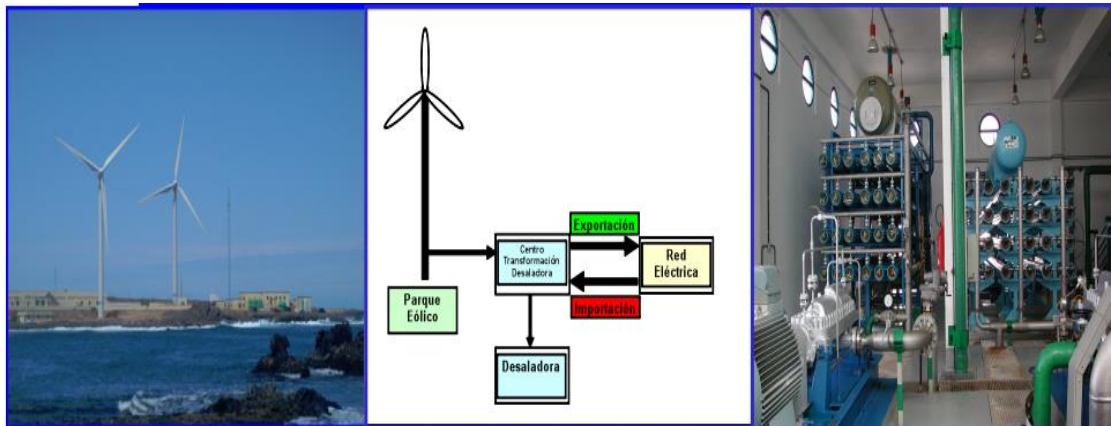


Figura 3. Parque eólico de Corralejo.

## 6 NORMAS Y REFERENCIAS

### 6.1 Normas

- Real Decreto 6/2015, de 30 de enero, por el que se aprueba el Reglamento que regula la instalación y explotación de los Parques Eólicos en Canarias.
- Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de calidad del agua de consumo humano.
- “Guía técnica de aplicación para instalaciones de energías renovables. Instalaciones eólicas”, Gobierno de Canarias.
- Ley de Espacios Naturales de Canarias.
- Plan Energético de Canarias 2007 (PECAN 2007). Gobierno de Canarias, Consejería de Industria, Comercio y Nuevas Tecnologías.
- Plan Insular de Ordenación de Lanzarote 2009 (PIOL 2009). Excmo. Cabildo Insular de Lanzarote.
- Plan Hidrológico de Lanzarote 2014 (PHL 2014). Consejo Insular de Aguas de Lanzarote.

### 6.2 Bibliografía

- Iglesias, Manuel Fariña. *ÓSMOSIS INVERSA*. Fundamentos, tecnología y aplicaciones. España: McGRAW- HILL, 1999.
- Medina San Juan, José Antonio. *Desalación de agua salobres y de mar*. Ósmosis inversa. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1999.
- Soriano, José Agüera. *Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas*. 5º edición. Madrid: Ciencia 3 S.L, 2002.

### 6.3 Programas informáticos

#### 6.3.1 Genéricos

- Microsoft Office Word 2010.
- Microsoft Office Excel 2010.
- Software Google Earth.
- AutoCAD 2010.
- Adobe Reader.
- Paint.

### 6.3.2 Específicos

- Software de dimensionado de membranas IMSdesign (Integrated membrane solutions) del fabricante Hydranautics Nitto Company.
- Software de dimensionado de intercambiadores de presión Power Model ERI v2 del fabricante Energy Recovery Inc.
- Aplicación online para la selección de bombas hidráulicas Aquabold Selector del fabricante Energy Recovery.
- Aplicación online para la selección de bombas hidráulicas KSB EasySelect del fabricante KSB.
- Aplicación online para la selección de bombas hidráulicas Pump Selector del fabricante EBARA.
- Aplicación online “Estimación de la Energía producida por un Aerogenerador” del Instituto Tecnológico de Canarias (ITC).
- Aplicación online “Programa de cálculo de la potencia de un aerogenerador” de la Asociación Danesa de la Industria Eólica (DWIA) (WindPower).
- Hoja de cálculo de elaboración propia para cálculos hidráulicos (Excel).
- Hoja de cálculo de elaboración propia para cálculos eólicos (Excel).

### 6.4 Otras referencias

- Fundación Centro Canario del Agua (FCCA): <http://www.fcca.es>
- Gobierno de Canarias: <http://www.gobcan.es>
- Instituto Español de Oceanografía (IEO): <http://www.ieo.es>
- Instituto Tecnológico de Canarias (ITC): <http://www.itccanarias.org>
- Mapas de Canarias: <http://www.grafcan.es>
- Proyecto Tecnoagua, colaboración ULL, ITC y Gobierno de Canarias.
- Mapas de Canarias (GrafCan): <http://www.grafcan.es>
- Apuntes de la asignatura “Instalaciones y Máquinas Hidráulicas” impartida en la ETSICI de la ULL en el curso 2013/2014.

## 7 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

### 7.1 Definiciones

En el actual apartado se definirán brevemente algunos de los términos que se consideran importantes entender y que por desconocimiento previo y/o falta de descripción en el desarrollo del proyecto puede dificultar la comprensión global del mismo.

- Agua producto: Agua objetivo como resultado del proceso de desalación, con menor concentración de sales que el agua de captación.
- Capacidad de la planta de desalación: Cantidad de agua producto producida por la planta de desalación expresada generalmente en  $m^3/día$ .
- Consumo específico: Energía necesaria en el proceso de desalación para obtener una unidad de agua producto, se expresa generalmente en  $kWh/m^3$ .
- Conversión: Porcentaje que representa el agua producto frente al agua de captación.
- Flux: Caudal de agua que atraviesa la unidad de superficie de las membranas, este valor estará limitado por las características técnicas de la membrana.
- Inestabilidad de recurso eólico: Referente a la variación del potencial eólico en función de la velocidad del viento.
- Límite de Betz: Límite teórico que limita el aprovechamiento del recurso eólico a un 60% de su potencia total.
- Mezcla volumétrica: Mezcla entre la salmuera y el agua de captación que aparece en los intercambiadores de presión.
- Permeadores: Tubos que deben soportar altas presiones donde se alojan las membranas, generalmente entre 6 o 7 según la configuración.
- Potencia nominal de un aerogenerador: Potencia que genera el aerogenerador cuando está funcionando en condiciones óptimas, con la velocidad de viento en el rango para el que ha sido diseñado.
- Potencial eólico: Potencia máxima que adquiere el viento en función de su velocidad.
- Punto de operación de una bomba hidráulica: Se define por el caudal que debe impulsar y la energía expresada en altura que le debe aportar al mismo.
- Rendimiento eléctrico: Potencia mecánica con respecto a la potencia eléctrica que consume dicho motor.
- Rendimiento hidráulico: Potencia hidráulica con respecto a la potencia mecánica del motor de la bomba.

- Salmuera o rechazo: Corriente de agua, a priori no aprovechable, obtenida del proceso de desalación con una alta concentración de sales.

## **7.2 Abreviaturas**

A continuación se indicarán los significados de las definiciones utilizadas en el documento.

- DWIA: Asociación danesa de la industria eólica.
- ERI: Energy Recovery Inc.
- ETSI: Escuela superior de ingeniería y tecnología.
- FCCA: Fundación centro Canario del Agua.
- IEO: Instituto español oceanográfico.
- ITC: Instituto tecnológico de Canarias.
- OI: Ósmosis inversa.
- PECAN: Plan energético de Canarias.
- PHL: Plan hidrológico de Lanzarote.
- PIOL: Plan insular de ordenación de Lanzarote.
- Ppm: Partes por millón.
- PRFV: Plástico reforzado con fibra de vidrio.
- SLL: Superficie libre de líquido.
- STD: Medida de salinidad del agua como sales totales disueltas.
- ULL: Universidad de La Laguna.
- UTM: Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator.



## 8 REQUISITOS DE DISEÑO

### 8.1 Capacidad y emplazamiento.

Se ha seleccionado Lanzarote como lugar de estudio debido a la gran dependencia de agua desalada en la isla. Al ser la isla canaria más oriental, es la que menos agua obtiene por medios naturales, especialmente, de las precipitaciones.

Canarias es un archipiélago del océano atlántico, situado al norte de África, cerca de las costas del sur de Marruecos y Sahara. Está conformada por siete islas: Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canarias, Tenerife, La Palma, La Gomera y El Hierro.



Figura 4. Localización de Canarias. Google Map.

Recursos	m <sup>3</sup> /día	%
Naturales	157	0,2%
Desalación	72200	99,8%
Total	72357	100,0%

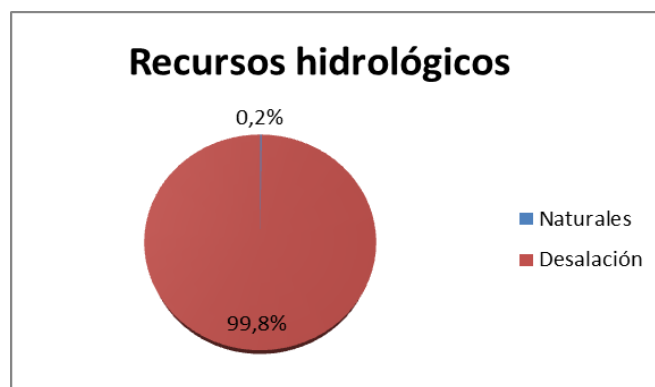


Tabla 6. Recursos hídricos en Lanzarote. PHL.

Como se aprecia en la Tabla 6, los recursos hidrológicos dependen principalmente de la desalación por la escasez de agua obtenida mediante recursos naturales según el PHL 2014.

En cuanto a la estimación del consumo para este año 2015, volviendo a recopilar información del Plan Hidrológico de Lanzarote, se prevén los consumos reflejados en la Tabla 7.

Consumo	hm <sup>3</sup> /año	%
Abastecimiento	10,76	38%
Agricultura	1,18	4%
Ganadería	0,08	0%
Industria	0,44	2%
Recreativo	7,09	25%
Turismo	8,79	31%
Total	28,34	100%

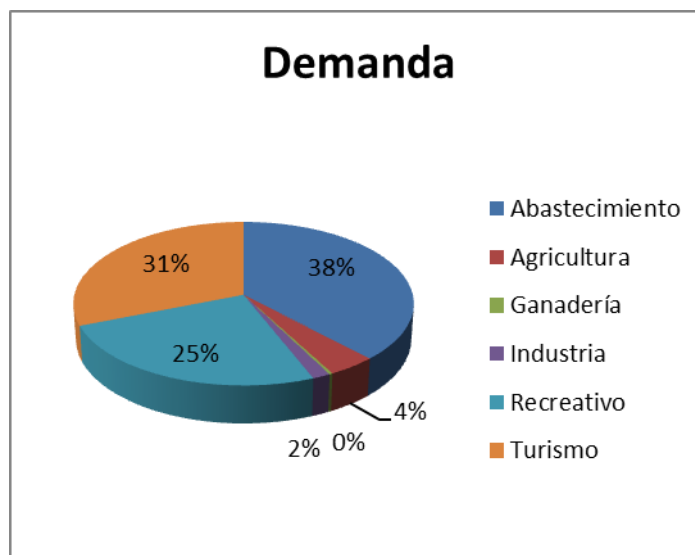


Tabla 7. Consumo hídricos en Lanzarote. PHL.

En base a estos datos, y teniendo en cuenta que Lanzarote es una isla con grandes superficies aptas para el cultivo pero sin aprovechar, como se muestra en la Figura 5, principalmente por falta del recurso hídrico, se plantea el estudio de la implantación de una planta de desalación de 2000 m<sup>3</sup>/día destinado principalmente al uso agrario, la cual estará abastecida total o parcialmente por energía eólica, aumentando el agua destinada a este fin de 1,18 a 1,91 hm<sup>3</sup>/año.

Para seleccionar la localización de la planta de desalación y de energía eólica se han tenido en cuenta varios criterios, entre ellos:

- Posibles poblaciones a abastecer.
- Localización de otras plantas de desalación.
- Cercanía a la costa.
- Disponibilidad de recurso eólico
- Industrialización.
- Accesibilidad.

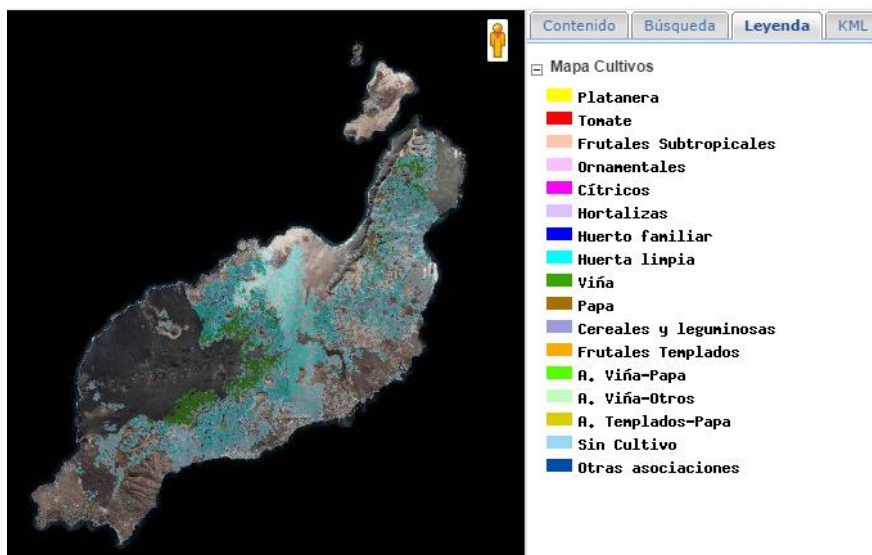


Figura 5. Mapa de cultivos de Lanzarote. GRAFCAN.

Atendiendo a la población a abastecer, la mayor área de cultivo en desuso está situada en la zona media y norte de la isla, donde el clima es menos seco, por lo tanto en principio se descarta la zona sur como localización.

En cuanto a la localización de las otras plantas de desalación, se buscará una zona que preferiblemente esté alejada de las ya existentes, de manera que los vertidos de salmuera de éstas no perturben la calidad del agua a desalar situándonos en zona de riesgo nulo debido a la influencia de los vertidos.

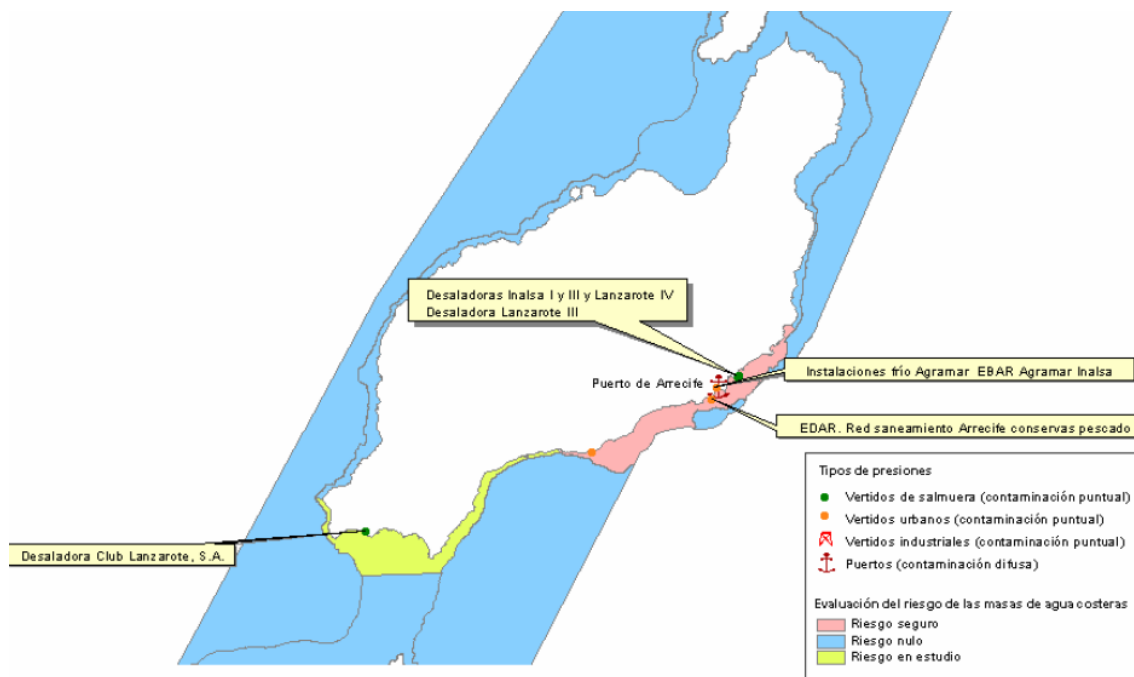


Figura 6. Localización de desaladoras en Lanzarote. PHL.

Como se muestra en la Figura 6, la zona sur ya consta con una central de desalación, y en la zona central de la isla están las principales centrales, quedando como zona no perturbada por la salmuera y vertidos urbanos la zona norte y toda su costa.

Pasando a la consideración de la velocidad del viento, se estudiará a una altura de 60 metros. Para ello se utiliza la herramienta disponible en el ITC que muestra el siguiente mapa de los vientos, Figura 7.

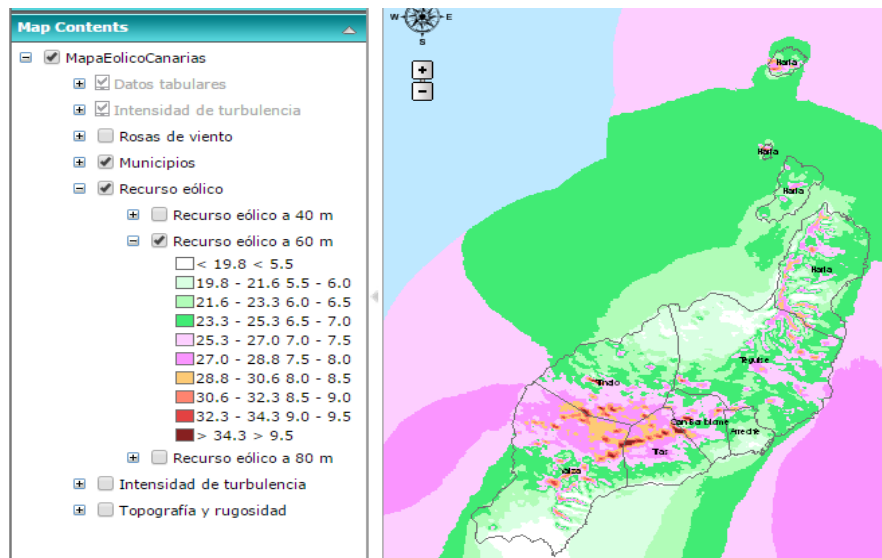


Figura 7. Mapa de vientos de Lanzarote. ITC.

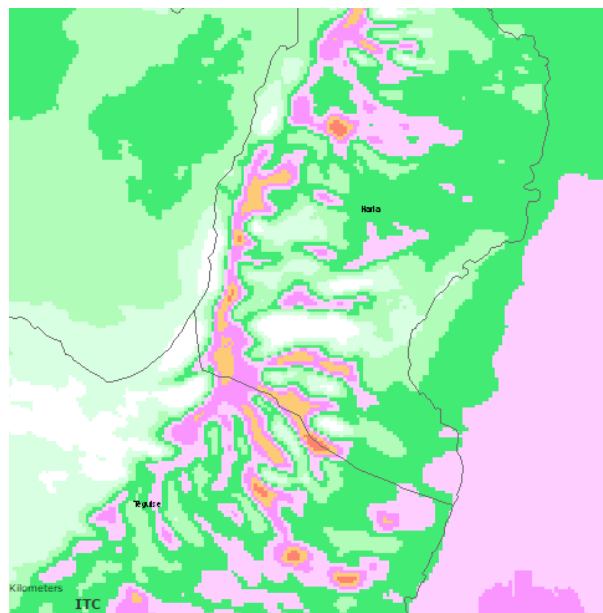


Figura 8. Mapa de vientos en la zona norte de Lanzarote. ITC.

Se buscan las zonas del norte de la isla con mayor velocidad media anual de viento, lo cual podemos ver con mayor claridad en la Figura 8, para optimizar el uso de la energía eólica y poder localizar los molinos cerca de la central de desalación.

Una vez decidido que la zona norte de la isla es la ideal para la localización de la planta de desalación y eólica, se procede a comprobar si hay suelos protegidos, y dentro de los que no lo sean, cuales son urbanizables y cuales industriales. Para ello se recurre a GRAFCAN, en las siguientes Figura 9 y 10 se pueden ver las zonas protegidas y de conservación respectivamente.

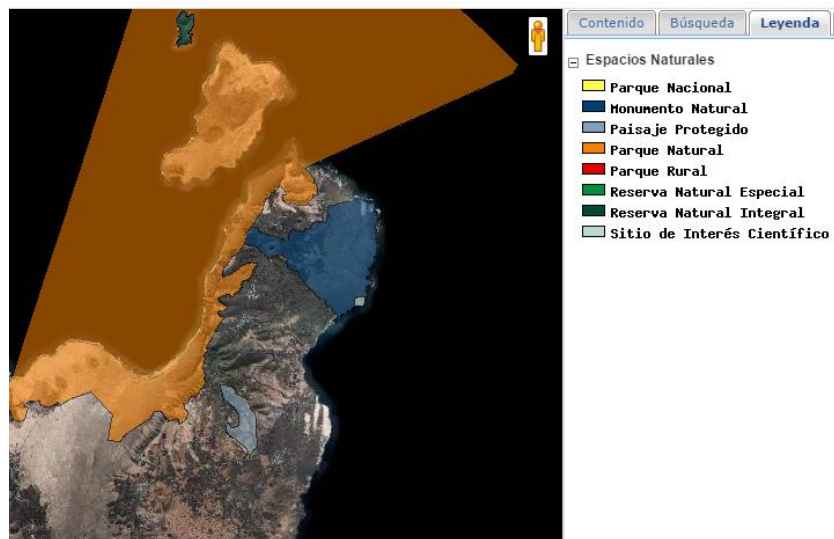


Figura 9. Zonas protegidas. GRAFCAN.

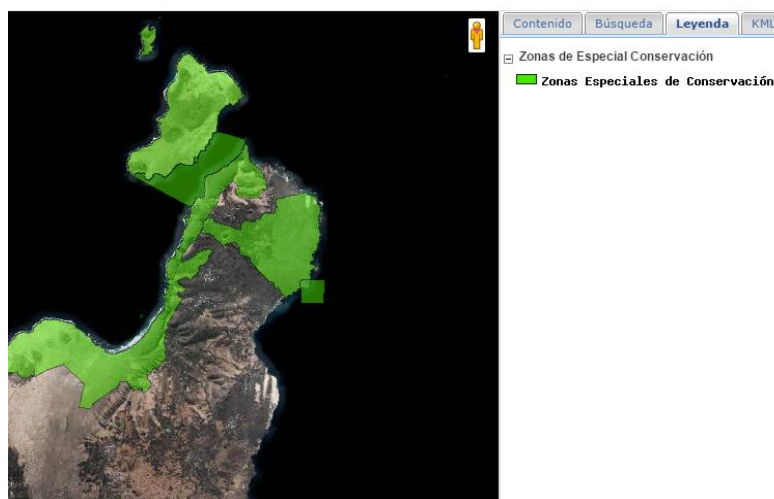


Figura 10. Zonas de conservación natural. GRAFCAN.

Vistas las zonas protegidas se pasa a estudiar la clasificación entre suelos urbanos, urbanizables y rurales haciendo uso de la misma fuente. En la Figura 11 se muestra dicha clasificación, el suelo urbano pertenece al municipio de Tegui se.



**Figura 11. Clasificación de suelos. GRAFCAN.**

Teniendo en cuenta todos los criterios anteriores, la zona idónea para localizar la planta sería por la zona Norte de Tegui se, cerca de la costa Este donde haya mayor incidencia de viento y haya terreno suficiente para la infraestructura necesaria para la planta de desalación y el parque eólico.

Un suelo que está situado en esa zona es el Sector 1 Charco del Palo, se muestra en la Figura 12. Dicha parcela es urbanizable y está cerca de la costa, donde la velocidad media del viento es de las mayores de la zona estudiada.

Consta de una superficie de aproximadamente 118000 m<sup>2</sup> y un coeficiente Edificable bruto de 0.25, además, no está dentro de un núcleo urbano ni zona protegida, su uso principal está registrado como residencial, por lo tanto la ejecución del presente proyecto quedaría a expensas de una recalificación del suelo o un permiso del ayuntamiento para aprovechar la parcela en un uso industrial, según el Catastro del Gobierno de Canarias.



Figura 12. Sector 1 Charco del palo. Gobierno de Canarias.

En la Figura 13 se ve el mapa topográfico del sector seleccionado, donde queda reflejada en color rojo la zona propuesta para la planta de desalación y para los molinos y un depósito regulador de agua. La altura del terreno para la planta de desalación se tomará a 18,5 metros y para el depósito se tomará a 32 metros.



Figura 13. Mapa topográfico del Charco del Palo. GRAFCAN.

## 8.2 Datos de partida

### 8.2.1 Agua.

A la hora de seleccionar el equipamiento y distribución de la planta de desalación, especialmente las membranas, deberemos tener en cuenta las propiedades del agua que se va a tratar, así como la calidad del agua producto, la cual estará determinada en función del uso al que esté destinada.

Las propiedades del agua a estudiar son a priori su salinidad y composición química, el rango de temperaturas que se tiene a lo largo del año y su pH. Las condiciones de calidad del agua producto se realizarán según el Real Decreto 140/2003 de 7 de febrero, este decreto establece los criterios de calidad del agua de consumo humano, que siguiendo las recomendaciones del Centro Canario del Agua (FCCA) para el agua de riego, es agua de alta calidad para el cultivo, y además, en caso de un aumento de la demanda de agua de la población, el agua podría ser destinada a dicho fin sin tener que realizar modificaciones en el proceso de desalación.

En este caso la desaladora se sitúa en Canarias, por lo que según el Plan Hidrológico de Lanzarote y los datos obtenidos de un estudio del Gobierno de Canarias, las temperaturas medias máximas y mínimas son respectivamente 26°C y 17°C, el pH del agua puede variar entre 8,1 y 8,6 según la época del año y la salinidad oscila entre 36 y 37 mil ppm. La composición química del agua de mar en términos generales se muestra en la Tabla 9.

Según el Real Decreto 140/2003 las sales disueltas no deben superar los 500 ppm, además de esto se deben tener en cuenta los índices de los elementos especificados en la Tabla 8, donde se expone que el principal elemento a controlar es el boro, permitiendo una máxima concentración de 1 ppm. El pH puede variar entre 6,5 y 9,5, por lo que se buscará un pH de agua producto de entre 6,8 y 7, el cual es aceptable para el cultivo.

Elemento	Ppm en agua	Ppm permitido	¿Control?
Boro	4,5	1	Si
Nitrógeno	0,42	50	No
Arsenico	0,0017	0,01	No
Niquel	0,0005	0,002	No
Cobre	0,00025	2	No
Cadmio	0,00008	0,005	No
Plomo	0,000002	0,01	No
Mercurio	0,000001	0,001	No

**Tabla 8. Requerimientos del agua de consumo humano. Real Decreto 140/2003.**



Elemento		Cantidad	Unidad	Ppm
Cloro	Cl	19,354	g/kg	19354
Sodio	Na	10,77	g/kg	10770
Magnesio	Mg	1,29	g/kg	1290
Sulfuro	F	0,904	g/kg	904
Calcio	Ca	0,412	g/kg	412
Potasio	K	0,399	g/kg	399
Bromo	Br	67	mg/kg	67
Carbono	C	27,6	mg/kg	27,6
Estroncio	Sr	7,9	mg/kg	7,9
Boro	B	4,5	mg/kg	4,5
Silicio	Si	2,8	mg/kg	2,8
Fluor	F	1,3	mg/kg	1,3
Nitrógeno	N	420	µg/kg	0,42
Litio	Li	174	µg/kg	0,174
Rubidio	Rb	120	µg/kg	0,12
Fosforo	P	70	µg/kg	0,07
Yodo	I	50	µg/kg	0,05
Bario	Ba	14	µg/kg	0,014
Uranio	U	3,3	µg/kg	0,0033
Arsenico	As	1,7	µg/kg	0,0017
Aluminio	Al	0,54	µg/kg	0,00054
Niquel	Ni	0,5	µg/kg	0,0005
Zinc	Zn	0,4	µg/kg	0,0004
Cesio	Cs	0,29	µg/kg	0,00029
Cobre	Cu	0,25	µg/kg	0,00025
Cadmio	Cd	80	ng/kg	0,00008
Hierro	Fe	55	ng/kg	0,000055
Manganeso	Mn	14	ng/kg	0,000014
Plomo	Pb	2	ng/kg	0,000002
Mercurio	Hg	1	ng/kg	0,000001

Tabla 9.Composición química del agua del Océano Atlántico. FCCA

## 9 ANÁLISIS DE SOLUCIONES

### 9.1 Sistema de desalación

#### 9.1.1 Esquema general del sistema de desalación

En el ANEXO I. ÓSMOSIS INVERSA se ofrece una base teórica sobre el funcionamiento de una planta de desalación mediante ósmosis inversa, será aconsejable leer en caso de no tener una base previa respecto a este tema antes de abordar este apartado.

A continuación se muestra la Figura 14, ésta representa el esquema del sistema de desalación planteado para este proyecto. Posteriormente se justificará la elección de cada elemento y distribución.

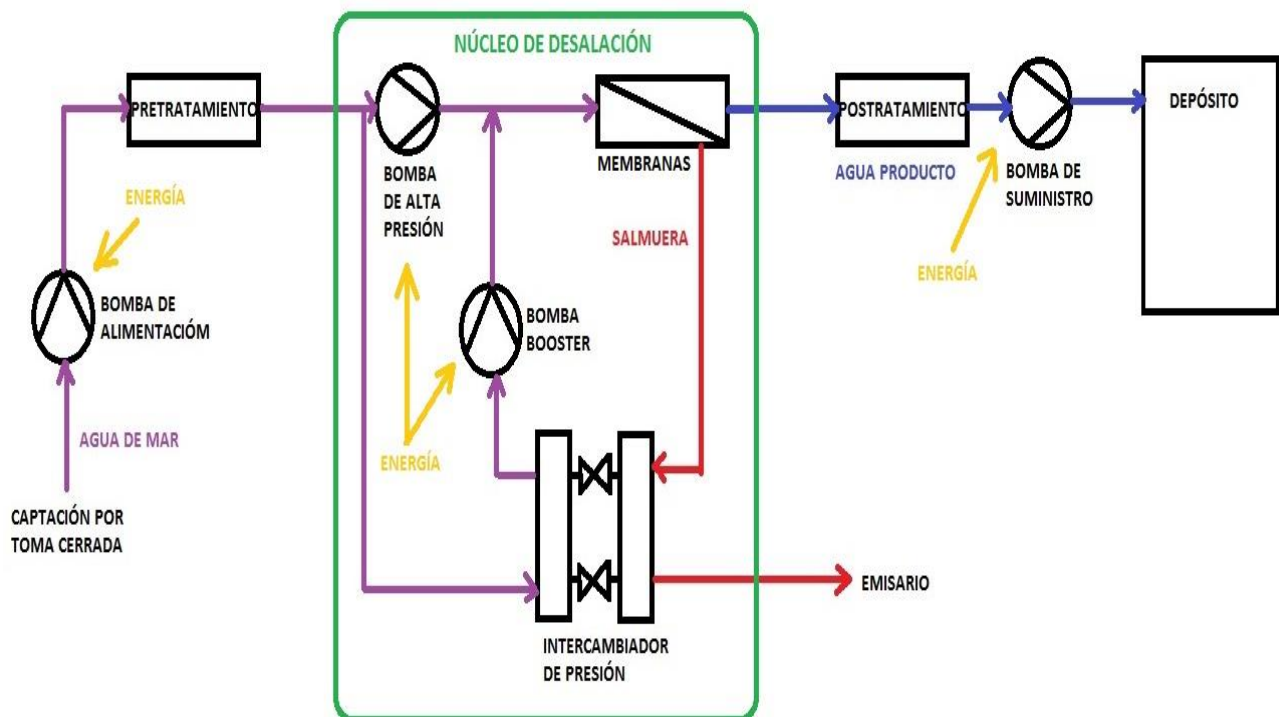


Figura 14. Esquema del sistema de desalación. Elaboración propia.

### 9.1.2 Consideraciones generales

- Estamos ante un caso de desalación por agua de mar, lo más común en este caso es disponer de una única etapa debido a los menores costes de inversión inicial y mantenimiento. La conversión será el 45% para optimizar la planta energéticamente (ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS), y los permeadores de 6 o 7 membranas de configuración espiral (José Antonio Medina San Juan).
- La altura de referencia se tomará al nivel del agua de mar, por lo que los elementos de estudio de la planta de desalación se supone a 18,5 m, y el depósito a 32 m.
- Se asumirá una caída de presión por los filtros en el pretratamiento de 1,5 bares (José Antonio Medina San Juan).
- El agua de mar entrará a la bomba de alta presión a 1 bar.
- La presión de salida del agua producto del núcleo de desalación será de 0,5 bar, quedando a una presión de 0,3 bar tras pasar el postratamiento (José Antonio Medina San Juan).
- Las propiedades físicas del agua a efectos de cálculos se mantendrán constantes tomadas a 20°C.
- Los balances de masas y energía oportunos se realizarán en régimen estacionario.
- La densidad del agua producto se tomará como densidad del agua pura debido a su baja concentración en sales, y la densidad de agua de mar, como densidad de agua de mar estándar de 1,025 kg/l.
- La energía cinética se considera nula en la superficie libre de líquido del depósito y del mar.
- Los coeficientes de fricción se hallarán mediante la ecuación de Haaland.

### 9.1.3 Propiedades de los flujos.

En el sistema de desalación se pueden diferenciar tres flujos de agua con distintas propiedades:

- Alimentación: Es el agua que entra a la desaladora desde el mar, tiene las propiedades del agua comentada anteriormente en el apartado 8.1.2 Agua, a efectos de cálculos iniciales se tomará una densidad de 1,025 kg/l y una concentración de sales de 37000 ppm.
- Agua producto: Es el agua que se obtiene de la desalación, a priori se supondrá como agua pura con una densidad de 0,997 kg/l y sin sales disueltas.
- Salmuera o rechazo: Con esta agua salen las sales que se separan del agua producto, por lo que su concentración de sales será proporcional a la conversión, y siempre mayor al agua de alimentación.

En el sistema se cumple el balance de masas, por lo que el caudal de alimentación deberá ser igual al caudal producto más el de rechazo (1). Además, también se cumple para la salinidad, donde las sales que se eliminan en el agua de alimentación al obtener el agua producto, pasan a aumentar la concentración de sales de rechazo (2).

La densidad del agua de rechazo se calculará por proporcionalidad teniendo en cuenta la densidad del agua pura y la del agua de mar en función de la salinidad. En la Tabla 10 se muestran los caudales, la salinidad, la densidad y peso específico.

Caudal	%	m <sup>3</sup> /día	m <sup>3</sup> /hora	m <sup>3</sup> /s	Concentración (ppm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Peso esp. (N/m <sup>3</sup> )
Q(Producto)	45%	2000,00	83,33	0,023	0	997	9781
Q(Rechazo)	55%	2444,44	101,85	0,028	67273	1048	10280
Q(Alimentación)	100%	4444,44	185,19	0,051	37000	1025	10055

Tabla 10. Propiedades de los flujos.

$$Q(\text{Producto}) + Q(\text{Rechazo}) = Q(\text{Alimentación}) \quad (1)$$

$$Q * C(\text{Producto}) + Q * C(\text{Rechazo}) = Q * C(\text{Alimentación}) \quad (2)$$

#### 9.1.4 Tuberías

Se dimensionarán las tuberías principales de la instalación, la de alimentación de agua de mar, la de suministro hacia el tanque de agua producto y la de vertido de salmuera. Las tuberías internas de la instalación no estarán en el ámbito de estudio de este trabajo debido a su escasa importancia en comparación a las mencionadas.

Debido al ambiente corrosivo y al agua salada que pasará por las conducciones se han elegido tuberías de PRFV (Poliéster reforzado con fibra de vidrio), además es el material recomendado por la AseTUB (Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos) la que nos direcciona a la distribuidora de tubos AMITECH. Las principales ventajas de este producto son:

- Material resistente a corrosión sin necesidad de tratamientos o revestimientos.
- Menor impacto por sobrepresión que en tuberías de acero o fundición.
- Bajo coste de mantenimiento.
- Larga vida útil.
- La rugosidad permanece constante al no sufrir corrosión con un valor de 0,029mm.
- Material con gran experiencia en el ámbito industrial.
- Facilidad a la hora de conseguir repuestos o accesorios para la instalación.

En la próxima Figura 15 se muestran las longitudes al pozo de captación y la planta de desalación y entre la planta de desalación y el depósito.

Debido a irregularidades del terreno las tuberías no tendrán exactamente estas longitudes, serán mayores y las de captación estarán condicionadas al estudio geotécnico del suelo por lo que se dimensionará con más margen que el resto. Las tuberías de alimentación de las bombas de captación tendrán una longitud de la profundidad del pozo, unos 40 metros, y un margen de 10 metros superficiales para unir las tomas. La tubería de rechazo no se muestra en la Figura 15, ésta tendrá una longitud de 300 m para que al menos 100m estén en el agua y poder hacer un vertido progresivo de la salmuera. Por lo tanto las longitudes de las tuberías serán las siguientes:

- Tubería de alimentación individual: 50 m.
- Tubería de alimentación total: 200 m.
- Tubería de agua producto: 180 m.
- Tubería de rechazo: 300 m.



Figura 15 . Distancia de tuberías

Los diámetros de las tuberías de referencia se han obtenido mediante el criterio de Bonnet, se pueden ver los detalles de su cálculo en el ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS, y luego se han buscado los diámetros de tuberías similares que ofrecen el distribuidor elegido, AMITECH.

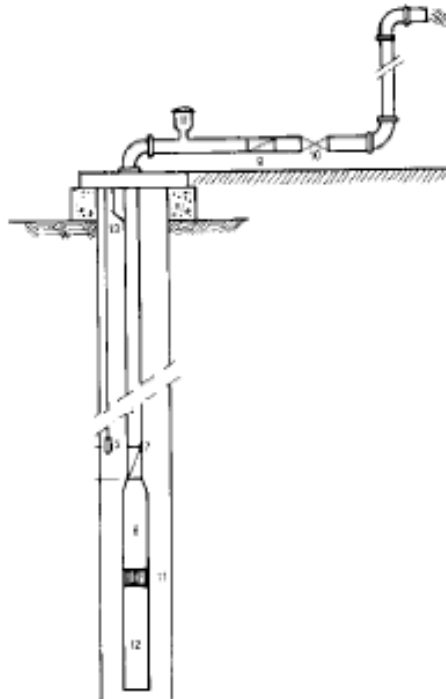
- Diámetro de alimentación individual: 200 mm.
- Diámetro de alimentación total: 250 mm.
- Diámetro de producto: 200 mm.
- Diámetro de rechazo: 200 mm.

### 9.1.5 Sistema de captación

El sistema de captación elegido para el estudio de la planta de desalación es por toma cerrada mediante pozo costero debido a que es la más favorable por la escasez de actividad biológica del agua, su limpieza y su baja contaminación, lo que evitará problemas de ensuciamiento e incrustamiento en los elementos de la planta.

Este sistema permite abaratar el pretratamiento del agua, sin embargo, existen condicionantes para el uso de este sistema, especialmente la permeabilidad del suelo.

El suelo de Lanzarote está compuesto por zonas permeables e impermeables conectadas entre sí, por lo que se requerirá un estudio geotécnico para poder llevar a cabo el presente proyecto, en cuanto a la profundidad del pozo de captación se estimarán 40 metros (José Miguel Veza)



**Figura 16. Captación por toma cerrada mediante pozo costero con bomba sumergida..**

Para estos sistemas se deben hacer varios pozos de captación separados entre sí, para repartir el caudal necesario por la planta y con el objetivo de evitar problemas debido a fallos de alguna de las bombas de captación o dificultades de permeados del agua de mar.

En este caso se recurrirá a tres pozos de captación con una bomba vertical sumergida por pozo conectadas en paralelo, ya que la capacidad de la planta es relativamente pequeña. Las salidas de las bombas serán individuales hasta el nivel del suelo, donde irán conectadas mediante un colector y llegarán a la etapa de pretratamiento en una única tubería. Las bombas funcionarán en parejas, quedando una de reserva para el caso de averías o mantenimiento y para alternancia de mantenimiento de manera que todas las bombas tengan las mismas horas de uso.

### 9.1.5.1 Bomba de captación

Las bombas de captación serán bombas sumergidas, este tipo de bombas no requieren cebado y evitan la cavitación, efecto que podría producir daños en los elementos mecánicos de la instalación.

Se buscará una bomba que ofrezca un alto rendimiento en el punto de operación que requiere la instalación, el que ha sido calculado en el ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS, dando como resultado un caudal de 26 l/s y una altura de 50,7 m.

Se han comparado las opciones recomendadas por los fabricantes KSB, INGLETEAM y EBARA en el ANEXO IV. ELECCIÓN DE EQUIPOS, de las cuales la bomba UPA 200B-80/13 del fabricante KSB, se ha considerado la mejor opción por el alto rendimiento hidráulico y el servicio técnico de la fábrica en España. El rendimiento que ofrece esta bomba es del 79,5% y el motor eléctrico que trae acoplado la bomba es de 19 kW.

En la Figura 17 se muestra la hoja de datos de la bomba proporcionada por el fabricante, se pueden ver sus principales características técnicas y su curva característica.



**Hoja de datos compacta**

*La configuración es ilógica; posiblemente la grabación es incorrecta*



Nº de posición del cliente:

Pedido fechado:

Doc. no.:

Cantidad: 1

Número: ES 3473182

Nº de artículo: 100

Desde: 27/02/2015

Página: 1 / 1

UPA 200B- 80/3a UMA 150E 22/21

Versión nº.: 1

Bomba sumergible

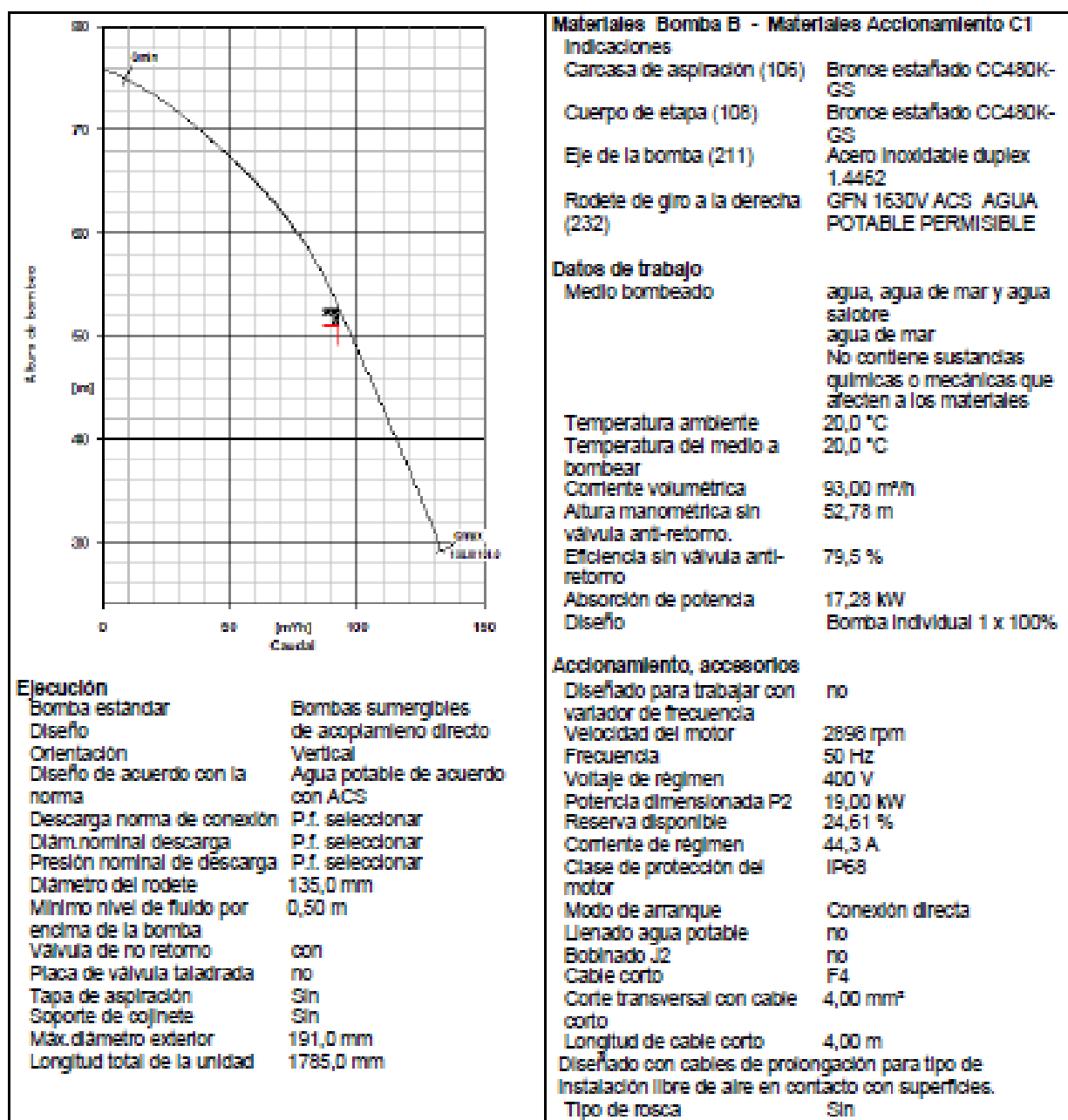


Figura 17. Hoja de datos de las bombas de captación. KSB.

### **9.1.6 Núcleo de desalación**

Los principales elementos del núcleo de desalación son las membranas con sus respectivos bastidores, la bomba de alta presión y el sistema de recuperación de energía elegido.

La configuración del núcleo será de una única etapa debido al menor coste de inversión inicial, menor necesidad de espacio y menor salinidad de agua de rechazo, lo que hace que el vertido de la salmuera al mar sea menos dañino para el medio.

#### **9.1.6.1 Membranas y configuración de bastidores.**

Las membranas con mayores rendimientos y más utilizadas en desalación de agua de mar son las membranas con configuración en espiral. Para la planta de desalación se buscará un modelo de membranas que ofrezca la calidad de agua producto requerido, atendiendo a los niveles de boro y SDT. Además del cumplimiento de la calidad del agua producto, se ha buscado el menor consumo específico de la planta, buscando las membranas que, tras haber cumplido con los requisitos de calidad, ofrezcan menores presiones de operación y menor pérdida de presión en el rechazo. Finalmente se tendrá en cuenta el número de bastidores y membranas necesario.

Tras haber hecho el estudio de diferentes modelos de membranas del fabricante Hydranautics, mostrado con detalles en el ANEXO IV. ELECCIÓN DE EQUIPOS, el modelo seleccionado para la planta ha sido el SWC4 MAX, ficha técnica mostrada en la figura 19. Este modelo de membranas ofrece un alto rechazo de sales y boro en comparación con otras series destinada a la desalación de agua de mar (series SWC), como se comentaba, tiene configuración en espiral y resiste una presión de aproximadamente 83 bares, temperaturas de hasta 45°C y el rango de pH para optimizar el funcionamiento de esta membrana está entre 6,5 y 7.

En la Figura 18 se muestran los resultados obtenidos para unas condiciones de operación de:

- Temperatura del agua 24°C.
- pH 7.
- Edad de la membrana: 3 años.
- Agua de alimentación con las propiedades descritas en el apartado 8.2.1 Agua.

Resultados Cálculo												
		Presión	bar		Caudal/tubo		m3/hr	Vm2-hr				
Arreglo	Tubos	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta					
1-1	21	64.1	62.9	8.8	4.9	16.2	1.02					
1-2	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00					
1-3	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00					
1-4	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00					
Concentración Perm. (ppm)												
Ca	0.43	K	2.49	Sr	0.01	Cl	80.66	NO3	0.00	CO2	8.30	
Mg	1.34	NH4	0.00	CO3	0.00	SO4	3.05	B	0.69	pH	5.4	
Na	59.81	Ba	0.00	HCO3	1.22	F	7.52	SiO2	0.00			
										SDT total	157.2	ppm

**Figura 18. Resultados de membrana SWC4 MAX. IMSdesign.**

Como vemos el índice de boro es de 0,69 ppm, muy inferior al límite fijado por la normativa de 1 ppm, igual pasa con el SDT, donde se obtiene una concentración de 157,2 y el límite se fija en 500 ppm.

La configuración recomendada por el fabricante para este modelo de membrana, capacidad de planta y recuperación, es de 21 permeadores con 6 membranas en cada uno de ellos.

# Nitto

# HYDRANAUTICS

Nitto Group Company

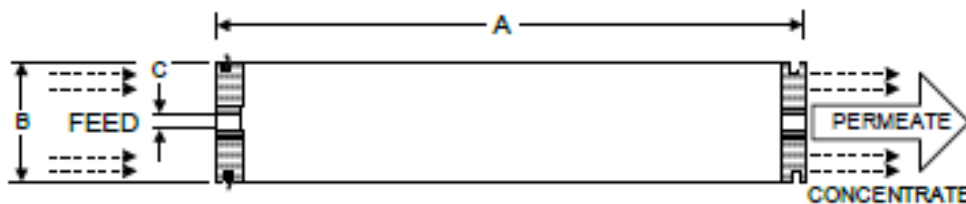
Membrane Element		SWC4 MAX
<b>Performance:</b>	Permeate Flow:	7,200 gpd (27.3 m <sup>3</sup> /d)
	Salt Rejection:	99.8 % (99.7 % minimum)
	Boron Rejection (Typical):	93.0% <sup>†</sup>
<b>Type</b>	Configuration:	Spiral Wound
	Membrane Polymer:	Composite Polyamide
	Membrane Active Area:	440 ft <sup>2</sup> (40.8m <sup>2</sup> )
<b>Application Data*</b>	Maximum Applied Pressure:	1200 psig (8.27 MPa)
	Maximum Chlorine Concentration:	< 0.1 PPM
	Maximum Operating Temperature:	113 °F (45 °C)
	pH Range, Continuous (Cleaning):	2-11 (1-13) <sup>*</sup>
	Maximum Feedwater Turbidity:	1.0 NTU
	Maximum Feedwater SDI (15 mins):	5.0
	Maximum Feed Flow:	75 GPM (17.0 m <sup>3</sup> /h)
	Minimum Ratio of Concentrate to Permeate Flow for any Element:	5:1
Maximum Pressure Drop for Each Element:	10 psi	

\* The limitations shown here are for general use. For specific projects, operating at more conservative values may ensure the best performance and longest life of the membrane. See Hydranautics Technical Bulletins for more detail on operation limits, cleaning pH, and cleaning temperatures.

### Test Conditions

The stated performance is initial (data taken after 30 minutes of operation), based on the following conditions:

32,000 ppm NaCl  
 800 psi (5.5 MPa) Applied Pressure  
 77 °F (25 °C) Operating Temperature  
 10% Permeate Recovery  
 6.5 - 7.0 pH Range



A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)	Weight, lbs. (kg)
40.0 (1016)	7.80 (200)	1.125 (28.8)	38 (16.4)

Notice: Permeate flow for individual elements may vary + or - 15 percent. Membrane active area may vary +/-4%. Element weight may vary. All membrane elements are supplied with a brine seal, interconnector, and o-rings. Elements are enclosed in a sealed polyethylene bag containing less than 1.0% sodium meta-bisulfite solution, and then packaged in a cardboard box.

<sup>†</sup>When tested at standard test conditions with 5.0ppm Boron in feed solution.

Hydranautics believes the information and data contained herein to be accurate and useful. The information and data are offered in good faith, but without guarantee, as conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydranautics assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydranautics' products for the user's specific end use. 10/07/13

Hydranautics Corporate: 401 Jones Road, Oceanside, CA 92058  
 1-800-CPA-PURE Phone: 760-901-2500 Fax: 760-901-2578 info@Hydranautics.com

Figura 19. Ficha técnica de la membrana SWC4 MAX. Hydranautics.

### 9.1.6.2 Sistema de recuperación de energía

El sistema de recuperación de energía utilizado en la gran mayoría de las nuevas plantas de desalación son los intercambiadores de presión. Esto se debe a que son el sistema de recuperación que mayor rendimiento suele ofrecer, rondando el 95% frente al 85% que suelen dar los sistemas más utilizados en plantas antiguas, las turbinas Pelton.

Como se muestra en el ANEXO I. ÓSMOSIS INVERSA, este sistema de recuperación de energía requiere de dos elementos, el intercambiador de presión propiamente dicho, encargado de que la presión del rechazo se transfiera al agua de alimentación, y una bomba hidráulica denominada booster, cuya finalidad es la de elevar la presión del agua de alimentación, que sale del intercambiador a una presión ligeramente inferior a la de rechazo, hasta la presión de operación de la membrana.

## Intercambiador

El fabricante Energy Recovery es pionero en la fabricación de intercambiadores de presión, asegurando rendimientos en sus equipos que pueden llegar al 98%, además proporciona aplicaciones informáticas diseñadas para el cálculo y dimensionado de los sistemas de intercambiadores de presión pudiendo comparar los diferentes modelos de su catálogo.

El modelo de intercambiador de presión que más se adapta a las necesidades de la planta del catálogo de Energy Recovery es el PX 220, con el que en un estudio preliminar se obtiene un rendimiento que ronda el 97,5% y serían necesarios 3 dispositivos. El estudio de los distintos modelos ha sido realizado en el ANEXO IV. ELECCIÓN DE EQUIPOS, donde se muestra que el PX 220 ofrece uno de los mayores rendimientos, aunque por lo general, cualquier modelo de intercambiador de presión ofrecería rendimientos aceptables.

En la Figura 20 se muestran las condiciones del estudio preliminar, dichas condiciones se han tomado para el caso más desfavorable en cuanto a presión de operación y tomando unos parámetros de operación del intercambiador de presión estándares propuestos por el software de Hydranautics, los que han sido descritos en el ANEXO VI. SOFTWARE ESPECÍFICO.

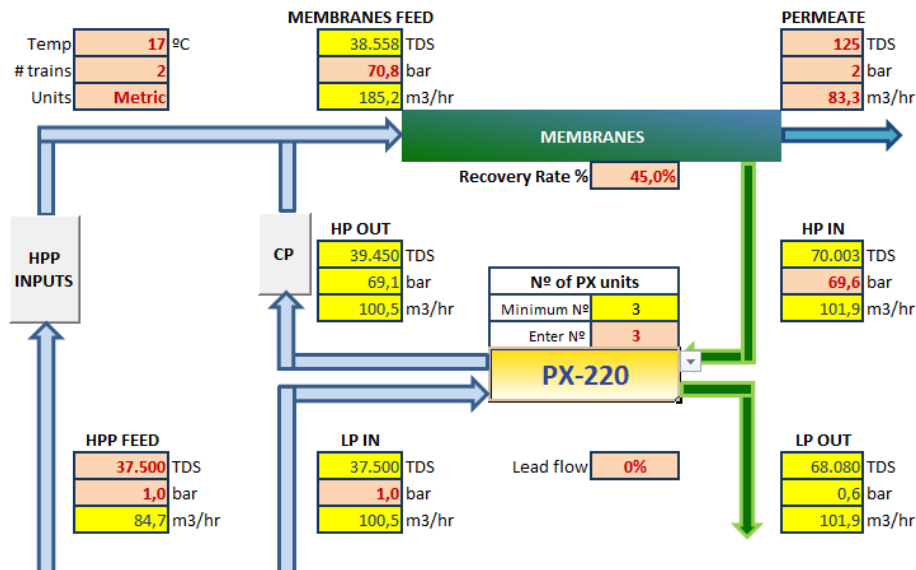


Figura 20. Parámetros de operación para el intercambiador de presión. Energy Recovery

## Bomba booster

La bomba booster, como ya se comentó, es la encargada de llevar el agua de captación que pasa por el intercambiador a la presión de operación de la membrana, igualando la presión del agua de captación a la salida de la bomba de alta presión. Se contará de una única bomba booster debido a la pequeña capacidad de la planta, donde solo se tiene un único módulo de desalación.

Las condiciones de operación de la bomba booster han sido calculadas en el ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS obteniendo un caudal de 27,9 l/s y una energía de 17,9 m, para este punto de operación se buscará una bomba tipo centrífuga que ofrezca un alto rendimiento y, por lo tanto, repercuta en un menor consumo específico de la planta.

Se han estudiado las bombas recomendadas por los fabricantes KSB y EBARA. La bomba 100x80FS S2GC5 de EBARA es la que mejores prestaciones nos ofrece, dando un rendimiento del 82,3% frente al 76,5% de la bomba de KSB. Los detalles de esta comparación se pueden ver en el ANEXO IV. ELECCIÓN DE EQUIPOS.

La Figura 21 muestra la hoja de curvas características de la bomba proporcionada por el fabricante EBARA, donde se señala el punto de operación de la bomba y su rendimiento.

# Curva

Nombre de la bomba: 100X80FSS2GC5 7.5

Customer	Fecha: 16-March-2015	Empresa
Contacto	Ref.	Issued by
Teléfono	Proyecto	Teléfono
Cómo electrónico	ID proyecto	Cómo electrónico

Datos de trabajo teóricos

Bomba

1	Caudal	l/s	27,89	Operating Flow	l/s	29,7	Rodete Diámetro	Designed/mm	147
2	Altura de impulsión	m	17,9	Operating Head	m	20,3	Frecuencia	Hz	50
3	Altura geodésica	m	0				Velocidad	1/min	2910

Test standard: ISO 9906-Annex A Agua limpia (100%) ; 293K; 998,3kg/m<sup>3</sup>; 1mm/s

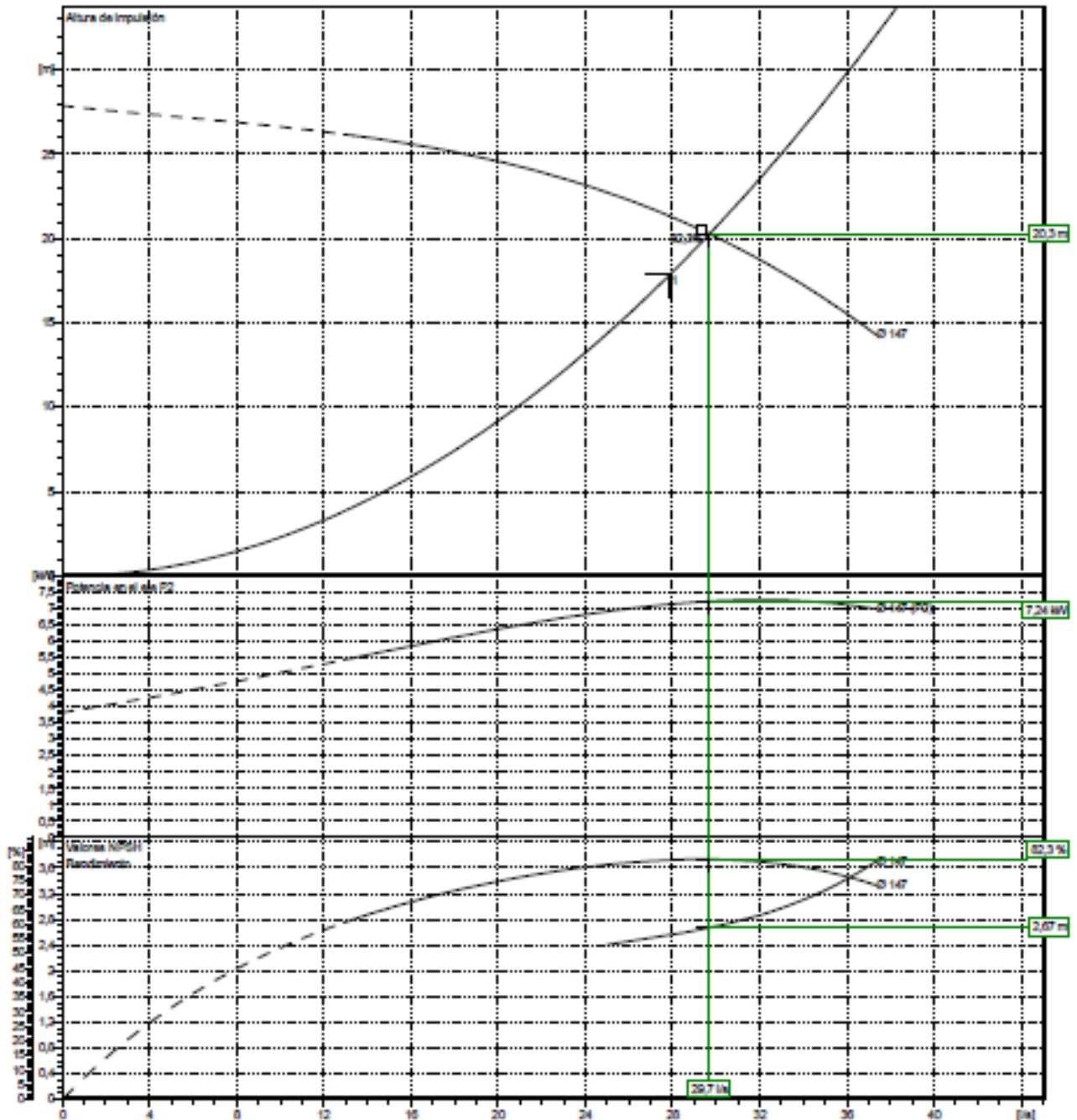


Figura 21. Curvas características de la bomba booster. EBARA.

## Bomba de alta presión

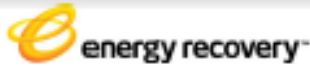
La bomba de alta presión representa el principal consumo de la planta de desalación, por lo cual es importante realizar una buena elección de este equipo buscando altos rendimientos que permitan reducir el consumo específico de la planta. Nuevamente, como en el caso de la bomba booster, solo se dispondrá de una bomba de alta presión.

Las condiciones de operación de la bomba de alta presión se han calculado en el ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS donde se ha obtenido un caudal de 23,5 l/s y una energía de 697,15 m obteniendo a la salida de la bomba una presión de 71,1 bares. Se buscarán bombas de configuración centrífuga multietapas que operen con agua de mar.

Los fabricantes que ofrecen este tipo de bombas y que han sido estudiados son KSB y Energy Recovery (el fabricante de los intercambiadores seleccionados). La bomba elegida ha sido la del fabricante Energy Recovery, que ofrece el modelo de bomba 3x4x7 A con un rendimiento de 75,8%. Los detalles de la comparación de ambas bombas se muestran en el ANEXO IV. ELECCIÓN DE EQUIPOS.

En la Figura 22 se muestra la hoja de datos de la bomba 3x4x7 A de Energy Recovery con sus condiciones de operación y los datos técnicos más relevantes.





ERI Quotation System 15.0.4.0

Pump Performance Datasheet			
Customer :		Project name :	338808
Customer reference :		Size :	3x4x7-A
Item number :	007	Stages :	20
Service :		Based on curve number :	3x4x7-A
Quantity :	1	Date last saved :	19 Mar 2015 8:00 AM
Operating Conditions		Liquid	
Flow, rated :	84.70 m3/h	Liquid type :	Sea Water
Differential head / pressure, rated (requested) :	71.10 bar	Additional liquid description :	
Differential head / pressure, rated (actual) :	71.24 bar	Solids diameter, max :	0.00 mm
Suction pressure, rated / max :	0.00 / 0.00 bar.g	Solids concentration, by volume :	0.00 %
NPSH available, rated :	Ample	Temperature, max :	20.00 deg C
Frequency :	50 Hz	Fluid density, rated / max :	1.026 / 1.026 kg/dm3
Performance		Viscosity, rated :	1.05 cSt
Speed, rated :	3,399 rpm	Vapor pressure, rated :	0.07 bar.a
Impeller diameter, rated :	178 mm	Material	
Impeller diameter, maximum :	178 mm	Material selected :	Standard
Impeller diameter, minimum :	178 mm	Pressure Data	
Efficiency :	75.82 %	Maximum working pressure :	97.20 bar.g
NPSH required / margin required :	7.38 / 0.00 m	Maximum allowable working pressure :	N/A
nq (imp. eye flow) / S (imp. eye flow) :	40 / 90 Metric units	Maximum allowable suction pressure :	N/A
MCSF :	24.25 m3/h	Hydrostatic test pressure :	N/A
Head, maximum, rated diameter :	97.20 bar	Driver & Power Data	
Head rise to shutoff :	36.44 %	Driver sizing specification :	Rated power
Flow, best eff. point (BEP) :	99.54 m3/h	Margin over specification :	0.00 %
Flow ratio (rated / BEP) :	85.10 %	Service factor :	1.00
Diameter ratio (rated / max) :	100.00 %	Power, hydraulic :	168 kW
Head ratio (rated dia / max dia) :	100.00 %	Power, rated :	221 kW
Cq/Ch/Ce/Cn [ANSI/HI 9.6.7-2010] :	1.00 / 1.00 / 1.00 / 1.00	Power, maximum, rated diameter :	232 kW
Selection status :	Acceptable	Minimum recommended motor rating :	224 kW / 300 hp

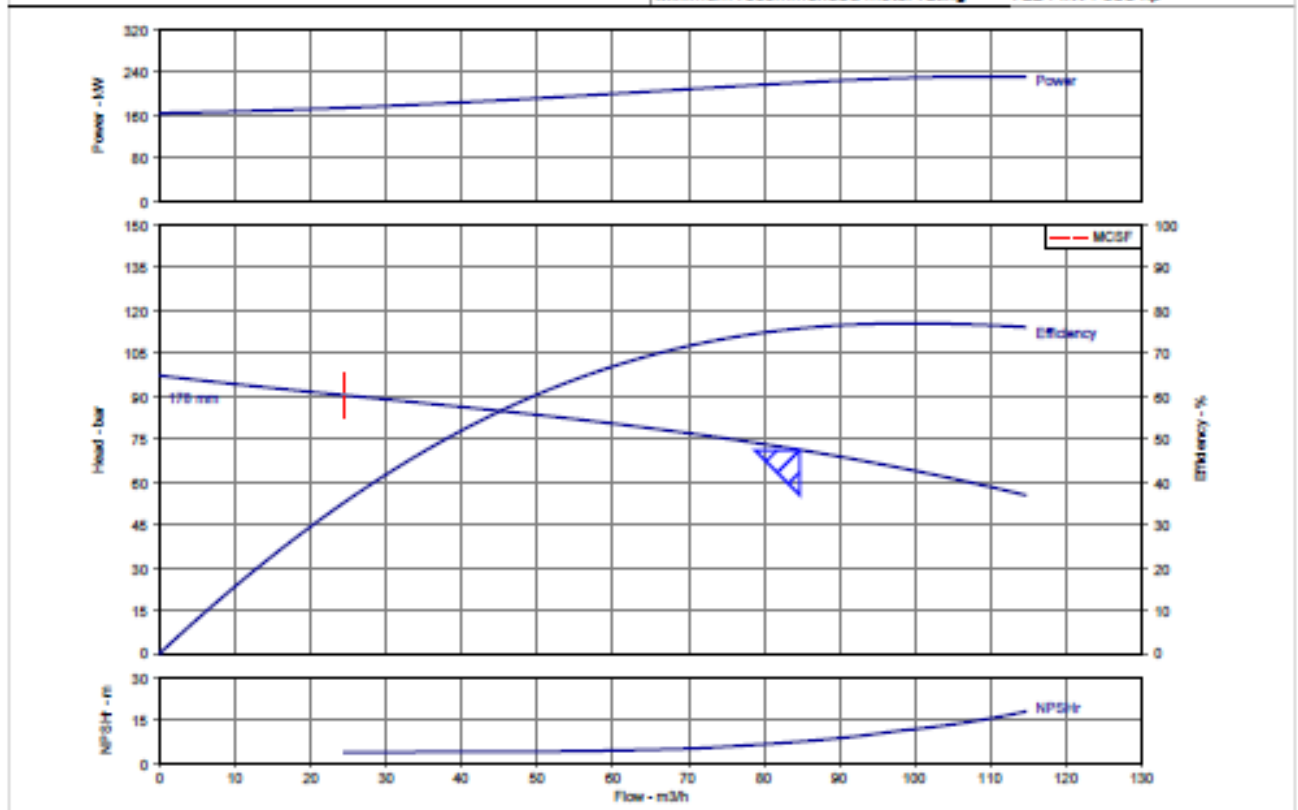


Figura 22. Ficha técnica de la bomba de alta presión. Energy Recovery.

### **9.1.7 Suministro**

En referencia al suministro, este proyecto abarcará el transporte del agua desde la planta de desalación hasta los depósitos reguladores mostrados en la Figura 23, el transporte y distribución del agua desde los depósitos hasta otros depósitos de acumulación o directamente hasta los puntos de consumo no está recogido dentro del ámbito de estudio.

#### **9.1.7.1 Bomba de suministro**

La función de la bomba de suministro será la de llevar el agua desde la planta de desalación hasta los depósitos reguladores, en este caso las bombas serán bombas centrífugas aunque no sumergibles como en el caso de las de captación. La instalación constará de dos bombas puestas en paralelo, cada bomba será capaz de transportar todo el agua por lo que se irán alternando, quedando siempre una de reserva para posibles averías o tareas de mantenimiento.

Se buscará una bomba con un bajo consumo específico y alto rendimiento para el punto de operación de la instalación, el que ha sido calculado en el ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS, dando como resultados un caudal de 23 l/s y una energía expresada en altura de 18,8 m.

En el estudio se han comparado las bombas recomendadas por los fabricantes KSB y EBARA en el ANEXO IV. ELECCIÓN DE EQUIPOS, donde la bomba 3D 65-125/7,5 de EBARA, se ha considerado la mejor opción porque su motor tiene una mayor potencia y el rendimiento que ofrece esta bomba es del 85,6%.

# Curva

Nombre de la bomba: **8065-125/7.5**

Customer	Fecha: 27-February-2015	Empresa
Contacto	Ref.	Issued by
Teléfono	Proyecto	Teléfono
Correo electrónico	ID proyecto	Correo electrónico

Datos de trabajo teóricos

Bomba

1	Caudal	l/s	23	Operating Flow	l/s	25,1	Impeller Dia. Designed	mm	140
2	Altura de impulsión	m	19	Operating Head	m	22,6	Frecuencia	Hz	50
3	Altura geodésica	m	0				Velocidad	1/min	2900

Test standard: ISO 9906-Annex A

Agua Impul. [100%] ; 200K; 998,3kg/m<sup>3</sup>; 1mm/s

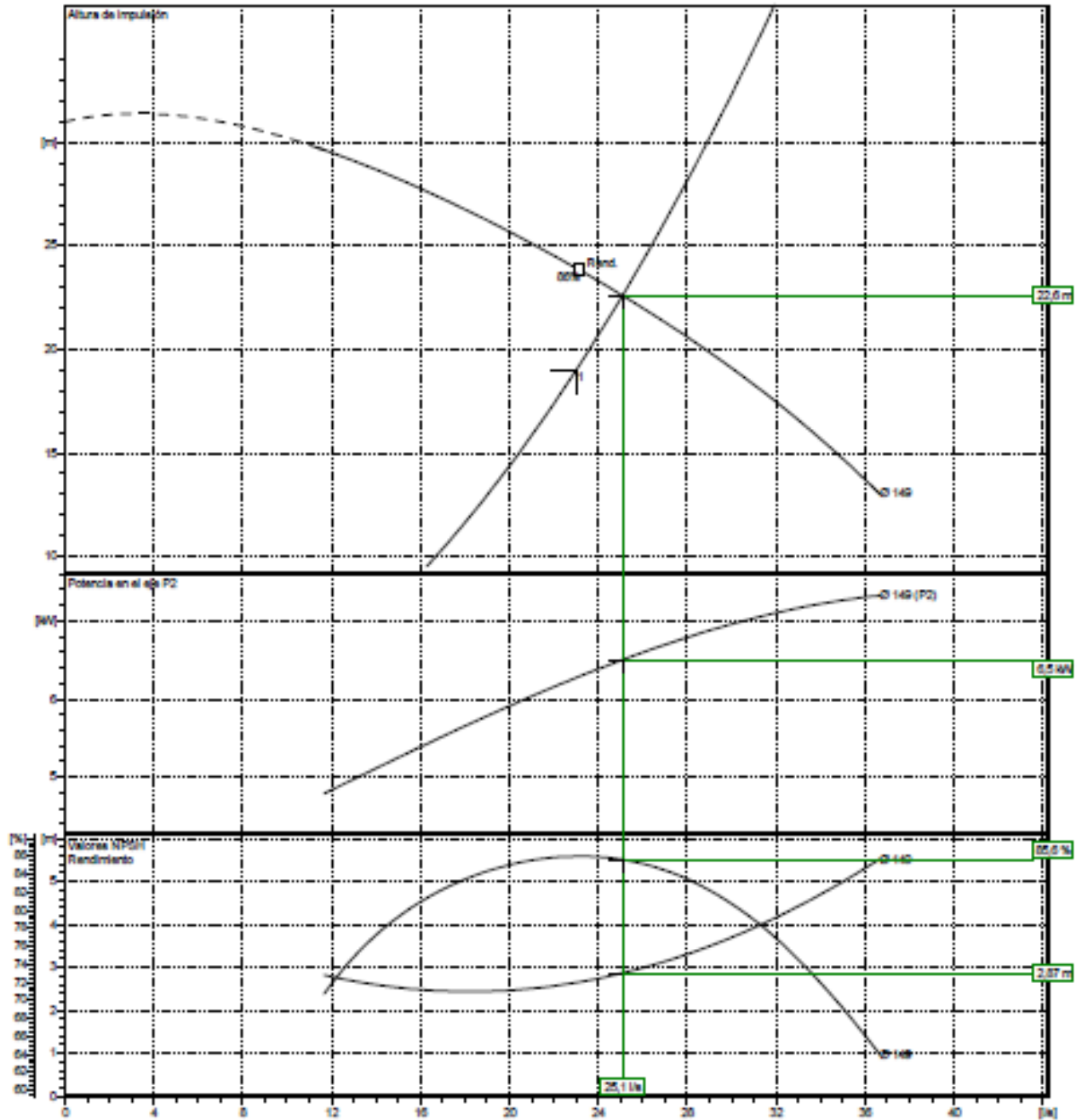


Figura 23. Hoja de datos de bomba de suministro. EBARA.

### 9.1.8 Resumen

Para finalizar con el apartado de las soluciones hidráulicas se procede a realizar un vaciado sobre los sistemas y equipos seleccionados a fin de dar una visión global sobre el esquema de la planta de desalación.

La conversión de la planta será del 45% ya que en un estudio preliminar del consumo específico de la planta, esta conversión ofrece un valor mínimo en el mismo.

El sistema de captación estará formado por 3 pozos costeros con bombas independientes modelo UPA 200B-80/13 del fabricante KSB. Estos tres pozos funcionarán a pares, alternándose entre sí para poder realizar tareas de mantenimiento o atender averías sin necesidad de hacer paradas en la planta de desalación.

Para el núcleo de desalación se han seleccionado membranas SWC4 MAX, las cuales ofrecen un alto rechazo en boro por lo duración manteniendo la calidad mínima del agua es superior al resto de membranas ofrecidas por Hidranautic. Al tratarse de agua de mar, la concentración de sales de rechazo hace preferente una única etapa, la que el software del fabricante recomienda configurar con 21 bastidores de 6 membranas.

La elección del sistema de recuperación se ha llevado de acuerdo a su eficiencia, donde en la actualidad, la mejor opción son los intercambiadores de presión, por lo que se recurre al principal fabricante de este producto, Energy Recovery. Utilizando su software se selecciona para la instalación 3 intercambiadores PX 220. Este sistema de recuperación de energía requiere de una bomba complementaria para elevar la presión del agua a la salida del intercambiador hasta la de trabajo de la membrana, para este cometido se ha seleccionado la bomba 100x80FS S2GC5 del fabricante EBARA.

La bomba de alta presión representa el principal consumo energético de la planta, por lo que el rendimiento adquiere gran importancia para llevar a cabo su elección. En este caso el mismo fabricante de los intercambiadores, Energy Recovery, ofrece la bomba 3x4x7 con un rendimiento cercano al 76%.

En este proyecto sólo se estudiará el suministro del agua producto hasta unos depósitos reguladores. Para llevar el agua hasta estos depósitos se dispondrán de dos bombas en paralelo, que al igual que las bombas de captación, no funcionaran de manera simultánea, se alternarán para poder afrontar tareas de mantenimiento y posibles averías. La bomba seleccionada para este fin es la 3D 65-125/7,5 del fabricante EBARA.

Finalmente, las tuberías de captación de agua, vertido de salmuera y de suministro, se han dimensionado según el criterio de Bonnet, y serán tuberías de PRFV del fabricante AMITECH ya que no se corroen con el agua salada permitiendo una gran vida útil de las mismas.

La Figura 24 muestra el esquema de la instalación de desalación, donde se detallan las tuberías seleccionadas con sus respectivas dimensiones, los diferentes modelos de bombas que se han propuesto así como los intercambiadores de presión, las membranas y su configuración.

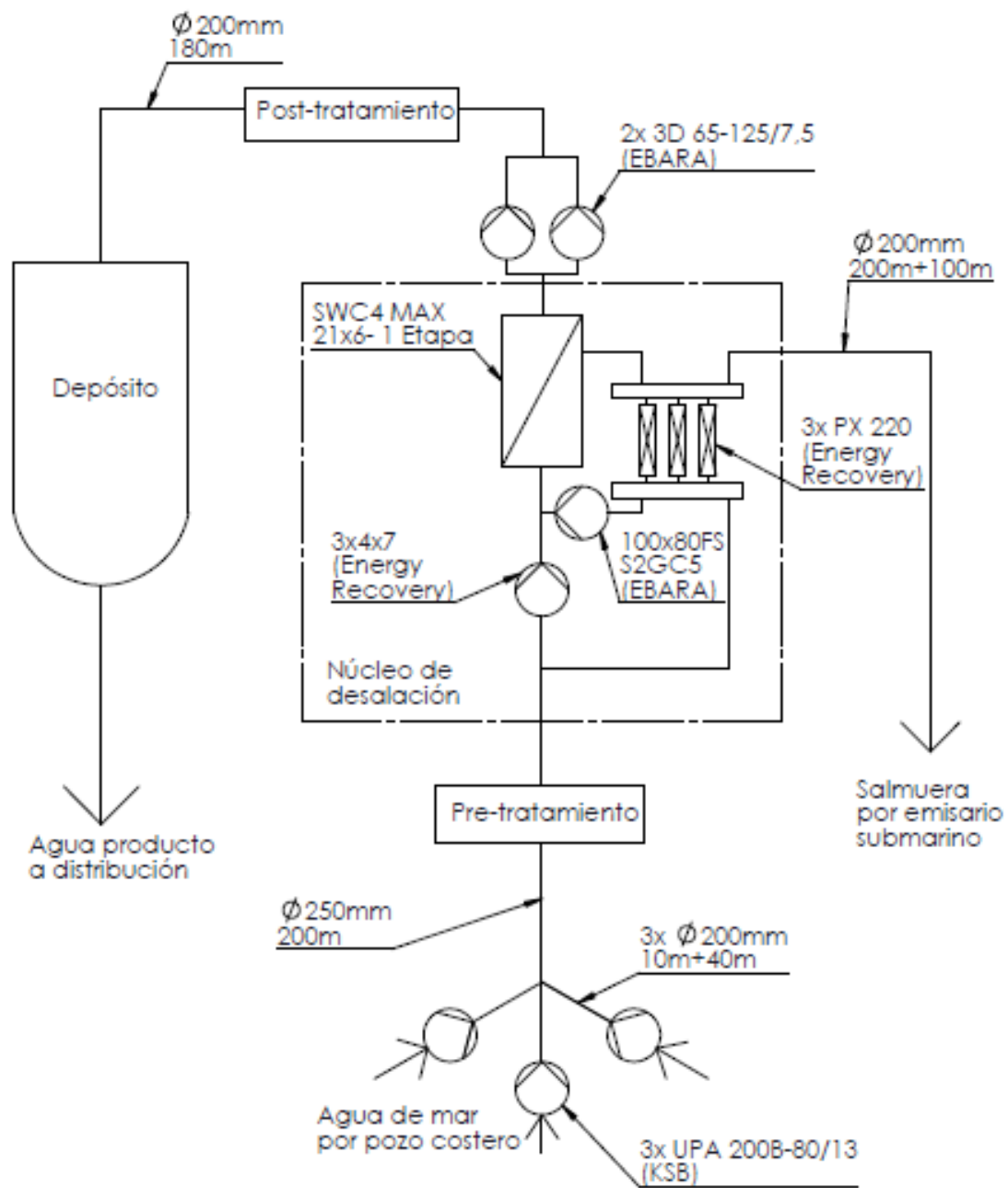


Figura 24. Esquema de instalación de desalación.

## **9.2 Sistema eólico**

### **9.2.1 Tipo de conexión**

La conexión del sistema eólico se realizará de manera interconectada, con apoyo de la red eléctrica, de tal manera que cuando los aerogeneradores generen menos potencia que la consumida por la planta de desalación, ésta tomará la potencia restante de la red eléctrica, y cuando los aerogeneradores estén a pleno rendimiento y generen más potencia que la consumida por la planta, el exceso sea suministrado a la red eléctrica. Se trabaja en paralelo con la red de distribución pública.

La ventaja de este tipo de conexión es que no requiere de elementos de almacenamiento de energía. En este caso, el problema de la inestabilidad del recurso eólico se transmite a la compañía eléctrica, la cual se encargará de ajustar la potencia generada a la demanda global.

El proceso de autorización y condiciones técnicas para este tipo de conexión se recogen en el Real Decreto 1955/2000 y Real Decreto 1699/2011, además, en este último se permite y regula la venta del excedente eléctrico.

### **9.2.2 Situación del sistema eólico**

La situación aproximada del sistema eólico ya ha sido expuesta en el apartado del emplazamiento de la planta, en la Figura 25 se muestra exactamente cuál es el lugar seleccionado, debido a su cercanía con la planta de desalación y mayor potencial eólico, además de las coordenadas de dicha situación en distintos sistemas de medición.

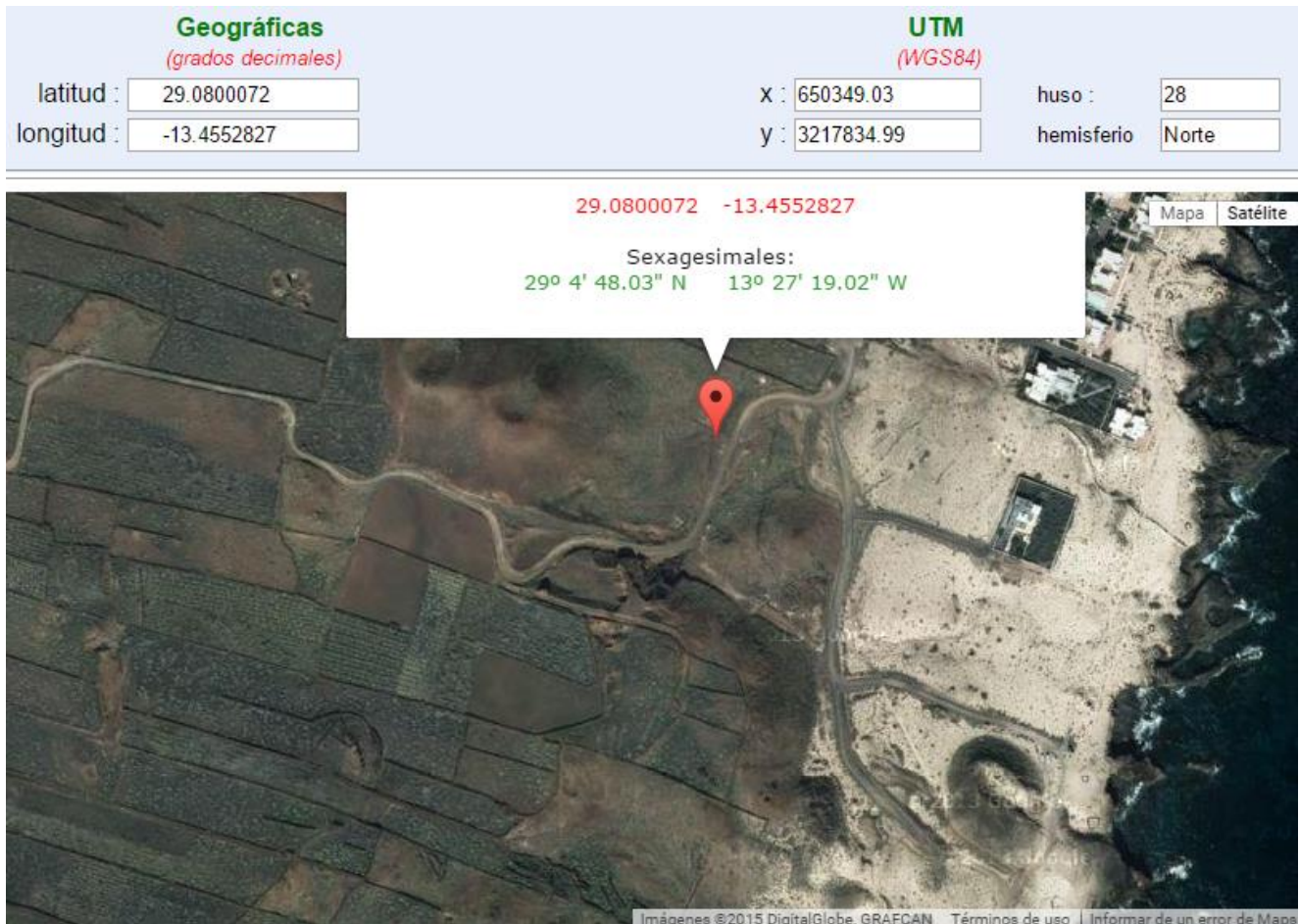


Figura 25. Situación del parque eólico. WWW.mundivideo.com

Los datos numéricos para el análisis del recurso eólico serán tomados desde la base de datos del Instituto Tecnológico de Canarias (ITC). El ITC trabaja con coordenadas en UTM, y éstas van en intervalos de 100 en 100 tanto en la coordenada X como en la coordenada Y, por lo que para el análisis y recopilación de datos se utilizarán las coordenadas más próximas a las reales de la situación del sistema eólico. Las coordenadas disponibles en el ITC más próximas son las siguientes:

- X= 650350
- Y= 3217850

El Real Decreto 6/2015 de 30, de enero, regula la localización de los aerogeneradores, éste dispone que se deba cumplir una serie de requisitos:

- La distancia mínima entre dos aerogeneradores en la misma línea no será inferior a dos veces el diámetro del rotor.
- La distancia mínima entre dos líneas del mismo parque deberá ser al menos de cinco veces el diámetro del rotor.

- La distancia entre los aerogeneradores y el núcleo habitado deberá ser mínimo de 250 m para aerogeneradores de menos de 900 kW y mínimo de 400 m para aerogeneradores de mayor potencia.
- En caso de viviendas aisladas, se debe asegurar que los aerogeneradores no generen en la vivienda ruidos superiores a 50 dB.

Para este proyecto se utilizará un único aerogenerador, por lo que no habrá que tener en cuenta las distancias mínimas entre aerogeneradores en la misma línea o entre líneas de aerogeneradores. Además, tomando como referencia el Parque Eólico de Corralejo de Fuerteventura mostrado en los antecedentes del presente proyecto, se ha visto que una planta desaladora de 4000 m<sup>3</sup>/día se abastece por dos aerogeneradores de 850 kW, por lo que para esta planta se utilizará un único aerogenerador de menos de 900 kW, por lo que la distancia mínima hasta el núcleo habitado se limita a 250 m.

### **9.2.3 Potencia eólica**

El sistema eólico se dimensionará de manera que genere entre el 85 y el 115% del consumo anual de la planta. Como se mostró en el apartado global de la evaluación energética de la planta de desalación, el total del consumo energético anual es de 2,12 GWh, entonces, el intervalo de potencia para el cual se diseñará el sistema eólico estará comprendido 1,80 y 2,43 GWh. Con un aerogenerador cuya potencia nominal no sobrepase los 900 kW y proporcione una potencia promedio anual cercana a los 270 kW requeridos por la planta de desalación.

Tras haber estudiado varias alternativas ofrecidas por el ITC, y comparado los resultados del aerogenerador de interés de esta fuente con los resultados de WindPower y una hoja de cálculos de elaboración propia, (los detalles de las alternativas y la comparación se pueden ver en el ANEXO IV. ELECCIÓN DE EQUIPOS) la solución a adoptar para hacer frente al requerimiento energético de la planta de desalación, y que más se adapta a las necesidades, es un único aerogenerador modelo G58 del fabricante GAMESA dotado de un generador de 850 kW.

Con este aerogenerador se consigue una potencia promedio anual de 271 kW y una generación de energía de 2,37 GWh al año, la cual sería suficiente para abastecer íntegramente la planta de desalación si se dispusiera de un sistema de acumulación de energía.



GAMESA es una empresa española que se encuentra entre las principales empresas de tecnología eólica a nivel mundial. Tiene una amplia experiencia en el sector, habiendo instalado más de 30.000 MW en el mundo, dando al consumidor una confianza tangible. Al ser una empresa española, tanto el mantenimiento como las reparaciones o repuestos del aerogenerador conllevaran menor esfuerzo logístico como puede ser el tiempo de espera ante un envío o el servicio técnico de personal especializado.

Los datos técnicos del aerogenerador se muestran en la Figura 26.

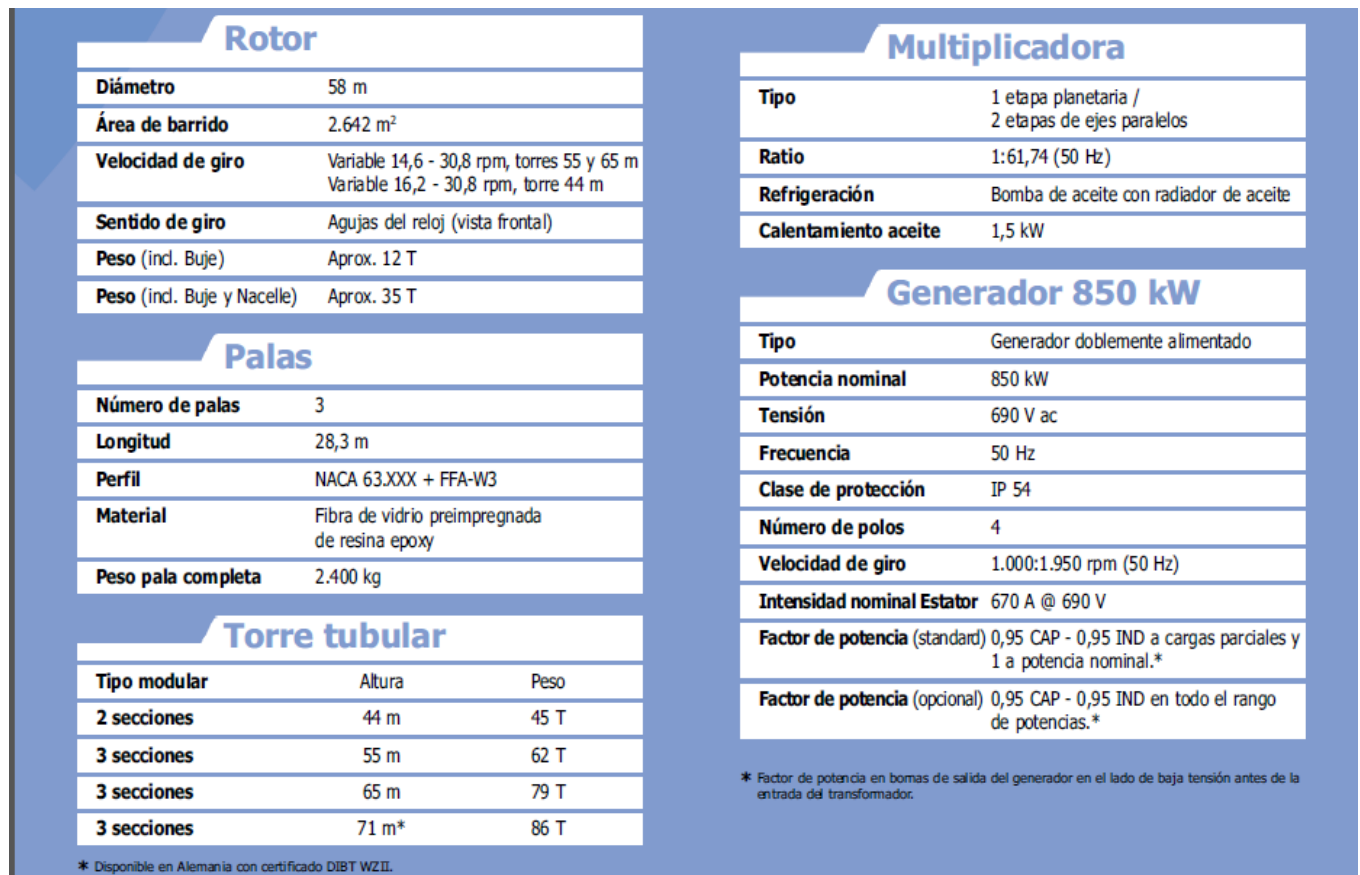


Figura 26. Datos técnicos del aerogenerador G58. GAMESA

Adicionalmente cabría destacar que al ser un único aerogenerador no habrá problemas en cuanto a separación de los mismos, donde solo se deberá tener en cuenta el núcleo urbano, además, cuenta con puntas de pala diseñadas para minimizar el ruido y un sistema de control de ruido diseñado por GAMESA, el NRS, que permite programar el ruido en función de la fecha, hora o dirección del viento.

## 10 EVALUACIÓN ENERGÉTICA

### 10.1 Sistema de desalación

A modo de síntesis de los cálculos de potencia expuestos en el ANEXO VII. EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE DESALACIÓN, se muestra la Tabla 11, donde se muestra cual es la potencia, consumo específico y consumo anual de las etapas de captación, proceso de ósmosis inversa y suministro además de los valores totales de la planta de desalación. Para ello se asumirá una disponibilidad anual de la planta del 90%.

Proceso	Potencia (kW)	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )	Consumo anual (GWh)	% Potencia
Captación	34,02	0,41	0,27	13%
Proceso OI	230,32	2,76	1,82	85%
Suministro	5,14	0,06	0,04	2%
Total	269,48	3,23	2,12	100%

Tabla 11. Resumen energético de sistema de desalación.

La potencia total de la planta de desalación asciende a unos 270 kW, con un consumo específico de 3,23 kWh/m<sup>3</sup>. El consumo específico está dentro de los valores normales en las plantas de desalación con sistemas de intercambiadores de presión como recuperadores de energía.

El consumo energético anual servirá para poder hacer una previsión del coste eléctrico en un análisis económico del sistema, apartado que no entra dentro del ámbito de este proyecto, sin embargo, también será necesario para interconectar el consumo energético de la planta de desalación con el sistema de abastecimiento mediante aerogeneradores. Este consumo es de 2,12 GWh anual, y nos basaremos en este dato para el dimensionado del sistema eólico.

## 10.2 Evaluación conjunta

En los apartados anteriores se ha visto que la energía consumida anualmente estimada para la planta de desalación, en las condiciones fijadas por el estudio, es de 2,16 GWh, con una potencia instantánea que ronda los 270 kW.

Para hacer frente a esta demanda energética, se recurre un abastecimiento eléctrico que utiliza un sistema eólico, un aerogenerador de 850 kW de potencia nominal, interconectado a la red eléctrica, donde la energía generada anualmente estimada para el aerogenerador Gamesa G58 en el emplazamiento seleccionado es de 2,37 GWh, con una potencia promedio anual de 271 kW. A esta energía calculada habrá que aplicarle un coeficiente del -2% debido a fallos en la red (Guía técnica de aplicación para energías renovables, Gobierno de Canarias) y un -3% debido a pérdidas eléctricas en conductores y elementos intermediarios. Por lo tanto, la energía anual aprovechable será de 2,25 GWh.

Haciendo un balance conjunto se estima un excedente de energía anual de 90 MWh. Esto representa la energía que la red eléctrica recibe como energía neta del sistema en el periodo de un año.

Cabe recalcar nuevamente, que este resultado no quiere decir que la instalación del aerogenerador sea suficiente para abastecer la planta desaladora, debido a la variabilidad del viento habrá momentos en que la potencia instantánea generada por el aerogenerador sea superior a la consumida por la planta de desalación (donde el exceso de energía producida será vertida a la red eléctrica), y momentos en los que el aerogenerador no sea capaz de abastecer el completo de la potencia demandada por la planta de desalación (en este caso la planta de desalación consumirá energía de la red eléctrica).

Teniendo en cuenta lo expuesto en el párrafo anterior, y considerando que el precio de comprar la corriente eléctrica a la compañía de suministro es superior al precio al que la compañía compra la corriente eléctrica que se le cede cuando hay exceso de producción, no se puede asegurar un beneficio económico neto al terminar el periodo anual por parte de la generación/consumo de energía.

## 11 SOLUCIÓN ADOPTADA

En este apartado se describen brevemente las soluciones adoptadas a lo largo del análisis energético de la planta de desalación por ósmosis inversa con su correspondiente suministro eléctrico mediante energía eólica.

### 11.1 Emplazamiento y capacidad

Se ha decido hacer el estudio de una posible planta de desalación en la isla de Lanzarote debido a su dependencia de agua desalada. La zona elegida para el emplazamiento ha sido la zona norte de la isla, en el municipio de Teguise, en concreto el Sector 1 del Charco del Palo debido principalmente a su cercanía a la costa y a su potencial eólico, siendo éste un terreno urbano aunque no industrial, por lo que la ejecución real del proyecto estaría a expensas de una recalificación de suelo.

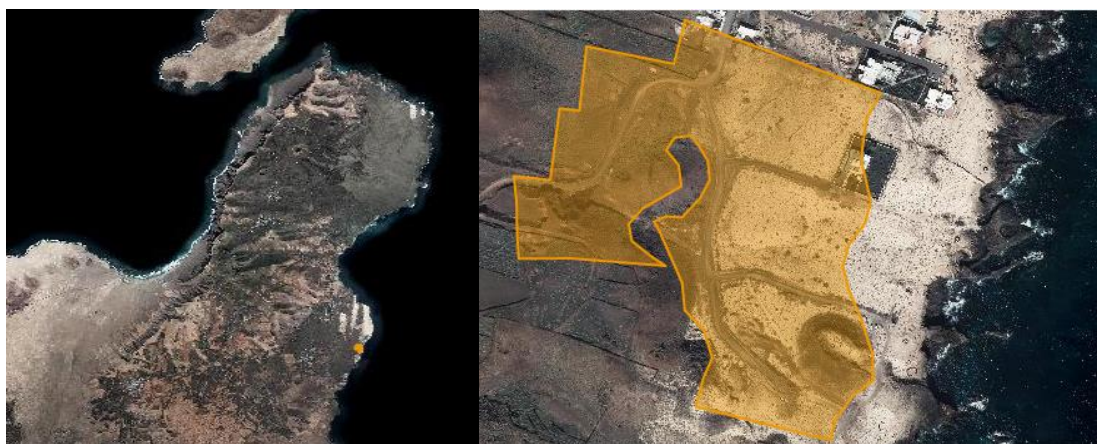


Figura 27. Sector 1 Charco del Palo.

La capacidad de 2000 m<sup>3</sup>/día de la planta de desalación se ha tomado principalmente para poder hacer frente a la demanda de agua para regadío en la zona, sin embargo, debido al aumento de población y a que el agua de consumo humano es agua de alta calidad para riego, se ha diseñado de manera que el agua producto sea apta para consumo humano, dejando la planta de desalación preparada para poder hacer frente a un aumento de dicha agua.

## **11.2 Sistema de captación de agua marina**

El sistema de captación del agua de mar se realizará mediante tres pozos costeros de captación aprovechar el filtro natural del suelo. De los tres pozos, dos estarán en funcionamiento de forma simultánea, y se dispondrá de un tercero para alternar y poder hacer frente a las labores de mantenimiento y posibles averías sin reducir la capacidad de la planta. La profundidad de los pozos se ha estimado en 40 metros para el estudio, aunque este dato estará a expensas de un análisis geotécnico para conocer las características del suelo, superficialmente los pozos se unirán a un colector común tras 10 metros de tubería individual, de donde saldrá una única tubería de 200 metros que llevará el agua hasta la planta de desalación.

Las tuberías será PRFV suministradas por el distribuidor AMITECH, donde las individuales de cada pozo tendrán un diámetro de 200 mm y la general será de 250 mm.

Las bombas seleccionadas para el suministro de agua son bombas sumergibles modelo UPA 200B-80/13 del fabricante KSB, con un punto de operación de 26 l/s y una energía hidráulica de 50,7 metros, proporcionando un rendimiento de 79,5%.

## **11.3 Núcleo de desalación**

El núcleo de desalación se compone principalmente del módulo de membranas, el sistema de recuperación de energía y de la bomba de alta presión. La conversión de la planta de desalación ha sido fijada en el 45% debido a que proporciona una optimización del consumo específico.

### **11.3.1 Módulo de membranas**

Únicamente se dispondrá de una etapa y un paso, configuración más habitual para sistemas de desalación de agua de mar.

Las membranas seleccionadas son las SWC4 MAX del fabricante Hydranautics con una configuración de 21 permeadores de 6 membranas en cada uno de ellos (21x6 en una etapa), obteniendo un total de 126 membranas. Estas membranas tienen configuración en espiral y están especialmente diseñadas para tener un alto rechazo de boro.

### **11.3.2 Sistema de recuperación de energía**

La recuperación de energía se realizará mediante intercambiadores de presión, por lo que será necesario disponer de una bomba booster, ya que es el sistema más utilizado actualmente por su alto rendimiento.

Los intercambiadores de presión seleccionados han sido 3 intercambiadores modelo PX 220 del fabricante Energy Recovery con un rendimiento del 97,5%.

La bomba boosters propuesta es la modelo 100x80FS S2GC5 del fabricante EBARA, con un punto de operación de 27,9 l/s y una energía hidráulica de 17,9 metros. En estas condiciones de funcionamiento la bomba proporciona un rendimiento del 82,3%.

### **11.3.3 Bomba de alta presión**

La bomba de alta presión deberá llevar el agua hasta una presión de 71,1 bares en el caso de estudio, donde el caudal es de 23,5 l/s y la energía hidráulica a aportar de 697,1 metros.

Para este cometido se ha seleccionado la bomba modelo 3x4x7 del fabricante Energy Recovery, donde el rendimiento según el fabricante es del 75,8%.

## **11.4 Sistema de distribución**

El alcance del sistema de distribución del presente proyecto se limita a llevar el agua producto hasta un depósito situado en una cota superior a la de la planta de desalación. Se realizará mediante una única bomba, teniendo otra de reserva para mantenimiento o posibles averías.

La tubería de distribución será del mismo material y fabricante que las tuberías de captación, de PRFV del distribuidor AMITECH, con una longitud de 180 metros y un diámetro de 200 mm.

La bomba seleccionada para impulsar el agua producto hasta el depósito es una bomba centrífuga modelo 3D 65-125/7,5 del fabricante EBARA, con un punto de operación de 23 l/s y una energía hidráulica de 18,8 metros, obteniendo un rendimiento del 85,6%.

---

## **11.5 Vertido de salmuera**

---

El vertido de salmuera se realizará mediante un emisario submarino, minimizando así la influencia de esta corriente en el agua de captación. Esta tubería será igual a las anteriores utilizadas para la captación y el suministro, teniendo una longitud total de 300 metros, de los cuales al menos 100 estarán dentro del agua, con un diámetro de 200 mm.

---

## **11.6 Sistema eólico**

---

El sistema eólico constará de un aerogenerador modelo G58 del fabricante Gamesa con una potencia nominal de 850 kW, el cual se estima que generará una energía anual de 2,37 GWh, cantidad ligeramente superior a la consumida por la planta de desalación (2,12 GWh).

La conexión será interconectada a la red para poder prescindir de sistemas de almacenamiento de energía y la localización exacta del aerogenerador se muestra en la Figura 25 del apartado 9.2.2 Situación del sistema eólico.

## 12 CONCLUSIONES

### 12.1 Español

Teniendo en cuenta el objetivo principal de este proyecto considero la realización del trabajo de fin de grado una parte crucial de la carrera de grado en ingeniería mecánica, donde el alumno adquiere la capacidad de trabajo autónomo junto con la responsabilidad de organización y gestión del proyecto. También cabría destacar frente a este objetivo principal, la puesta en práctica de las capacidades adquiridas relacionadas con la redacción, síntesis y elaboración de documentos formales con carácter técnico/industrial, haciendo uso de las normativas y reglamentos pertinentes. Durante la ejecución del documento se han aplicado los conocimientos adquiridos durante el transcurso de la titulación, haciendo especial hincapié en la rama de fluidomecánica e hidráulica y oficina técnica.

Haciendo referencia al objetivo secundario y específico del análisis energético de una planta de desalación mediante ósmosis inversa abastecida por energía eólica, se han ampliado los conocimientos teórico-técnicos adquiridos durante el grado en estos términos (desalación por ósmosis inversa y energía eólica), concluyendo tras la finalización del análisis con los siguientes apartados:

Las Islas Canarias tienen una gran dependencia de recursos hídricos no convencionales, por lo que debido a su situación geográfica, la desalación por ósmosis inversa y otros métodos, adquiere gran importancia, además, gran parte de la energía primaria se destina a este fin de desalar. Si se tiene en cuenta las metas fijadas a corto plazo frente a la dependencia de combustibles fósiles, es evidente que el uso de las energías renovables será la mejor opción a tener en cuenta a la hora de modificar o implantar sistemas de desalación, donde el gran inconveniente surge debido a la inestabilidad de las energías renovables más utilizadas, la solar y la eólica, lo que en principio hace imprescindible el respaldo de una red eléctrica como apoyo. Una alternativa razonable sería la adoptada en la central hidroeólica de El Hierro, donde la energía producida por aerogeneradores hace subir agua hasta un depósito en altitud acumulando energía potencial con bombas hidráulicas para luego poderla utilizar en función de la demanda aprovechando el desnivel y regulando el caudal al hacerla pasar por turbinas hidráulicas.

La amplitud de este tipo de proyecto ejecutable es demasiado extensa para ser tratada por un único ingeniero, en tan poco tiempo y con recursos limitados. Proyectos ejecutables de este calibre deberán ser realizados por un equipo de ingenieros preferiblemente con experiencia en el sector y contando con los recursos adecuados.



Se encuentra mucha dificultad a la hora de conseguir información técnico-económica por gran parte de los fabricantes de equipos industriales, más aun cuando el solicitante es aún estudiante no titulado. Esto imposibilita la ejecución de un presupuesto o análisis de costos del sistema o de viabilidad de la planta, apartado al que se le ha dedicado tiempo y se ha querido incorporar al presente documento pero ha sido imposible debido a la falta de datos.

Como conclusión más subjetiva considero que la combinación de la tecnología desalación por ósmosis inversa abastecida con la energía eólica a través de aerogeneradores tiene mucho potencial y como se ha visto en el apartado de análisis energético, un único aerogenerador de 850 kW es capaz de producir la energía consumida por una planta de desalación de 2000 m<sup>3</sup>/día en el periodo de un año, con un emplazamiento donde el aprovechamiento del recurso eólico no es óptimo, con una velocidad media de 6 m/s y un factor de forma de 2,61, reduciendo de manera importante la dependencia de combustibles fósiles y promoviendo las fuentes de energía renovables.

La investigación de tecnologías híbridas que combinen desalación con energías renovables es una apuesta segura cara al futuro, donde la demanda de agua será mayor y, debido a la escases de combustibles fósiles, la necesidad de fuentes de energía renovables eficientes es será la mejor y posiblemente única alternativa.

---

## 12.2 English

Taking in account the main objective of this project, I consider the realization of this one an important part of my career in mechanical engineering, in which the student acquires the capacity to work unsupervised with the organization and handling of the project.

It is also necessary to mention that the application of the capacities acquired related to writing synthesis and making formal industrial and technical documents, making use of norms and rules that apply. During the elaboration of this document I have applied the knowledge acquired throughout the whole program of mechanical engineering, especially in the branch of mechanical fluid and hydraulic and technical office.

. Referring to the secondary objective of the energetic analysis of a desalination plant, throughout reverse osmosis supplied by wind-powered energy, I have amplified my theory and technical knowledge acquired throughout the career, concluding the analysis with the following statements:

The Canary Islands depend mainly on hydraulic unconventional resources, which is why, due to its geographic situation, the desalination by reverse osmosis and other methods are very crucial. Also, the most part of this primary energy is used to desalinate. If we take in account the objectives in a short term and the use of fuel, it is evident that the use of renewable energies will be the best option to take in account when modifying or implementing desalination systems, where the inconvenient is the need of an electric source as back up. A reasonable alternative would be like the one of the wind powered center in El Hierro, where the produced energy elevates the water to a deposit, accumulating energy with hydraulic pumps, to be able to use according to the demand, taking advantage of the ramps created and regulating the flow, making the water pass through hydraulic turbines.

This type of Project is too extends and complex to be elaborated by one engineer with a limited amount of time and resources. Therefore, this type of Project has to be realized by a group of engineers, with experience in the field and with the adequate resources

It is too difficult to find technical and economic information from the manufacturers, especially when the student is yet to be certified. This presents an obstacle in the execution or creation or a Budget in order to create this plant.

As a more subjective conclusion, i consider that the combination of the technology of desalination by reverse osmosis supplied by wind power throughout windmills has a lot of potential and only one windmill of 850 kW is able to produce the energy consumed by a desalination plant of 2000 m<sup>3</sup>/day, in the course of year in a place in which there is not much wind power, with an average speed of 6 m/s y and a form factor of 2,61, reducing greatly the usage of combustible fuels and promoting the use of renewable energies.

In this investigation the hybrid technologies that combine desalination with renewable energies is a safe bet for the future, where the demand for clean water will be higher due to the lack of fuels, the need for renewable and efficient energy will be the best and possibly only alternative.

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL**

## **ANEXOS**

# **ANÁLISIS ENERGÉTICO DE DESLADORA ABASTECIDA POR ENERGÍA EÓLICA**

**TRABAJO PRESENTADO PARA OPTAR AL APROBADO DE**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**POR**

**Juan Francisco Medina Casas**

**La Laguna, JULIO DE 2015**

**TRABAJO FIN DE ASIGNATURA**

Autor:

Juan Francisco Medina Casas

Director o Directores:

Vicente José Romero Ternero

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>ANEXO I. ÓSMOSIS INVERSA .....</b>	<b>1</b>
1.1	Desalación .....	1
1.2	Osmosis Inversa .....	2
1.2.1	Fundamento .....	2
1.2.2	Propiedades .....	4
1.3	Etapas de la Oi .....	5
1.3.1	Captación .....	5
1.3.2	Pre-tratamiento .....	7
1.3.3	Módulo de Oi .....	8
1.3.4	Post-tratamiento.....	15
1.3.5	Suministro .....	15
1.3.6	Mantenimiento, limpieza y conservación .....	16
<b>2</b>	<b>ANEXO II. ENERGÍA EÓLICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	Recurso eólico .....	17
2.2	Aerogeneradores eje horizontal.....	20
2.2.1	Componentes de un aerogenerador de eje horizontal .....	20
2.3	Emplazamiento .....	22
2.4	Conexión.....	24
2.4.1	Sistemas aislados .....	25
2.4.2	Sistemas conectados a la red eléctrica .....	25
2.5	Aspectos medio ambientales .....	26
2.5.1	Impacto visual .....	26
2.5.2	Impacto acústico .....	27
2.5.3	Avifauna, flora y terreno.....	27
<b>3</b>	<b>ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS .....</b>	<b>29</b>
3.1	Diámetros de tubería y pérdidas de carga.....	29
3.2	Punto de operación de la bomba de alimentación.....	32
3.3	Punto de operación de la bomba de suministro .....	33
3.4	Caudales y presiones del núcleo de desalación.....	35
3.5	Punto de operación de bomba booster.....	37
3.6	Punto de operación de bomba de alta presión .....	38
3.7	Calculo de recuperación .....	39
3.8	Tablas resumen .....	41

<b>4</b>	<b>ANEXO IV. ELECCIÓN DE EQUIPOS.....</b>	<b>43</b>
4.1	Desalación .....	43
4.1.1	Bombas de captación .....	43
4.1.2	Bomba de suministro .....	47
4.1.3	Membranas .....	50
4.1.4	Intercambiador de presión .....	53
4.1.5	Bomba boosters.....	55
4.1.6	Bomba de alta presión .....	59
4.2	Aerogenerador.....	62
4.2.1	Elección de aerogenerador, ITC .....	62
4.2.2	Resultados, WindPower.....	68
4.2.3	Hoja de cálculos de elaboración propia .....	71
4.2.4	Comparación de resultados .....	74
<b>5</b>	<b>ANEXO V. MEMBRANA .....</b>	<b>75</b>
5.1	Variación de temperatura del agua.....	75
5.2	Variación de pH del agua.....	77
5.3	Variación de edad de la membrana .....	80
5.4	Casos más desfavorables.....	82
<b>6</b>	<b>ANEXO VI. SOFTWARE ESPECÍFICO .....</b>	<b>85</b>
6.1	IMSdesing .....	85
6.2	Energy Recovery .....	90
6.3	Hoja de cálculo elaboración propia para el sistema de desalación.....	92
6.3.1	Propiedades de los flujos.....	92
6.3.2	Cálculos de pérdidas de carga .....	93
6.3.3	Cuadro energético en los diferentes puntos de la instalación .....	94
6.3.4	Análisis energético de las bombas hidráulicas.....	94
6.3.5	Análisis energético de la planta de desalación.....	95
6.4	Hoja de cálculo de elaboración propia para el sistema eólico.....	96
<b>7</b>	<b>ANEXO VII. EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE DESALACIÓN .....</b>	<b>97</b>
7.1	Captación.....	97
7.2	Núcleo de desalación.....	98
7.2.1	Bomba booster.....	99
7.2.2	Bomba de alta presión .....	100
7.3	Suministro .....	101

## Índice de figuras

Figura 1. Esquema general del proceso de desalación. Elaboración propia. ....	1
Figura 2. Fundamento OI. Lenntech.....	3
Figura 3. Esquema general de OI. Elaboración propia .....	5
Figura 4. Captación por toma cerrada. San Juan Medina.....	6
Figura 5. Captación por toma abierta. San Juan Medina.....	6
Figura 6. Bomba de desplazamiento positivo. ....	9
Figura 7. Bomba centrífuga. ....	9
Figura 8. Membrana con estructura asimétrica. ULL .....	10
Figura 9. Membrana de arrollamiento en espiral. Aguapotable.com.....	11
Figura 10. Esquema general de planta de OI con turbina Pelton. Acciona.....	12
Figura 11. Esquema de OI con sistema Turbo-changer. EnergyRecovery .....	13
Figura 12. Esquema de OI con intercambiador de presión. Acciona.....	14
Figura 13. Sistema de OI de 1 y 2 etapas. IMSdesing.....	14
Figura 14. Tanque de agua potable elevado en Paraguay. ....	15
Figura 15. Patrón de circulación de vientos globales. WindPower. ....	17
Figura 16. Anemómetro. WindPower. ....	18
Figura 17. Generador de eje horizontal. Gamesa .....	19
Figura 18. Aerogenerador de eje vertical. WindPower.....	19
Figura 19. Componentes de un aerogenerador de eje horizontal. Windpower.....	20



---

Figura 20. Ejemplo de gráfica de velocidad del viento frente a la altura. WindPower. ....	22
Figura 21. Efecto de obstáculos en la acción del viento. WindPower.....	23
Figura 22. Efecto túnel. WindPower. ....	23
Figura 23. Parque eólico de Kappel. Dinamarca.....	26
Figura 24. Volumen de control, captación. ....	32
Figura 25. Volumen de control, suministro. ....	34
Figura 26. Iteración IMSdesign.....	36
Figura 27. Resultados de caudales en el núcleo de desalación. Energy Recovery. ....	36
Figura 28. Volumen de control, bomba booster. ....	37
Figura 29. Volumen de control, bomba de alta presión.....	38
Figura 30. Consumo específico frente a porcentaje de recuperación.....	40
Figura 31. Esquema general de la instalación. ....	42
Figura 32. Bomba captación KSB. ....	44
Figura 33. Bomba de captación INGETEAM.....	45
Figura 34. Bomba de captación EBARA. ....	46
Figura 35. Bomba de suministro KSB. ....	48
Figura 36. Bomba de suministro EBARA. ....	49
Figura 37. Resultados SWC4+.....	51
Figura 38. Resultados SWC4 MAX. ....	51
Figura 39. Resultados SWC5 MAX. ....	52

---

Figura 40. Resultados SWC6 MAX. ....	52
Figura 41. Sondeo de presiones para el intercambiador. IMSdesign. ....	53
Figura 42. Resultados intercambiador PX 220. Energy Recovery. ....	55
Figura 43. Bomba boosters KSB. ....	57
Figura 44. Bomba boosters EBARA. ....	58
Figura 45. Bomba de alta presión KSB. ....	60
Figura 46. Bomba de alta presión Energy Recovery. ....	61
Figura 47. Herramienta para estimar la energía producida por un aerogenerador. ITC. ....	62
Figura 48. Enercon E-40. ITC. ....	63
Figura 49. Enercon E-44. ITC. ....	63
Figura 50. Enercon E-48. ITC. ....	64
Figura 51. Gamesa G52. ITC. ....	64
Figura 52. Gamesa G58. ITC. ....	64
Figura 53. Vestas V42. ITC. ....	65
Figura 54. Vestas V44. ITC. ....	65
Figura 55. Vestas V52. ITC. ....	65
Figura 56. Resultados para el aerogenerador Gamesa G58. ITC. ....	67
Figura 57. Curva de potencia del aerogenerador Gamesa G58. ITC. ....	67
Figura 58. Programa de cálculo de potencia de un aerogenerador. WindPower. ..	68
Figura 59. Curva de potencia del aerogenerador. WindPower. ....	69
Figura 60. Densidad de potencia generada. WindPower. ....	70

---

Figura 61. Coeficiente de potencia generado. WindPower. ....	70
Figura 62. Datos de entrada para el cálculo de potencia eólica. Elaboración propia. .....	71
Figura 63. Potencia promedio generada, límite de Betz y del viento. Elaboración propia.....	73
Figura 64. Temperatura 17°C. IMSdesign.....	76
Figura 65. Temperatura 19°C. IMSdesign.....	76
Figura 66. Temperatura 21°C. IMSdesign.....	76
Figura 67. Temperatura 24°C. IMSdesign.....	76
Figura 68. pH 6. IMSdesign.....	78
Figura 69. pH 6,5. IMSdesign.....	78
Figura 70. pH 7. IMSdesign.....	79
Figura 71. pH 7,5. IMSdesign.....	79
Figura 72. pH 8. IMSdesign.....	79
Figura 73. Membrana nueva. IMSdesign. ....	81
Figura 74. Membrana de 1 año. IMSdesign. ....	81
Figura 75. Membrana de 2 años. IMSdesign. ....	81
Figura 76. Membrana de 3 años. IMSdesign. ....	81
Figura 77. Membrana de 4 años. IMSdesign. ....	81
Figura 78. Resumen de variables para membranas. ....	82
Figura 79. 17°C, pH7 y años de membrana. P. Operación. IMSdesign.....	83
Figura 80. 24°C, pH7 y años de membrana. Índice de boro. IMSdesign.....	83

---

Figura 81. Interfaz principal. IMSdesign .....	85
Figura 82. Ventana de análisis del agua. IMSdesign. ....	86
Figura 83. Ventana de diseño de OI. IMSdesign. ....	87
Figura 84. Datos para intercambiador de presión. IMSdesign. ....	88
Figura 85. Resultados de cálculo. IMSdesign. ....	88
Figura 86. Diagrama de flujos. IMSdesign. ....	89
Figura 87. Apartado de coste. IMSdesign. ....	89
Figura 88. Interfaz de entrada de datos. Energy Recovery.....	90
Figura 89. Datos referentes a las bombas. Energy Recovery.....	91
Figura 90. Cuadro de resultados. Energy Recovery. ....	91
Figura 91. Interfaz de cálculo de las propiedades de los flujos.....	93
Figura 92. Interfaz de cálculo de pérdidas de carga. ....	94
Figura 93. Cuadro de estados energéticos. ....	94
Figura 94. Interfaz de análisis energéticos de las bombas hidráulicas. ....	95
Figura 95. Interfaz de análisis energético global de la planta de desalación.....	96

## Índice de tablas

Tabla 1. Principales procesos de desalación .....	2
Tabla 2. Diámetros de tuberías .....	30
Tabla 3. Pérdidas de carga. ....	31
Tabla 4. Elección de porcentaje de recuperación. ....	40
Tabla 5. Estados energéticos en los puntos de la instalación.....	41
Tabla 6. Puntos de operación de las bombas. ....	41
Tabla 7. Evaluación de bombas de captación.....	43
Tabla 8. Evaluación de bombas de suministro.....	47
Tabla 9. Resultados según modelo de membrana.....	52
Tabla 10. Modelos de intercambiadores. Energy Recovery.....	54
Tabla 11. Comparación de bombas boosters. ....	55
Tabla 12. Comparación de bombas de alta presión.....	59
Tabla 13. Modelos de aerogeneradores.....	66
Tabla 14. Comparación de resultados eólicos. ....	74
Tabla 15. Variación con temperatura. ....	77
Tabla 16. Variación con el pH. ....	78
Tabla 17. Variación con la edad de la membrana. ....	80

# 1 ANEXO I. ÓSMOSIS INVERSA

Se realizará una introducción teórica a la desalación, explicando más extensamente el proceso de ósmosis inversa. La lectura de este anexo se recomienda a los interesados en el proyecto que carezcan de conocimientos previos sobre dicho sistema de desalación.

## 1.1 Desalación

La desalación es un proceso por el cual eliminan las sales del agua de mar o de agua salobre (alimentación) mediante aporte de energía, obteniendo así el agua desalada (producto) y una corriente de agua con un mayor contenido en sales (salmuera de rechazo) que el agua de alimentación previamente captada. En la Figura 1 se muestra un esquema general del proceso de desalación.



Figura 1. Esquema general del proceso de desalación. Elaboración propia.

La importancia de éste método para la obtención de agua reside en que el 97,5% del agua del planeta es salada, y sólo menos de un 1% es apta para el consumo humano. Mediante los distintos métodos de desalación se consigue convertir aguas con altos contenidos en sales en aguas aptas para el consumo humano, usos industriales o riego.

Existen distintos procesos de desalación, en la Tabla 1 se exponen los principales procesos utilizados y sus principios de funcionamiento.

Proceso	Tipo de energía	Fundamento
Osmosis inversa (OI)	Mecánica	Hacer pasar el agua por una membrana semipermeable separando dos corrientes con distinta concentración de sales.
Destilación	Térmica	El agua salada se evapora separando las sales, y luego se condensa para obtener agua desalada.
Congelación	Térmica	Se congela agua de mar pulverizada para poder separar la sal, luego se funden y se obtiene agua desalada.
Electrodialisis	Eléctrica	Utiliza una corriente eléctrica para transportar los iones disueltos en el agua a través de una membrana, dejando agua con menor concentración salina.

**Tabla 1. Principales procesos de desalación**

La elección del tipo de proceso de desalación dependerá principalmente de los siguientes factores:

- Capacidad de la planta.
- Tipo de agua a desalar.
- Calidad/uso del agua producto.
- Disponibilidad energética y de presupuesto.
- Disponibilidad de personal cualificado y para labores de mantenimiento.
- Condiciones de emplazamiento.

La OI (Ósmosis Inversa) es actualmente la tecnología más utilizada debido a su menor consumo energético frente a otros procesos, y por ser capaz de aplicarse a distintos volúmenes de demanda o tipos de agua de alimentación, pudiendo ser agua salada o salobre.

## **1.2 Osmosis Inversa**

### **1.2.1 Fundamento**

La ósmosis se basa en el principio del equilibrio osmótico entre dos fluidos. Al poner en contacto dos fluidos con diferentes concentraciones de sólidos disueltos, éstos se mezclarán hasta que la concentración sea uniforme. Si separas a los fluidos por una membrana semipermeable, el fluido con menos concentración atravesará la membrana para pasar al de mayor concentración. Al cabo de un tiempo la altura del fluido a ambos lados de la membrana será diferente.

En esta diferencia de altura se refleja la diferencia de presiones osmóticas, dicha presión depende de la temperatura del fluido y concentración y tipo de sales disueltas.

Si al fluido se le aplica una presión superior a la osmótica, se produce el efecto contrario. El fluido es obligado a atravesar la membrana y las sales que la membrana no deje pasar quedan atrás. A este proceso, contrario a la ósmosis convencional, se le conoce como ósmosis inversa.

Para realizar el proceso de ósmosis inversa se necesita aplicar una presión al agua a un valor superior a la presión osmótica. Como consecuencia, se consiguen dos flujos distintos reflejados anteriormente en la Figura 1:

- Salmuera o rechazo, con una mayor cantidad de sales que el agua de alimentación.
- Agua producto, reducida en sales respecto a la alimentación.

La conversión representa el porcentaje de agua que es desalada a través del proceso de OI respecto al caudal de alimentación.

Este valor suele estar entre el 30 y el 85% dependiendo de la calidad del agua de alimentación, calidad deseada para el agua producto y del tipo de membrana. Los procesos de desalación de agua de mar mediante OI tienen una conversión de entre un 40 y 50%. Es importante resaltar que el proceso no es ideal y únicamente mediante ósmosis inversa nunca se obtendrá una conversión del 100%,

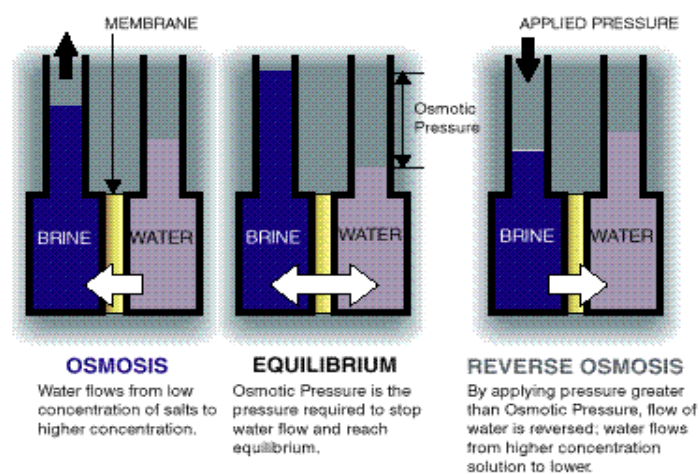


Figura 2. Fundamento OI. Lenntech



La Figura 2 muestra los pasos explicados anteriormente:

- Ala izquierda como el agua de menos concentración pasa la membrana hacia la de mayor concentración.
- Cuando se produce el equilibrio, figura central, hay una diferencia de alturas entre la superficie de los fluidos. Esta diferencia de alturas representa la presión osmótica, encargada de evitar que siga fluyendo agua.
- Por último al aplicar una presión mayor a la osmótica, el agua de mar fluye atravesando la membrana, dejando las sales atrás.

### 1.2.2 Propiedades

Las principales ventajas que hacen de la OI el sistema de desalación más utilizado son:

- Su consumo energético específico es menor al de otras tecnologías.
- Sirve para aguas con distinta concentración de sales, pueden tratarse aguas salobres o agua de mar.
- Tiene estructura modular, por lo que la operación y el mantenimiento se ven facilitados. Además, si fuera necesario, cabe la posibilidad de ampliar una planta de desalación sin dejar de usar los equipos existentes.
- Es compacta, permite más producción volumétrica por m<sup>2</sup> de instalación que otras tecnologías.
- La inversión inicial depende de las características del agua a desalar y del emplazamiento, sin embargo, por lo general es menor a la de otras tecnologías.

Como desventajas de esta tecnología de desalación frente a otros métodos es interesante destacar los siguientes puntos:

- El agua de entrada a las membranas requiere un pre-tratamiento que puede ser determinante en el coste variable del agua producto debido a la delicadeza de las membranas.
- Algunos iones o tipos de contaminación limitan su funcionamiento de forma eficiente.
- El rendimiento de la planta se ve afectado con el paso del tiempo debido al ensuciamiento de las membranas, por lo que es imprescindible un exhausto control de las tareas de mantenimiento y limpieza de equipos.

### 1.3 Etapas de la OI

En la Figura 3 se muestra un esquema general de una planta de desalación por OI con sus principales componentes y flujos de agua. En los próximos apartados se citan y describen cada uno de ellos.

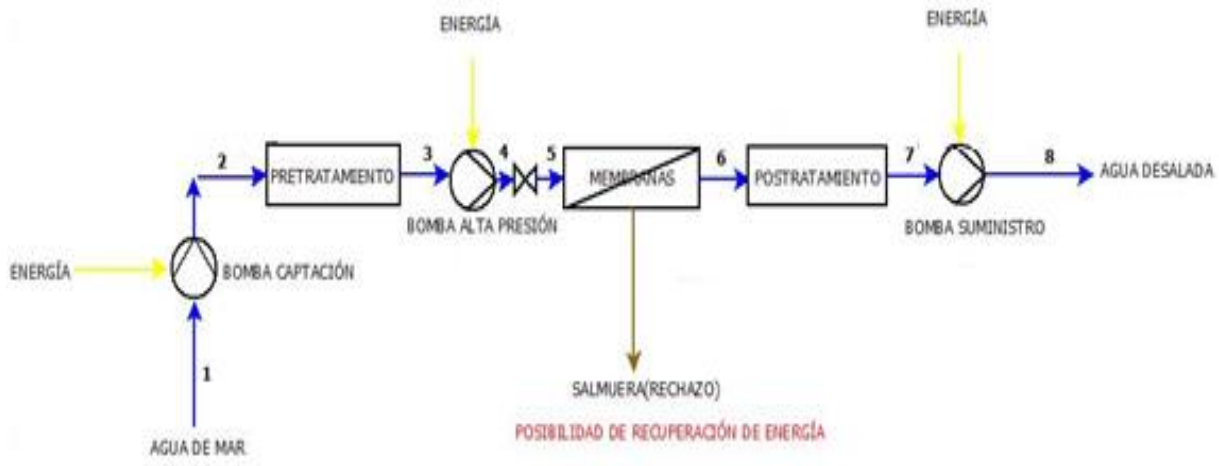


Figura 3. Esquema general de OI. Elaboración propia

#### 1.3.1 Captación

La etapa de captación es en la que se toma el agua de mar para llevarlo a la etapa de pre-tratamiento. Hay dos maneras generales para captar el agua de mar:

##### 1.3.1.1 Toma cerrada

Generalmente se utilizan pozos costeros. Se precisan grandes longitudes de perforación y con una cámara final, el terreno deberá ser lo suficientemente permeable como para garantizar el caudal de abastecimiento demandado por la planta de desalación. Para implantar este sistema es necesario un previo estudio del suelo. Se utilizan bombas sumergidas y es recomendable tener una bomba de emergencia para cada par de bastidores.

Como el agua es filtrada previamente por el terreno esta presenta una escasa actividad biológica, además de bajos índices de turbidez y ensuciamiento, poco contenido en oxígeno y temperatura del agua más estable que en el propio mar. Sin embargo, es frecuente encontrarse con variaciones de la composición química del agua, ésta se ve influenciada por los elementos naturales del subsuelo o filtraciones de sustancias superficiales como los pesticidas.

Debido a la baja actividad biológica y el poco ensuciamiento que presentan las aguas obtenidas de tomas cerradas es posible reducir el proceso de pre-tratamiento frente a al agua tomada por tomas abiertas.

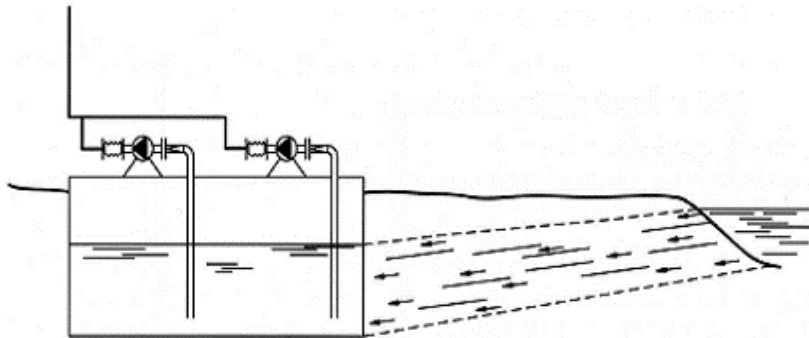


Figura 4. Captación por toma cerrada. San Juan Medina.

### 1.3.1.2 Toma abierta

Las tomas abiertas pueden ser mediante el uso de emisarios submarinos o de tomas de agua superficiales. Son utilizadas mayormente por plantas de desalación de pequeña capacidad instaladas en embarcaciones que requieren autoabastecimiento, o por plantas de desalación de una gran capacidad para evitar la retención del terreno que presentan las tomas abiertas obteniendo mayor caudal de agua pero con las desventajas de no haber sido filtrada, en este caso el pre-tratamiento del agua requiere especial atención.

A diferencia de la toma cerrada, la actividad biológica presente en el agua, y el ensuciamiento debido a sólidos en suspensión, adquiere gran importancia, por lo que en la toma abierta se debe realizar un estudio minucioso en la fase de pre-tratamiento del agua antes de que llegue a las membranas del núcleo de desalación. Además, se incrementarán los trabajos de limpieza y mantenimiento de los equipos.

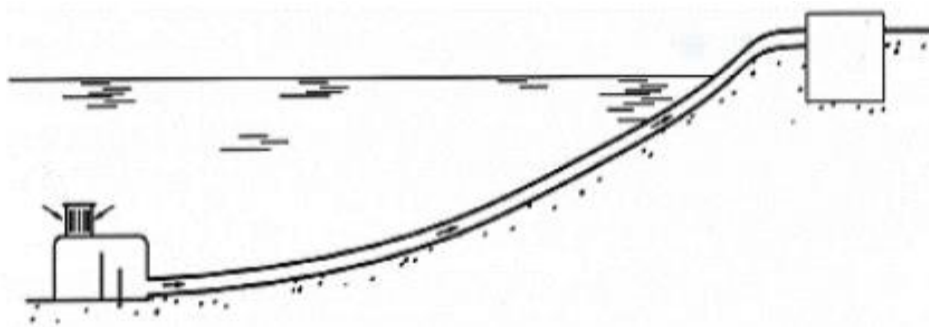


Figura 5. Captación por toma abierta. San Juan Medina.

### 1.3.2 Pre-tratamiento

La finalidad del pre-tratamiento en una planta de OI es la de preparar el agua físico, químico y biológicamente para asegurar una correcta conservación y operación de las membranas, sin que éstas sufran pérdidas de rendimiento ni desperfectos.

El pre-tratamiento del agua de mar pasa por una fase física, que tiene como objetivo eliminar sólidos en suspensión, y una fase química, cuya misión es la de eliminar microorganismos y ajustar el pH del agua.

A continuación se citarán y se describirán brevemente las etapas más comunes en un sistema de desalación por OI:

- Desinfección: Su finalidad es reducir o eliminar la actividad biológica, se suele utilizar hipoclorito de sodio.
- Acidificación: Regula el pH y controla precipitados, se utiliza ácido sulfúrico o bisulfito de sodio.
- Coagulación: Agrupa las partículas en suspensión en flocos mediante aditivos químicos como poli electrolitos o sales de hierro.
- Filtración: Normalmente se realiza a través de un filtro multicapa formado por diferentes tipos de tierras y carbones, su finalidad la de eliminar los flocos de la coagulación y el índice de turbidez (SDI).
- Decloración: Elimina el cloro residual ya que las membranas no suelen tolerar este elemento, se le añaden agentes reductores como bisulfito sódico o lechos de carbón activo.
- Control de precipitados: Evita la incrustación en la membrana de sales poco solubles, se debe utilizar un dispersante o anti incrustante compatible con la membrana.
- Micro-filtración: Es el último paso antes de la bomba de alta presión, se hace pasar el agua por filtros finos de entre 10 y 5 micras para eliminar posibles impurezas restantes.

No todas las etapas de pre-tratamiento anteriormente descritas son imprescindibles para el proceso de desalación, éstas dependerán de la calidad del agua de entrada y la calidad deseada para el agua producto.

### 1.3.3 Módulo de OI

Este módulo consta de tres elementos fundamentales: la bomba de alta presión, membranas y sistemas de recuperación. En el módulo de OI es donde se reduce la salinidad del agua quedando como resultado dos corrientes de agua: una del agua producto, con las características del agua deseada, y otra del agua de rechazo o salmuera, cuya concentración de sales es superior al agua de captación.

En esta etapa se produce el principal consumo energético de las plantas de desalación por OI, el cual representa, en términos generales, de entre el 70 y el 80% del total.

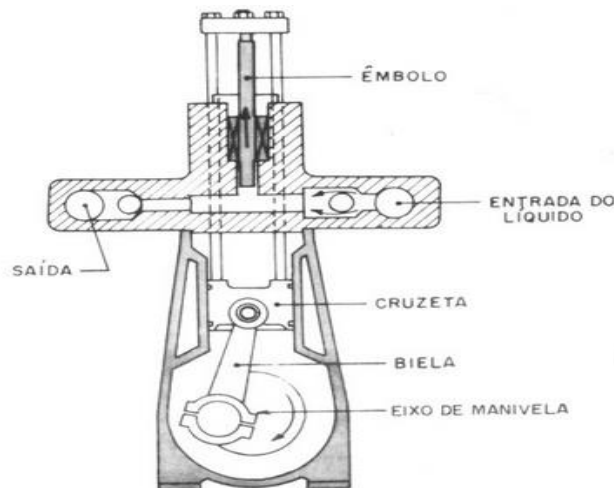
Dado que este es el proceso principal de la desalación por OI, y la gran importancia que adquiere cada uno de sus elementos, se tratarán cada uno de ellos de forma individual a continuación:

#### 1.3.3.1 Bomba de alta presión

Son las encargadas de aportar al agua la presión de desalación, que como se ha comentado anteriormente, debe ser superior a la presión osmótica para que al atravesar las membranas se obtenga el agua desalada.

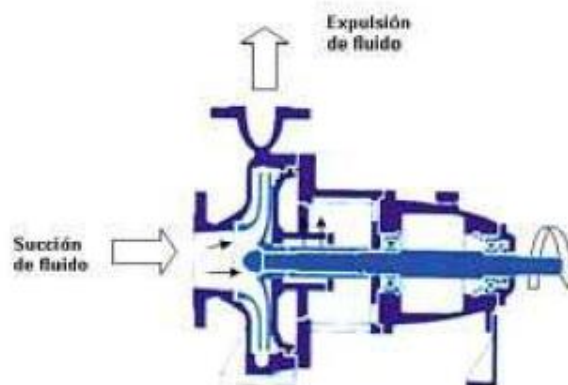
Pueden ser de desplazamiento positivo o centrífugas y resulta indispensable hacer una buena elección de ésta ya es el elemento del sistema que más energía consume. Se citarán las principales características, ventajas e inconvenientes de cada tipo de bomba.

- Bombas de desplazamiento positivo (Figura 6):
  - o Constan de un sistema biela-manivela accionado mediante un motor eléctrico, pueden ser de simple o doble efecto.
  - o Debido a la implantación de válvulas regulables y su principio de funcionamiento, es posible conseguir un gran rango de presiones a cualquier velocidad de rotación pudiendo adaptarse al ensuciamiento de las membranas o variando el caudal de agua, debido a esto, es ideal para plantas de baja capacidad. Su rendimiento hidráulico es muy alto, en torno al 90%, por lo que el consumo eléctrico de la planta se ve reducido.
  - o Sus inconvenientes residen en las pulsaciones de caudal y presión, por lo que requiere elementos de amortiguación, además deben haber instaladas válvulas de descarga por seguridad ante posibles sobrepresiones y el mantenimiento debe ser más frecuente y es más costoso que las centrífugas.



**Figura 6. Bomba de desplazamiento positivo.**

- Bombas centrífugas (Figura 7):
  - o Son las más utilizadas en las desaladoras de OI, se basan en hacer girar un rotor con alabes mediante un motor eléctrico, el agua entra al rotor de forma perpendicular y debido a la rotación, es enviado a la carcasa de forma radial, la cual lo conduce aumentando su presión a la salida de la bomba.
  - o Estas bombas no presentan pulsaciones y tienen un caudal uniforme, los cuales varían de manera directa. La operatividad y el mantenimiento de este tipo de bombas mejora significativamente comparado a las bombas de desplazamiento positivo.
  - o Hay de varios tipos, las más utilizadas son las de segmentos y las de cámara partida. Las primeras presentan rendimientos inferiores al 80% y para tareas de mantenimiento deben ser desmontadas por completo, las segundas tienen rendimientos algo mayores, rondando el 80%, pero son más caras.



**Figura 7. Bomba centrífuga.**

Las características que se deben tener en cuenta ante la selección de un tipo de bomba determinados son principalmente:

- Presión y caudal necesario.
- La durabilidad y tareas de mantenimiento necesarias.
- Rendimiento hidráulico y eléctrico.
- Niveles de ruidos y vibraciones.
- Su costo.

### 1.3.3.2 Membranas

Las membranas son el elemento más importante de la planta de desalación, en ellas es donde se produce el fenómeno físico de la ósmosis inversa. Deben estar preparadas para soportar presiones mayores a la osmótica, en casos de agua de mar esta presión puede oscilar entre los 50 y 90 bares.

El principio de funcionamiento de las membranas es simple, actuando como filtro semipermeable que deja pasar el agua y deja atrás otras sustancias al aplicar cierta presión. Las características principales que deben tener las membranas de OI son las siguientes:

- Poseer un alto nivel de rechazo de sales.
- Tener alta permeabilidad.
- Ser estables en un amplio rango de pH, temperatura y agentes químicos.
- Soportar las altas presiones necesarias para el proceso de desalación.

Hay diversos parámetros por los que se pueden clasificar las membranas, entre los principales podemos diferenciar:

- Estructura: pueden ser simétricas o asimétricas. Las simétricas presentan la misma estructura porosa y propiedades físico-químicas en toda su estructura, en las asimétricas se pueden diferenciar distintas capas, una capa polímera activa y otra porosa de mayor espesor. Las membranas asimétricas son las más utilizadas en la OI debido a su mayor rechazo de sales y permeabilidad.

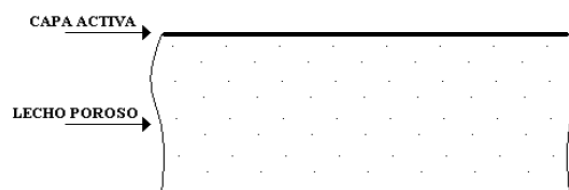
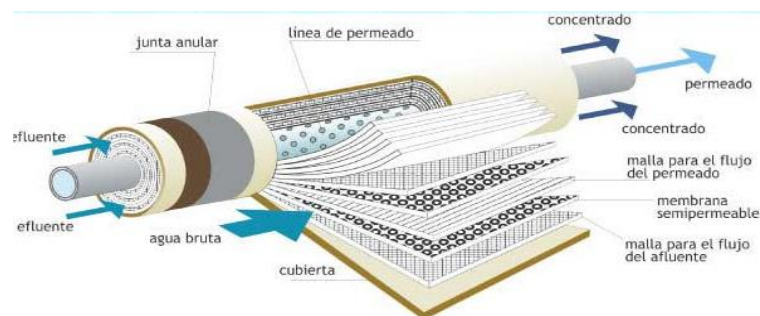


Figura 8. Membrana con estructura asimétrica. ULL

- Configuración: se clasifican en plana, tubular, de fibra hueca y de arrollamiento en espiral. Actualmente las que más se utilizan son las de fibra hueca y las de arrollamiento en espiral debido a su mayor eficiencia, sin embargo, son más sensibles al ensuciamiento y precisan un pre-tratamiento más exhaustivo que las planas y tubulares.



**Figura 9. Membrana de arrollamiento en espiral. Aguapotable.com**

La vida útil de las membranas depende del tipo de material del que estén fabricadas, así como las condiciones de trabajo a las que están sometidas y las condiciones del agua procedente del pre-tratamiento. Se puede estimar una vida útil de entre 2 y 3 años para membranas de celulosa y de hasta 5 años para membranas de poliamidas aromáticas, pero se debe recalcar que dependerá principalmente de la calidad del agua de entrada y la calidad requerida para el producto.

### 1.3.3.3 Sistemas de recuperación de energía

Como ya se ha comentado, el módulo de OI supone el principal consumo de la planta de desalación, por lo que es necesario buscar mejoras que minimicen el consumo energético, la mejora más importante es la de implantar sistemas de recuperación de energía.

La corriente de agua de rechazo que sale de los bastidores de OI apenas ha sufrido una pequeña pérdida de presión, este caudal puede suponer entre un 55 y 60% para agua de mar, así que si se desechara en esas condiciones, se estaría perdiendo la energía de presión que aún conserva. Por este motivo se incorporan sistemas que aprovechan la energía que previamente le ha dado la bomba de alta presión.



Existen distintos mecanismos de recuperación de energía, se explicarán los más importantes y utilizados:

- Turbinas Pelton: Transforman la energía de presión del rechazo de la OI en energía cinética al hacer pasar al fluido por una tobera, el fluido es inyectado a alta velocidad a una rueda con álabes haciéndola girar, para quedar a presión atmosférica. Esta energía de rotación se puede aprovechar mecánicamente, acoplando al eje de la rueda una bomba ya sea centrífuga o de desplazamiento positivo, o eléctricamente, acoplando un generador eléctrico. Su rendimiento varía entre el 75 y el 90%.

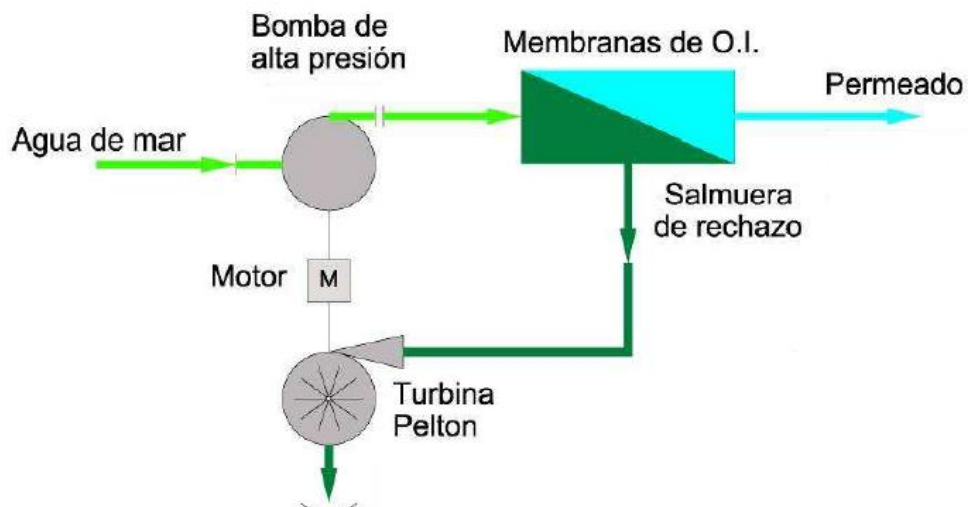


Figura 10. Esquema general de planta de OI con turbina Pelton. Acciona

- Turbinas de contrapresión: Funcionan de manera inversa a las bombas centrífugas. A éstas entra el agua de rechazo de la OI y la presión hace girar el rotor. Su rendimiento es inferior a las turbinas Pelton, entre el 70 y 80%, y precisas de válvulas reguladoras de caudal y presión para su correcto funcionamiento. Se pueden acoplar a bombas centrífugas o generadores eléctricos.
- Turbo-bomba integral: La bomba centrífuga de alta presión eléctrica se monta conjuntamente en la misma carcasa, y sobre el mismo eje, con una turbina Pelton o de contrapresión, de esta manera, la energía de rechazo pasa directamente al caudal de alimentación. Su uso se limita a espacios reducidos ya que el rendimiento que presentan es bajo respecto a otros sistemas de recuperación, rondando valores de entre el 65 y 78%.

- Turbo-changer: Funciona de manera similar a la turbo-bomba, pero en este caso se elimina la parte eléctrica de la bomba centrífuga, se puede poner en cualquier parte de la instalación requiriendo otro tipo de bomba para compensar la pérdida de presión. Tiene bajo coste de operación y mantenimiento, pero su rendimiento es bajo, entre el 40 y el 70%, son utilizadas generalmente en plantas de pequeña capacidad.

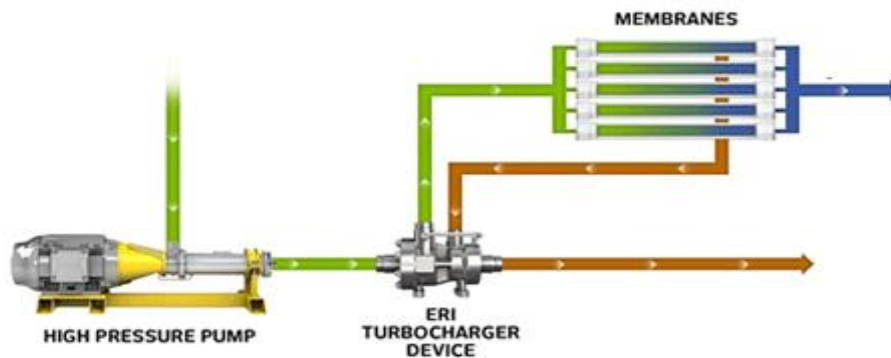


Figura 11. Esquema de OI con sistema Turbo-changer. EnergyRecovery

- Intercambiador de presión: Son dispositivos que transfieren directamente la alta presión del rechazo al agua de alimentación sin convertirla previamente en otro tipo de energía. Consta de dos cilindros con discos desplazables en su interior y un conjunto de electroválvulas que regulan el paso y dirección del agua. Los cilindros tienen entrada por el primer extremo al agua de alimentación y por la segunda al rechazo de alta presión, mediante el desplazamiento del disco se transfiere la presión del rechazo al agua de alimentación. A la salida por el primer extremo el agua de alimentación va a la membrana, como la presión de rechazo es ligeramente inferior a la de alimentación y hay pérdidas internas en el intercambiador, debe pasar primero por una bomba auxiliar (bomba booster) para llegar a la presión de alimentación, por el segundo sale el agua de rechazo a baja presión. Estos sistemas presentan rendimientos muy altos, entre el 95 y 98%, por eso son los más utilizados en las plantas modernas, aunque como inconveniente nos encontramos con que una pequeña parte del agua que pasa por el intercambiador se mezcla añadiendo sales al agua de alimentación. Con la Figura 12 resulta más sencillo de entender el proceso del intercambio de presión.

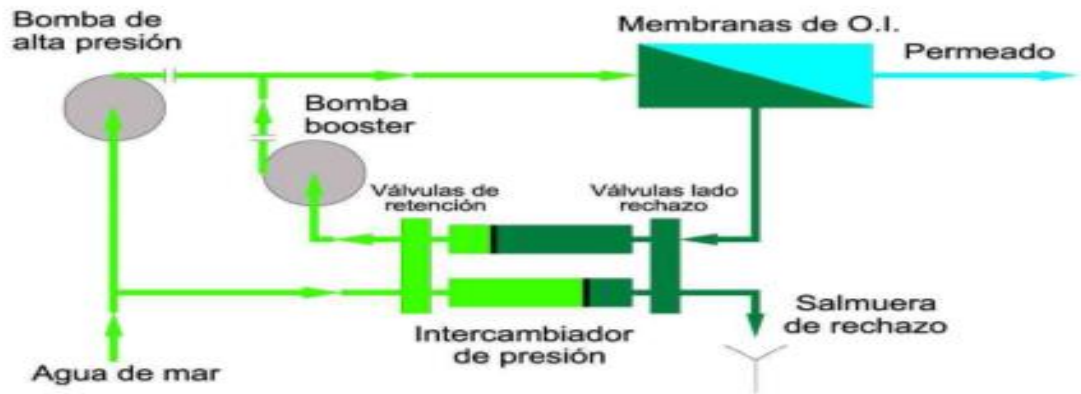


Figura 12. Esquema de OI con intercambiador de presión. Acciona.

### 1.3.3.4 Bastidores, configuración de etapas

Debido a que las membranas tienen una capacidad de desalación limitada, éstas se ensamblan en serie en tubos resistentes a altas presiones denominados permeadores, y a su vez, estos permeadores se agrupan en estructuras metálicas denominadas bastidores, los cuales contienen las conducciones del agua de alimentación, rechazo y permeado.

Las etapas representan el conjunto de permeadores que trabajan en paralelo, a la misma presión, y tienen en común la línea de alimentación. Para obtener grandes valores de conversión se utilizan varias etapas, eliminando el rechazo en serie o haciendo recircular el rechazo, sin embargo, se elevan las pérdidas de carga por los sucesivos pasos por los permeadores y la calidad del agua producto empeora, además el coste de la instalación se incrementará.

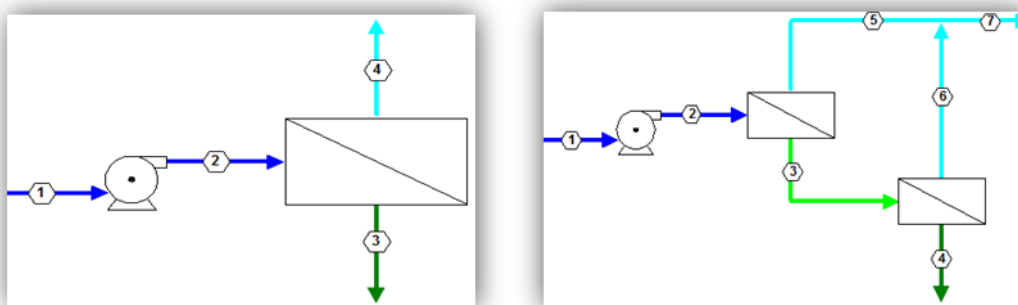


Figura 13. Sistema de OI de 1 y 2 etapas. IMSdesing

### 1.3.4 Post-tratamiento

El post-tratamiento del agua depende fundamentalmente del uso al que vaya a estar destinada. El agua permeada tiene muy baja mineralización, carácter agresivo y un pH relativamente bajo, entre 6 y 6,5.

En algunos casos no es necesaria aplicar la fase de pos-tratamiento a los procesos de desalación, esto sucede generalmente cuando el agua va destinada a usos industriales o riego. Por el contrario, cuando el agua está destinada al consumo humano se suelen realizar dos tipos de pos-tratamientos:

- Neutralización de acidez carbónica mediante alcalinizantes. Generalmente hidróxido o carbonato de calcio para proporcionar dureza y ajustar el Índice de Langelier.
- Adición de desinfectantes o cloro para evitar la contaminación del agua tratada.

### 1.3.5 Suministro

El sistema de suministro del agua tratada consta de la estación principal de bombeo, tuberías principales, tanques de almacenamiento, válvulas estranguladoras y sistemas de tuberías secundarios y terciarios.

Por lo general los tanques deberán poder compensar la variación del consumo según el momento del día y tendrán cierta capacidad extra para situaciones extraordinarias. Éstos pueden estar apoyados en el suelo o elevados y siempre que sea posible estarán a costas superiores a los puntos de consumo de abastecimiento de agua para así evitar la necesidad de bombeo.



Figura 14. Tanque de agua potable elevado en Paraguay.

### **1.3.6 Mantenimiento, limpieza y conservación**

Se puede definir el mantenimiento como el conjunto de operaciones encaminadas a conseguir un funcionamiento y duración óptimos de la planta de desalación, y a su vez, garantizar la calidad del agua producida.

El mantenimiento se realiza en cada uno de los procesos de la desalación en los equipos que lo requieran, prestando especial atención al módulo de OI, seguido del resto de bombas, filtros de pre-tratamiento y resto de equipos auxiliares como válvulas, dosificadores, sistemas de regulación, etc.

## 2 ANEXO II. ENERGÍA EÓLICA

En este anexo se realizará una introducción teórica a la energía eólica así como las principales partes y características de los aerogeneradores y condiciones a tener en cuenta a la hora de seleccionar el emplazamiento de un parque eólico.

### 2.1 Recurso eólico

La energía eólica es la energía que se obtiene a partir de la energía cinética que poseen las corrientes de aire, esta energía generalmente se transforma en energía eléctrica, aunque puede ser transformada en energía mecánica u otro tipo de energía de interés humano.

Gracias a una pequeña parte de la energía que llega del sol, aproximadamente el 2%, se produce el calentamiento del aire, por lo que su densidad varía, haciendo que las masas de aire se desplacen de donde hay más presión a donde hay menos presión. El desplazamiento de estas masas de aire genera el viento. De todo esta energía del viento una tercera parte se disipa a un kilómetro del suelo, y de la restante, solo puede ser utilizada como potencial eólico un tercio.

A grandes rasgos existen dos tipos de vientos:

- Vientos geostróficos: También llamados vientos globales, son generados por los gradientes térmicos en la superficie del planeta, las variaciones de presión y por las fuerzas de Coriolis debido al movimiento de rotación, apenas se ven perturbados por la superficie de la tierra y se miden con globos sonda a alturas de 1000 m a partir del nivel del suelo.

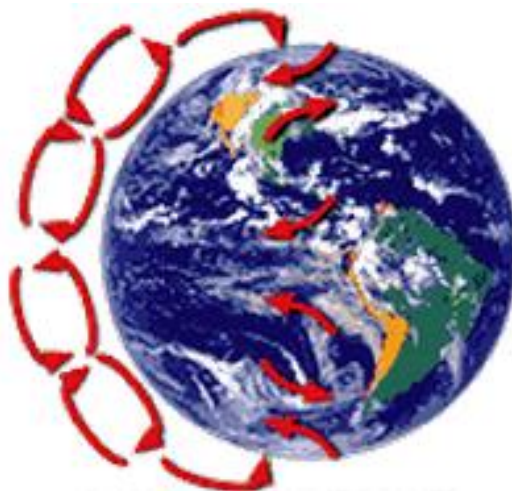


Figura 15. Patrón de circulación de vientos globales. WindPower.

- Vientos de superficie: Estos vientos son los aprovechables al tratarse la energía eólica convencional, se ven influenciados por la superficie del terreno, su rugosidad, obstáculos... Se miden hasta a 100 m de altitud mediante anemómetros similares a los de la Figura 16, de los que se obtiene tanto la velocidad como la dirección del viento.



**Figura 16. Anemómetro. WindPower.**

Los aerogeneradores son las máquinas encargadas de transformar la energía eólica en energía mecánica, y a su vez, aprovechar esta energía mecánica para generar electricidad. La energía cinética del viento hace mover las palas del aerogenerador, este movimiento se transfiere al eje de un rotor, que tras pasar por un multiplicador que aumenta las revoluciones de salida con respecto a las de entrada, se adapta el generador eléctrico para transformar la energía mecánica en electricidad. A grandes rasgos existen dos tipos de aerogeneradores:

- De eje horizontal: Son los más utilizados y permiten cubrir desde potencias inferiores a 1kW hasta potencias superiores a 1MW. Estos generadores precisan de mecanismo de orientación y permite alcanzar grandes alturas debidos a que, como se verá a continuación, los mecanismos de generación se montan sobre un mástil o torre.



**Figura 17. Generador de eje horizontal. Gamesa**

- De eje vertical: Estos generadores tienen menor producción energética que los de eje horizontal, además, requieren un sistema de arranque para facilitar su puesta en marcha. No necesitan mecanismo de orientación y son utilizados generalmente como sistemas auxiliares o para cubrir potencias relativamente bajas.



**Figura 18. Aerogenerador de eje vertical. WindPower.**

La energía que produce un aerogenerador está determinada por la velocidad del viento que atraviesa sus palas, la densidad del aire y la superficie barrida por sus alas. La característica fundamental del aerogenerador es su curva de potencia, que representa el rango de velocidad de viento con el que es capaz de operar y la potencia producida asociada a dicha velocidad.



## 2.2 Aerogeneradores eje horizontal

Cómo se comentó anteriormente, son los aerogeneradores de eje horizontal los más utilizados actualmente. Su eje de rotación es paralelo al suelo y el motivo por el que este tipo de generadores se ha impuesto ante los aerogeneradores de eje vertical, es por su elevada eficiencia y confiabilidad, menor costo de mantenimiento y su amplio abanico de posibilidades frente a la potencia a instalar.

Para entender mejor el funcionamiento de éste tipo de aerogeneradores se utilizará la Figura 19, que servirá para hacer referencia a los componentes principales y su función.

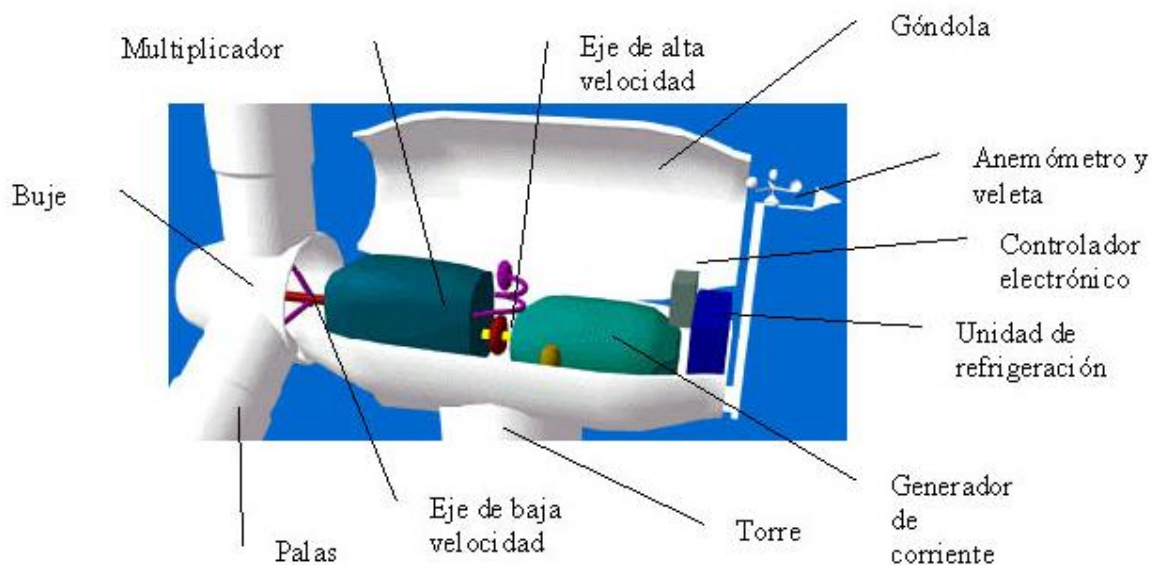


Figura 19. Componentes de un aerogenerador de eje horizontal. Windpower.

### 2.2.1 Componentes de un aerogenerador de eje horizontal

- Torre: Suelen ser de estructura esbelta y alta, dado que a más altura la velocidad del viento aumenta. Es el soporte de la góndola y el rotor, y su altura puede variar entre unos 30 y 120 metros según el modelo. Pueden ser tubulares, requieren una escalera interior para subir, o torres de celosía, más económicas.
- Góndola: Es la estructura que aloja los elementos mecánicos y eléctricos del aerogenerador.

- Palas: Son las encargadas de transformar la energía cinética del viento en energía de rotación, y transmitir la potencia al buje. Se diseñan de forma similar a las alas de los aviones, teniendo en cuenta criterios acústicos para su diseño.
- Buje: Es el mecanismo de unión entre las palas y el eje de baja velocidad, encargado de transmitir el giro al multiplicador.
- Multiplicador: Consiste en un conjunto de engranajes que, mediante unas determinadas relaciones de transmisión, consigue aumentar la velocidad de rotación hacia el eje de alta velocidad, para que este haga girar el generador eléctrico.
- Freno mecánico: Funciona como mecanismo de emergencia que se utiliza para labores de mantenimiento o de fallo del freno aerodinámico, está situado en el eje de alta velocidad ya que precisa de menos fuerza para realizar la detención.
- Generador eléctrico: Pueden ser de distintos tipos, los más utilizados son los síncronos y asíncronos, aunque también pueden ser utilizados generadores con excitación por imanes permanentes. Su función es la de transformar la energía mecánica de rotación en energía eléctrica.
- Controlador electrónico: Es un procesador que se encarga de que el aerogenerador funcione de manera segura y eficiente, para ello controla la orientación de la góndola, la posición de las palas y regula la potencia entregada por la máquina.
- Mecanismo de orientación: Hace girar la góndola sobre la torre para orientar la turbina, optimizando la producción en función de la dirección del viento. Es gobernada por el controlador electrónico.
- Unidad de refrigeración: Evita que el generador eléctrico se caliente excesivamente, consta de un ventilador y, en algunos casos, de un sistema de refrigeración por aceite o agua.
- Anemómetro y veleta: Miden la velocidad y la dirección del viento, sirven para proporcionar información al controlador electrónico. La función del anemómetro es poner en marcha o parar el aerogenerador, y la veleta hace girar la góndola mediante el mecanismo de orientación.

## 2.3 Emplazamiento

Para la selección del emplazamiento de un aerogenerador o de un parque eólico, se deben considerar una serie de factores.

Lo primero que se debe considerar es mapa eólico de la zona o la rosa de los vientos para tener una idea del potencial de la zona, sin embargo, la presencia de obstáculos, excesiva rugosidad en la dirección predominante del viento, dificultad de acceso, etc. pueden ser factores determinantes a la hora de realizar la elección.

A continuación se comentarán las más significativas:

- Rugosidad y cizallamiento: En general, a medida que se coge altura desde el suelo la velocidad aumenta, cuanto más pronunciada sea la rugosidad del terreno más lento será el aumento del viento en función de la altura a la que estemos situados. Bosques o grandes ciudades dificultan el aumento de la velocidad del viento con la altura, sin embargo, mares o desiertos favorecen que el viento aumente rápidamente de velocidad al separarnos del suelo.

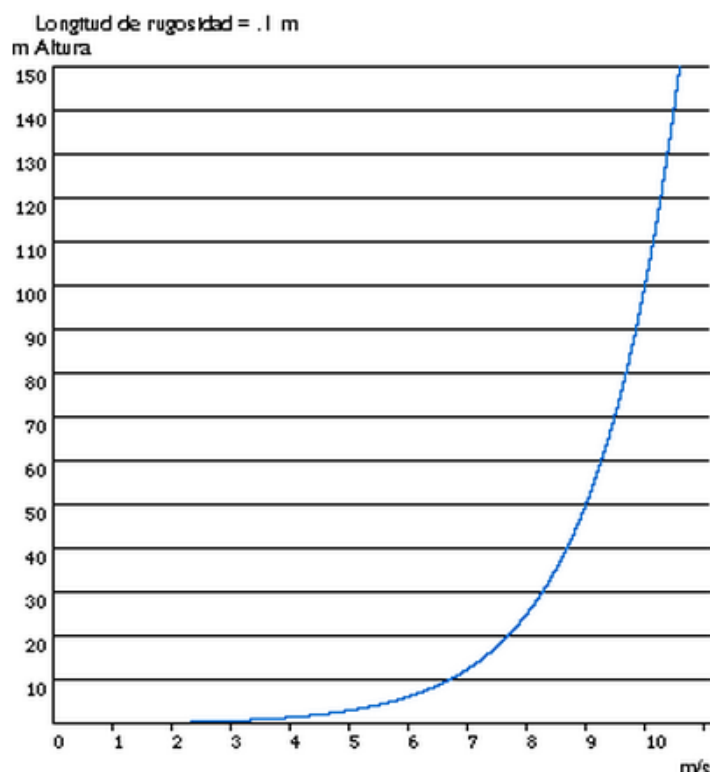


Figura 20. Ejemplo de gráfica de velocidad del viento frente a la altura. WindPower.

- Turbulencias y obstáculos: En áreas con superficies muy accidentales o con obstáculos se producen turbulencias, flujos de aire muy irregulares, remolinos y vórtices. Este efecto disminuye la efectividad de los aerogeneradores e incrementan la posibilidad de roturas y desgastes debido a las fluctuaciones que produce la fatiga de los elementos constructivos. Cuando hay obstáculos es recomendable alejarse cierta distancia para evitar el efecto abrigo, disminución de la velocidad del viento tras rebasarlo.

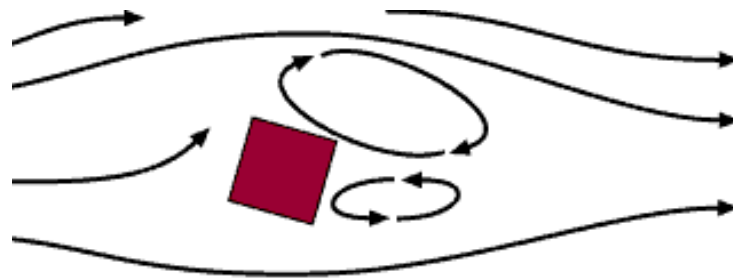


Figura 21. Efecto de obstáculos en la acción del viento. WindPower.

- Efecto estela/parque: El efecto estela hace referencia al efecto que tiene el aerogenerador en el aire que lo atraviesa, tras pasarlo, el aire adquiere turbulencias que son desaconsejables para obtener energía eólica. Por esto en los parques eólicos se tiene en cuenta la separación entre los aerogeneradores, minimizando que algunos sufran el efecto estela o efecto parque.
- Efecto túnel/ colina: El efecto túnel sucede al pasar el aire por un estrecho o entre dos obstáculos con buenas características aerodinámicas, el air se comprime adquiriendo velocidad, lo que hace que el potencial eólico aumente, igualmente sucede cuando el viento asciende por una colina aerodinámica, donde aumenta su velocidad. Por lo general es un efecto favorable aunque se deberá tener en cuenta la influencia de las turbulencias.



Figura 22. Efecto túnel. WindPower.

- Proximidad a red eléctrica: Cuando se pretenden instalar grandes aerogeneradores o estos no constan de un sistema de almacenamiento de energía adecuado se debe tener en cuenta la proximidad a la red eléctrica. La red eléctrica debe ser capaz de recibir la electricidad que proviene del generador y, si fuera necesario, cubrir la demanda eléctrica en sistemas donde el aerogenerador no puede satisfacerla por completo.
- Suelo y accesibilidad: Se deben disponer de los permisos legales para la instalación de este tipo de equipos, donde se tendrá en cuenta la calificación del tipo de suelo y la influencia que éstos tengan en el entorno, tanto visual como acústicamente. Además la falta de acabildad para la instalación podría ser un factor determinante, al igual que la falta de consistencia del suelo para la cimentación necesaria.

## 2.4 Conexión

Según su arquitectura y utilización, las instalaciones eólicas se dividen en dos grande grupos: sistemas aislados (sistemas autónomos sin conexión a la red eléctrica) y sistemas conectados a las red eléctrica. En casos en los que una misma instalación se emplee para más de un punto de demanda, se podrían hacer sistemas híbridos o mixtos que constan de ambos sistemas según para qué punto de demanda.

Se debe tener en cuenta que la energía producida por un aerogenerador varía en función de la velocidad del viento, y ésta a su vez, depende de la hora del día y la época del año, por lo que es difícil adaptar directamente la energía producida a un punto de demanda que requiera cierta estabilidad, ya que no siempre las horas de mayor consumo coinciden con las horas de mayor velocidad de viento. Se buscan alternativas a los sistemas aislados sin acumulación mediante sistemas con acumulación o sistemas conectados a la red eléctrica.

### **2.4.1 Sistemas aislados**

Por lo general se realizan cuando no se dispone de una conexión a la red eléctrica pública o resulta excesivamente cara su instalación. Normalmente son utilizadas en zonas rurales, iluminación aérea aislada, sistemas de telecomunicaciones, bombeo de agua, etc.

Dentro de los sistemas aislados se pueden diferenciar los sistemas con acumulación y los sistemas sin acumulación:

- Los sistemas con acumulación disponen generalmente de una serie de baterías que permiten el consumo de corriente aunque no haya suministro de energía eólica en ese momento, siempre y cuando hayan sido previamente cargadas, son los más utilizados.
- Los sistemas sin acumulación únicamente disponen de suministro energético cuando está presente la energía eólica, por lo que su utilización se ve reducida, quedando limitado a principalmente a sistemas de bombeo de aguas.

### **2.4.2 Sistemas conectados a la red eléctrica**

La opción más barata y sencilla de aprovechar la energía eólica es conectando los aerogeneradores a la red eléctrica. En estos sistemas, el potencial eólico se puede diseñar para equilibrar la demanda total en un cierto periodo, generalmente anual, o para abastecer cierta parte de éste. A continuación se citarán las tres situaciones suceden en sistemas diseñados para equilibrar la demanda:

- La demanda es mayor que la generación: En este caso la energía eléctrica generada por los aerogeneradores no es suficiente para abastecer la demanda, por lo cual, la red eléctrica suple dicho déficit. Esto sucede generalmente cuando la velocidad del viento es baja.
- La demanda es igual a la generación: En este caso toda la electricidad que producen los aerogeneradores se suministra directamente al punto de demanda sin requerir abastecimiento de la red. Es una situación transitoria y muy puntual ya que requiere un equilibrio exacto de producción/demanda.
- La demanda es inferior a la generación: La energía generada por el aerogenerador es superior a la que se demanda, por lo que el excedente de energía es suministrado a la red eléctrica. Esta situación se da cuando la velocidad del viento es alta.

En estos sistemas el encargado de compensar los momentos de más o menos potencia eólica generada, es la compañía eléctrica, lo cual simplifica se simplifica la instalación pasando a la compañía el inconveniente de adaptarse a las necesidades de la demanda.

## 2.5 Aspectos medio ambientales

Desde el punto de vista medioambiental los aerogeneradores o parques eólicos representan varios inconvenientes.

### 2.5.1 Impacto visual

Los aerogeneradores son altamente visibles debido a su altura y longitud de sus palas, por ello, para hacer más armónica su imagen, se buscan disposiciones geométricas simples, como lineales o adaptadas a contornos, y colores que no destaquen con el entorno, además de la adaptación del tamaño, donde los grandes generadores además de tener más velocidad de viento se tiene la ventaja de que el elemento móvil está a más altura. El parque eólico de Kappel de la Figura 23 refleja la estética de un parque eólico bien diseñado.



Figura 23. Parque eólico de Kappel. Dinamarca.

---

## **2.5.2 Impacto acústico**

---

Existen dos tipos de ruidos implícitos en el funcionamiento de los aerogeneradores: los mecánicos, que se reducen fácilmente con técnicas de aislamiento acústico convencionales, y los aerodinámicos, éstos son producidos por las puntas de las palas del aerogenerador.

Los ruidos aerodinámicos son determinantes a la hora del diseño de un aerogenerador, por lo que actualmente se diseñan palas con puntas más silenciosas que reducen las emisiones sonoras a costo de reducir ligeramente la velocidad.

---

## **2.5.3 Avifauna, flora y terreno**

---

La influencia de los aerogeneradores en las aves es menor a la de otros elementos como líneas de alta tensión o edificios, incluso algunas aves aprovechan las góndolas de los aerogeneradores para hacer sus nidos. A la hora de la implantación de nuevos parques eólicos se tendrán en cuenta las rutas migratorias de las aves aunque no será un factor determinante debido a que estudios muestran que las aves no colisionan con los aerogeneradores.

Los efectos sobre la flora y el suelo del terreno se ven reducidos únicamente en la etapa de construcción ya que la distancia entre los aerogeneradores es significativa lo que perturba muy poco el suelo.





### 3 ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS

La finalidad del presente anexo es la de explicar los cálculos realizados para obtener los puntos de operación de las bombas del sistema de desalación. En estos cálculos se contemplarán las pérdidas de carga en las conducciones, datos necesarios para el correcto dimensionado de las bombas de captación y suministro.

#### 3.1 Diámetros de tubería y pérdidas de carga

Las pérdidas de carga, son pérdidas de presión de un fluido al pasar por un conducto, se originan por la interacción entre sus moléculas al desplazarse y por el contacto con la superficie de la conducción.

Éstas se calcularán para las tuberías de alimentación a la desaladora, para la tubería de suministro hacia el depósito y para el agua de rechazo, que será vertida por emisario submarino. No se tendrán en cuenta las tuberías internas de la instalación debido a su escasa longitud respecto a las estudiadas. Además, las pérdidas de carga debido a accesorios (codos, válvulas, etc.) se tomarán como un 5% de las pérdidas debido a la conducción principal.

Para realizar el cálculo, inicialmente se considerará una tubería obteniendo un diámetro de referencia por el criterio de Bonnet (1), diámetro mínimo recomendado para que las pérdidas de carga no adquieran gran importancia, y a partir de éste, se buscará un diámetro de tubería comercial aproximado.

$$D_{Bonnet} = 0.835 * Q^{2/5} \quad (1)$$

- $D_{Bonnet}$ : Diámetro mínimo en metros por el criterio de Bonnet.
- Q: Caudal del fluido en m<sup>3</sup>/s.

$$V = \frac{4 * Q}{\pi * D^2} \quad (2)$$

- V: Velocidad del fluido en m/s.
- D: Diámetro real la tubería en m.

En la Tabla 2 se muestran los caudales correspondientes a cada tipo de agua (producto, rechazo y alimentación total e individual de cada bomba) con el diámetro mínimo obtenido por el criterio de Bonnet y el diámetro comercial elegido. Por último se muestra la velocidad del agua en el conducto obtenida por la ecuación (2), dato que será necesario en el siguiente paso del proceso de cálculo de pérdidas de carga.

Caudal	m <sup>3</sup> /seg	kg/seg	Øbonnet (m)	Øcomercial (m)
Q(Producto)	0,0231	23,08	0,19	0,20
Q(Rechazo)	0,0283	29,65	0,20	0,20
Q(Alimentación)	0,0514	52,73	0,25	0,25
Q(B. Alimentación)	0,0257	26,36	0,19	0,20

Tabla 2. Diámetros de tuberías

Para estos cálculos se ha considerado una conversión del 45% como ha mencionado en la memoria.

El obtener diámetros iguales en la tubería de rechazo, de producto y las de las bombas de alimentación hace que la instalación sea más eficiente desde el punto de visto constructivo, puesto que se podrán tener menos elementos como válvulas, bridas, codos... de repuesto en almacén.

Las pérdidas de carga (Hr) se calcularán mediante la ecuación (3), correspondiente a Darcy-Weisbach, donde intervienen la longitud de la tubería, su diámetro, la energía cinética del fluido que la atraviesa y un coeficiente de fricción que se calculará a continuación.

$$Hr = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} \quad (3)$$

- Hr: Pérdidas de carga expresada en metros.
- L: Longitud de la tubería.
- g: Gravedad (9,81m/s<sup>2</sup>)

El siguiente paso en el cálculo de las pérdidas de carga, es determinar el factor de fricción (f), para ello se tendrán en cuenta las propiedades del fluido, su velocidad y la rugosidad del material de la tubería.

El factor de fricción se determinará por la fórmula de Haaland (5), ya que no precisa de proceso iterativo ofreciendo un error menor al 2%, esta correlación se considera aceptable para fluidos en régimen turbulento, por lo que también se comprobará que el agua presenta números de Reynold (Re) superiores a 3000.

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (4)$$

- $\nu$ : Viscosidad cinemática del fluido en  $m^2/s$ .

$$f = -1,8 * \log \left[ \left( \frac{k/D}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right]^{-2} \quad (5)$$

- k: Rugosidad del material de la tubería, 0,029 mm.

Se ha tomado la viscosidad cinemática ( $\nu$ ) del agua pura a 20°C con un valor de  $8,93 \cdot 10^{-7} m^2/s$  y este valor será utilizado para el cálculo de todos los flujos independientemente de la concentración de sales.

El material de las tuberías es PRFV, con una rugosidad (k) de 0,029 mm, se pueden ver más detalles de éste material en el 9.1.4 TUBERÍAS de la memoria.

Caudal	Reynold	L (m)	f (Haaland)	Hr (m)	% Accesorios	Hrt (m)
Q(Producto)	165023	180	0,017	4,23	5%	4,44
Q(Rechazo)	201695	300	0,016	10,22	5%	10,73
Q(Alimentación)	293375	200	0,015	5,52	5%	5,80
Q(B.Alimentación)	183359	50	0,017	1,43	5%	1,50

**Tabla 3. Pérdidas de carga.**

En la Tabla 3 se muestra como todos los flujos son turbulentos, con Reynold superiores a 150000, entonces la fórmula de Haaland, utilizada para determinar el factor de fricción (f), es apropiada.

La columna "Hr" hace referencia a las pérdidas de carga debido a la conducción, y la columna "Hrt" a las pérdidas de carga totales debido a la conducción más el 5% de dichas pérdidas considerado por los accesorios.

A modo resumen de resultados se han obtenido las siguientes pérdidas de carga para las conducciones:

- En las tuberías de las bombas de alimentación: 1,50m.
- En la tubería de alimentación: 5,80m.
- En la tubería de agua producto: 4,44m.
- En la tubería de rechazo: 10,70m.

### 3.2 Punto de operación de la bomba de alimentación

El punto de operación una bomba se define como la intercepción entre la curva de resistencia del sistema en fusión del caudal y la curva característica de caudal/altura de la bomba.

Para determinar el punto de operación de la bomba de alimentación se realiza un balance de energía (6 y 7) entre la superficie libre de líquido del agua (1) y la entrada a la etapa de pretratamiento (2) y así conocer cuanta energía debe entregar la bomba ( $H_b$ ).



Figura 24. Volumen de control, captación.

$$H1 + Hb = H2 + Hr(6)$$

$$h1 + \frac{v1^2}{2g} + \frac{p1}{\gamma} + Hb = h2 + \frac{v2^2}{2g} + \frac{p2}{\gamma} + Hr \quad (7)$$

$$0 + 0 + 0 + Hb = 18,50 + 0,06 + 24,86 + (5,80 + 1,50)$$

$$0 + 0 + 0 + Hb = 18,50 + 0,06 + 24,86 + 7,30$$

$$Hb = 50,72 \text{ m}$$

Al tomar el caudal mediante dos bombas gemelas en paralelo, el caudal se repartirá equitativamente, pasando por cada una de ellas 26 l/s. Las bombas aportarán una energía expresada en altura de 50,72 m al agua para hacerla llegar a la etapa de pretratamiento con la presión deseada de 2,5 bares superando el desnivel y las pérdidas de carga de la conducción.

Por lo tanto el punto de operación de las bombas de captación será un caudal de 26 l/s y una altura de 50,72 m.

### 3.3 Punto de operación de la bomba de suministro

Se determinará igual que en el caso anterior para la bomba de captación teniendo en cuenta que en este caso solo habrá una única tubería y una única bomba. Ahora el balance de energía a realizar se hará tomando como volumen de control desde la salida del postratamiento (6) hasta la SLL del depósito (7), teniendo en cuenta la altura de 4 metros del depósito, la SLL quedará a 36 metros de la superficie del mar.



Figura 25. Volumen de control, suministro.

$$H_6 + H_b = H_7 + H_r$$

$$h_6 + \frac{v_6^2}{2g} + \frac{p_6}{\gamma} + H_b = h_7 + \frac{v_7^2}{2g} + \frac{p_7}{\gamma} + H_r$$

$$18,5 + 0,03 + 3,07 + H_b = 36 + 0 + 0 + 4,44$$

$$H_b = 36 + 4,44 - 18,5 - 0,03 - 3,07$$

$$H_b = 18,85 \text{ m}$$

En este caso solo se dispondrá de una única bomba en funcionamiento, por lo que el caudal que pasará por ésta es el caudal total del agua producto de 23 l/s, al que deberá aportar una energía de 18,85 m para hacerla llegar a los depósitos.

Como resultados tenemos que el punto de operación de la bomba de suministro será un caudal de 23 l/s y una altura de 18,85 m.

### 3.4 Caudales y presiones del núcleo de desalación

Dentro de un núcleo de desalación dotado de un intercambiador de presión como sistema de recuperación de energía existen dos consumidores energéticos, la bomba de alta presión que representa el principal consumo de la planta, y la bomba boosters cuya función es la de aumentar la presión del agua de alimentación que sale del intercambiador hasta la presión de operación de la membrana, como ya se comentó en el ANEXO I. OSMOSIS INVERSA.

Como simplificación de cálculos, se podría estimar que caudal de agua de rechazo sería igual caudal de agua que pasa por la bomba boosters, y que el caudal de agua producto es igual al caudal de agua que pasa por la bomba de alta presión. Sin embargo, realmente esto no es así, y el agua caudal de agua rechazo es ligeramente mayor al caudal que pasa por la bomba boosters, y por lo tanto, el caudal que pasa por la bomba de alta es algo mayor al caudal de agua producto.

Para determinar estos caudales, y a su vez las presiones en los distintos puntos del núcleo de desalación se procederán a realizar un proceso iterativo entre el software del fabricante de membranas, IMSdesign, y el software del fabricante de intercambiadores de presión, Energy Recovery.

Se iniciará suponiendo los datos de funcionamiento del intercambiador de presión aportados por el software IMSdesign para obtener unos valores de presiones operación en las membranas y de rechazo que utilizarán para conocer las condiciones de operación del intercambiador de presión.

Este primer proceso de iteración ha sido realizado para el dimensionado y selección del modelo de intercambiador de presión en el apartado 9.1.6.1 MEMBRANAS Y CONFIGURACIÓN DE BASTIDORES.

Partiendo de los datos obtenidos en el software de Energy Recovery para esta primera aproximación (una fuga del 1,4%, mezcla volumétrica del 6% y una caída de presión en la etapa de alta del intercambiador (HP) de 0,5 bares), pasamos a introducir estos datos en el IMSdesign para comprobar las nuevas presiones de operación de las membranas.

Este proceso se repetirá hasta que los resultados converjan, obteniendo así los valores de presión de cada uno de los puntos del núcleo de desalación y los caudales de agua de alimentación que fluyen por la bomba de alta presión y por la boosters. En la Figura 26 se muestran los resultados obtenidos en el proceso iterativo en el software IMSdesign.



Resultados Cálculo							CALCULOS DE ERE	
Arreglo	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux.	Beta	Select ERD Type	
1-1	70,8	69,6	8,8	4,9	16,2	1,03	Intercambiador de Presión/Trabajo	
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	Intercambiador de Presión/Trabajo	
1-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	Intercambiador de Presión/Trabajo	
1-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	Intercambiador de Presión/Trabajo	

Resultados Cálculo							CALCULOS DE ERE	
Arreglo	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux.	Beta	Select ERD Type	
1-1	71,1	69,8	8,8	4,9	16,2	1,03	Intercambiador de Presión/Trabajo	
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	Intercambiador de Presión/Trabajo	
1-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	Intercambiador de Presión/Trabajo	
1-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	Intercambiador de Presión/Trabajo	

Figura 26. Iteración IMSdesign.

Tras dos iteraciones los resultados convergen, donde al poner los resultados de 71,1 bar a la entrada de la membrana y 69,8 bar en el rechazo el simulador Energy Recovery vuelve a dar los mismos parámetros de operación del intercambiador de presión terminando con el ciclo. La presión del agua de alimentación y los caudales se muestran en la Figura 27. Correspondiente al resultado final de la iteración.

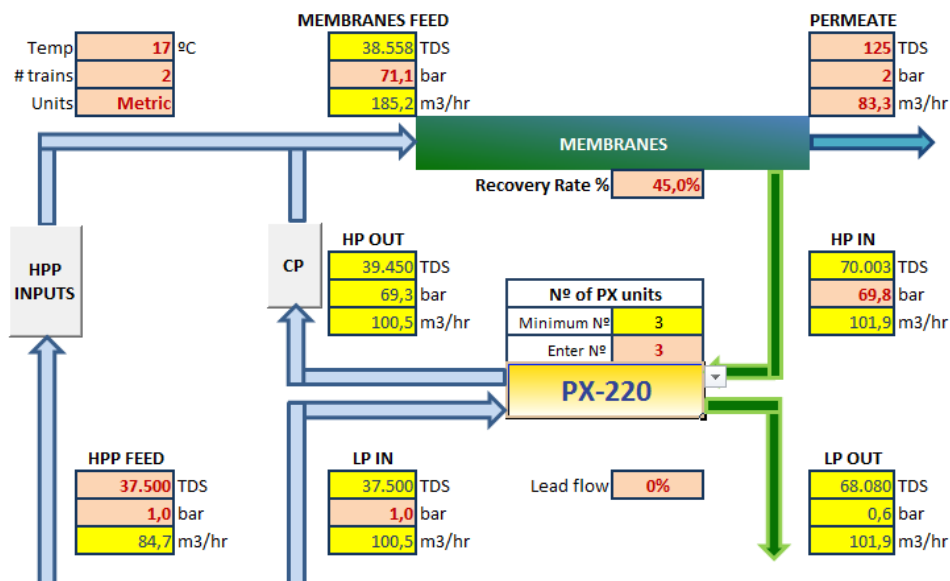


Figura 27. Resultados de caudales en el núcleo de desalación. Energy Recovery.

Como se muestra, el caudal de entrada a la bomba booster será de 100,5 m<sup>3</sup>/hora a una presión de 69,3 bares y el caudal que pasará por la bomba de alta será de 84,7 m<sup>3</sup>/hora. Además se fijará la presión de trabajo en condiciones desfavorables para este estudio (4 años de membranas y 17 °C de temperatura de agua) 71,1 bares a la entrada de la membrana.

### 3.5 Punto de operación de bomba booster

Para finalizar con los puntos de operación de operación de las bombas, se procede a calcular el de la bomba booster. Para ello nuevamente realizamos un balance de energía entre la entrada y la salida de dicha bomba, entre los puntos (9) y (4.2) de la Figura 28.

En este caso se despreciará la variación de energía cinética y potencial ya que las tuberías de entrada y salida se considerarán del mismo diámetro y situadas a la misma altura, además se despreciarán las pérdidas de carga, por lo que en el balance de energía se considerará únicamente la variación de energía de presión.

El caudal que pasa por la bomba boosters se obtiene a partir del software del intercambiador de presión, donde como se mostró en el apartado de caudales y presiones del núcleo de desalación es de 100,5 m<sup>3</sup>/hora.

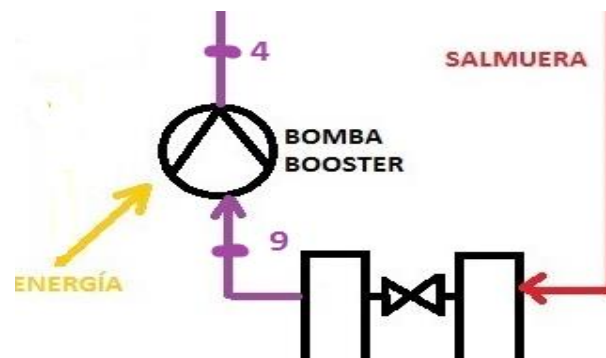


Figura 28. Volumen de control, bomba booster.

$$H_9 + H_b = H_4$$

$$\frac{p_9}{\gamma} + H_b = \frac{p_4}{\gamma}$$

$$689,19 + H_b = 707,09$$

$$H_b = 17,90 \text{ m}$$

En este caso el punto de operación de la bomba es de un caudal de 100,5 m<sup>3</sup>/hora, que corresponde a 27,9 l/s, y una energía hidráulica de 17,90 m.

### 3.6 Punto de operación de bomba de alta presión

El punto de operación de la bomba de alta presión se determina a partir del caudal obtenido en el apartado anterior, el cual es de 84,7 m<sup>3</sup>/hora, y la altura que debe aportar la bomba se determina mediante un balance de energía tomando como volumen de control la propia bomba de alta presión, puntos (3.1) y (4.1) de la Figura 29, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores que se han citado en al obtener el punto de operación de la bomba de alta presión.



Figura 29. Volumen de control, bomba de alta presión.

$$H_3 + H_b = H_4$$

$$\frac{p_3}{\gamma} + H_b = \frac{p_4}{\gamma}$$

$$9,95 + H_b = 707,09$$

$$H_b = 697,15 \text{ m}$$

Con estos datos ya tenemos la información necesaria para obtener el punto de funcionamiento de la bomba de alta presión, donde como se ha comentado, el caudal de agua a bombear es de 84,7 m<sup>3</sup>/día, lo que corresponde a 23,5 l/s, con una energía hidráulica de 697,15 m.

Como era de esperar, la energía hidráulica a entregar por la bomba de alta presión es mayor a la del resto de los componentes debido a que es la gran diferencia de presión entre la entrada y la salida.

### 3.7 Cálculo de recuperación

Como ya se explicó en el ANEXO I. OSMOSIS INVERSA, la recuperación es el porcentaje que representa el agua producto respecto al agua total que entra a la desaladora. Para desalación por OI de agua de mar con una etapa este parámetro ronda entre el 40 y el 50% (José Antonio Medina San Juan).

Antes de comenzar con la análisis y selección de los elementos constructivos se procede a realizar un estudio sobre qué porcentaje de recuperación ofrece un menor consumo específico a la planta. Para ello se realizarán balances de energía entre la entrada y salida las bombas hidráulicas teniendo en cuenta las presiones fijadas para las etapas de pretratamiento y postratamiento, y la presión osmótica y presión de rechazo obtenida en el software IMSdesign (descripción en el ANEXO VI. SOFTWARE ESPECÍFICO), finalmente mediante una hoja de cálculos Excel (ANEXO VI. SOFTWARE ESPECÍFICO) se calculará el consumo específico de la planta para cada una de las conversiones estudiadas aplicando las presiones obtenidas por el software.

Las consideraciones a la hora de realizar los cálculos han sido las mencionadas en el apartado 9.1.2 CONSIDERACIONES GENERALES de la memoria y además:

- Rendimiento de bombas hidráulicas 80%.
- Rendimiento del intercambiador de presión 95%.
- La variación de energía cinética entre la entrada y la salida de las bombas de alta presión y booster se considera despreciable.

Como datos de referencia para calcular las presiones en el software IMSdesing se han tomado los siguientes datos:

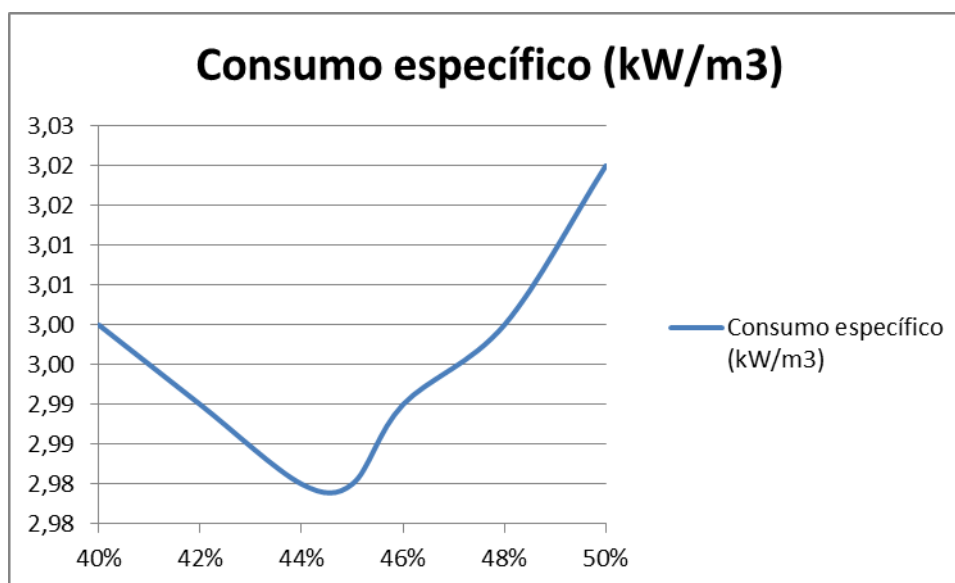
- Propiedades químicas del agua descritas en el 8.2.1 AGUA de la memoria.
- pH de entrada del núcleo de desalación 7.
- Temperatura del agua será la mínima, 17°C, ya que ofrece una mayor presión de operación.
- Edad de la membrana 4 años.
- Disminución de flujo por año, factor de ensuciamiento e incremento de paso de por año definidos por el fabricante Hydranautics (5%, 0,86 y 7% respectivamente).
- Membrana modelo SWC4+ diseñada para agua de mar que otorga un alto rechazo de sales.

Tras realizar la iteración con los diferentes porcentajes de recuperación (desde el 40 al 50%), se obtienen los datos mostrados en la Tabla 4, donde se ve que para cualquier valor de recuperación en el rango propuesto, el índice de boro y la salinidad del agua producto son aceptables, boro menor a 1 ppm y salinidad inferior a 500 ppm.

Recuperación	P. Operación (Bar)	P. Rechazo (Bar)	Boro (ppm)	Sales (ppm)	Consumo específico (kW/m <sup>3</sup> )	Configuración de bastidores
40%	65,5	64,2	0,45	108,30	3,00	6x23
42%	66,6	65,4	0,46	110,90	2,99	6x23
44%	67,7	66,6	0,47	113,50	2,98	6x23
45%	68,3	67,2	0,47	115,00	2,98	6x23
46%	69,0	67,9	0,48	116,50	2,99	6x23
48%	70,3	69,3	0,49	119,70	3,00	6x23
50%	71,8	70,9	0,51	123,30	3,02	6x23

**Tabla 4. Elección de porcentaje de recuperación.**

A continuación se muestra la gráfica del consumo específico de la planta en kW/m<sup>3</sup> frente al rango de recuperación estudiado.



**Figura 30. Consumo específico frente a porcentaje de recuperación.**

Como se puede ver claramente en la Figura 30, el consumo específico de la planta de desalación tiene un mínimo en un intervalo de recuperación de entre el 44 y el 45%, por lo que el valor de recuperación elegido para el estudio es del 45% trabajando con caudales de alimentación ligeramente menores a los que se tendrían con una recuperación del 44% si se fija el agua producto.

### 3.8 Tablas resumen

En la Tablas 5 se muestra un resumen de la energía que tiene cada flujo en cada punto de la instalación. Las casillas en rosado han sido impuestas por diseño (la energía cinética marcando "0" hace referencia a que no se considerará la variación en los balances) y las casillas en verde muestran los datos obtenidos de la iteración entre el software de IMSdesign y Energy Recovery.

Cuadro de estados energéticos en los puntos de la instalación						
Punto	Caudal	Potencial (m)	Cinética (m)	Presión (m)	Tota (m)	Presión (bar)
1	Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Total	18,50	0,06	24,86	43,42	2,50
3	Total	18,50	0,06	9,95	28,50	1,00
31	B. Alta	18,50	0,00	9,95	28,45	1,00
32	Intercambiador	18,50	0,00	9,95	28,45	1,00
4	Total	18,50	0,00	707,09	725,59	71,10
41	B. Alta	18,50	0,00	707,09	725,59	71,10
42	Intercambiador	18,50	0,00	707,09	725,59	71,10
5	Producto	18,50	0,03	5,11	23,64	0,50
6	Producto	18,50	0,03	3,07	21,59	0,30
7	Producto	36,00	0,00	0,00	36,00	0,00
8	Rechazo	18,50	0,00	678,99	697,49	69,80
9	Intercambiador	18,50	0,00	689,19	707,69	69,30
10	Rechazo	0,00	0,00	5,84	5,84	0,60

Tabla 5. Estados energéticos en los puntos de la instalación.

La Tabla 6 muestra los puntos de operación obtenidos para las bombas del sistema de desalación, donde es más fácil comparar la gran diferencia de energía existente entre la bomba de alta presión y el resto de bombas de la instalación.

Punto operación bomba			
Bomba	Q (l/s)	Q (m <sup>3</sup> /h)	H (m)
Captación	25,72	92,59	50,72
Booster	27,92	100,50	17,90
Bomba Alta	23,53	84,70	697,09
Suministro	23,15	83,33	18,85

Tabla 6. Puntos de operación de las bombas.

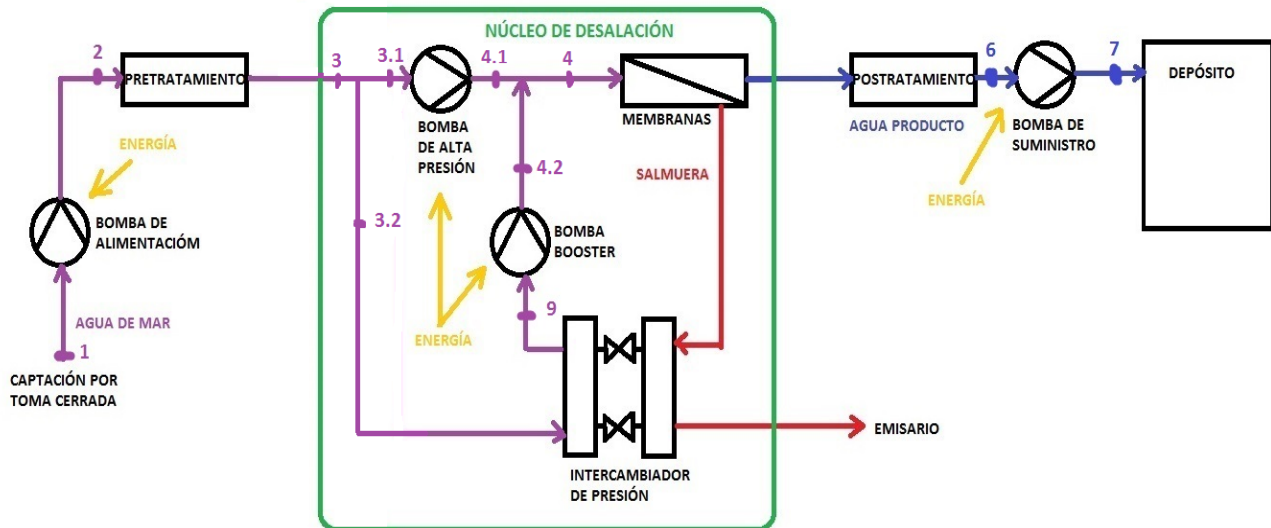


Figura 31. Esquema general de la instalación.

A fin de facilitar la localización de los estados en el esquema de la planta de desalación se facilita la Figura 31 donde se muestran cada uno de los puntos de análisis (números) y los principales equipos.

Para la evacuación de la salmuera es innecesaria la utilización de una bomba hidráulica ya que la energía de presión residual al salir del intercambiador, y la altitud a la que se encuentra, será suficiente para vencer las pérdidas de carga debido a la conducción y verterse a la marea por el emisario submarino.

## 4 ANEXO IV. ELECCIÓN DE EQUIPOS

Se procede a mostrar cuales han sido las consideraciones a la hora de elegir los equipos del sistema y cuales han sido las propuestas barajadas.

### 4.1 Desalación

#### 4.1.1 Bombas de captación

Tras haber calculado el punto de operación de las bombas de captación en el ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS, se pasa a estudiar las posibilidades en el mercado de una bomba que se adapte a las necesidades ofreciendo un alto rendimiento.

Los requisitos de dicha bomba serán los siguientes:

- Caudal de 26 l/s.
- Altura útil 51 m.
- Configuración vertical sumergible.
- Agua de mar como fluido de trabajo.

Los fabricantes de bombas KSB, INGETEAM y EBARA disponen de software que, dado un punto de operación, comparan sus productos y recomiendan aquellos que satisfagan las necesidades ofreciendo un alto rendimiento, por lo que se analizarán las bombas recomendadas por estos fabricantes para luego escoger la que más conveniente resulte para la instalación.

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos en las aplicaciones de los fabricantes con los requisitos mostrados anteriormente.

Fabricante	KSB	INGETEAM	EBARA
Modelo	UPA 200B-80/13	UGP-0840-02	W86BHE 95-4/18,5
Rendimiento	79,5%	76,7%	78,1%
Potencia Motor(kW)	19,00	18,00	18,50

Tabla 7. Evaluación de bombas de captación.

La bomba del fabricante KSB es la que mayor rendimiento hidráulico ofrece, aunque lleva acoplado un motor de mayor potencia eléctrica. Ésta será la bomba elegida para la captación, además, KSB dispone de infraestructura comercial y servicio técnico en España, por estos motivos la bomba UPA 200B-80/13 se considera la mejor elección para la instalación. Se muestran las características de cada bomba.



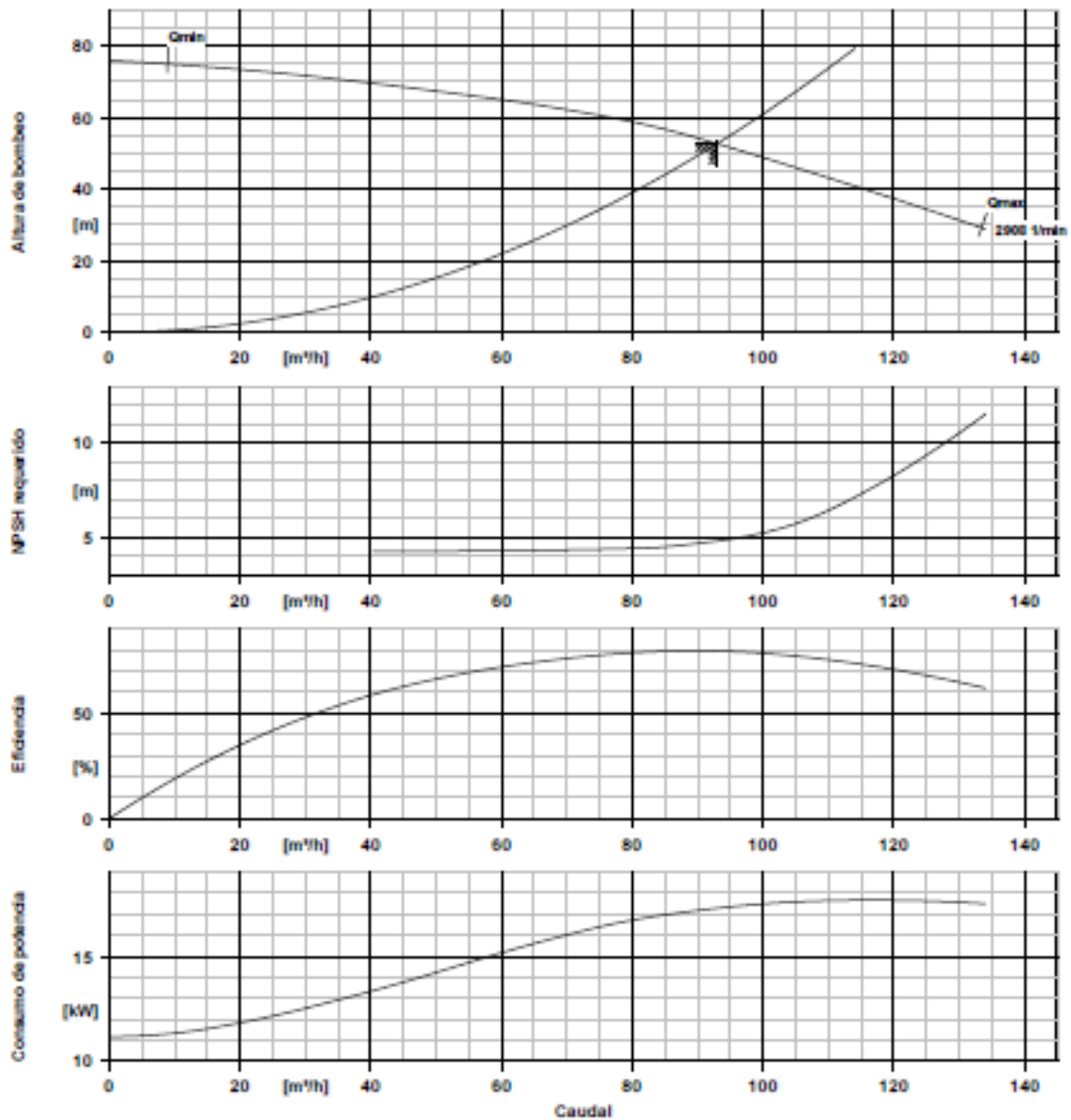
Nº de posición del cliente:  
 Pedido fechado:  
 Doc. no.:  
 Cantidad: 1

Número: ES 3473182  
 Nº de artículo:100  
 Desde: 27/02/2015  
 Página: 1 / 1

UPA 200B- 80/3a UMA 150E 22/21

Versión nº.: 1

Bomba sumergible



**Datos de curvas**

Densidad del fluido	1028 kg/m³	Altura de bombeo requerida	51,00 m
Viscosidad	1,07 mm²/s	Diámetro efectivo del rodete	135,0 mm
Caudal bombeado requerido	93,00 m³/h		

Figura 32. Bomba captación KSB.

# Indar

SP Series  
Bomba centrífuga multietapa UGP

Caudal: 93 m<sup>3</sup>/h  
 Altura: 51 m  
 Rend. Hídr: 78,7 %  
 Potencia eje: 17/23 kW/HP  
 NPSHr: 4,8 m

Fecha: 27/02/2015

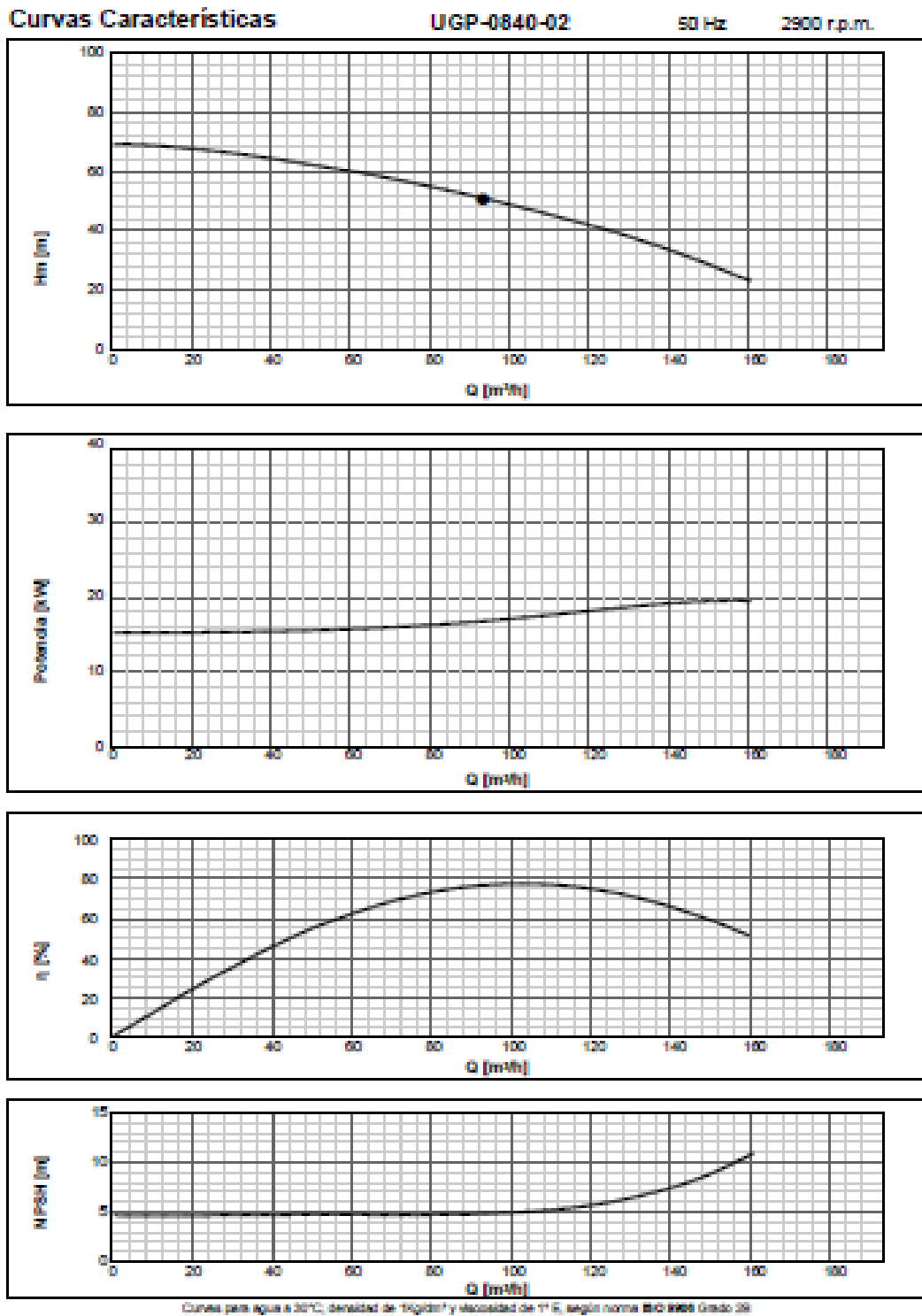


Figura 33. Bomba de captación INGTEAM.

# Curva

Nombre de la bomba: **W86BHE 95-4/18.5**

Customer	Fecha	27-February-2015	Empresa
Contacto	Ref.		Issued by
Teléfono	Proyecto		Teléfono
Correo electrónico	ID proyecto		Correo electrónico

Datos de trabajo teóricos

Bomba

1	Caudal	l/s	28	Operating Flow	l/s	28,9	Impeller Dia. Designed	mm	Ø
2	Altura de impulsión	m	51	Operating Head	m	50,8	Frecuencia	Hz	50
3	Altura geodésica	m	0				Velocidad	1/min	2850

Test standard: ISO 9906-Annex A Agua limpia (100%) ; 20°C; 998,3kg/m<sup>3</sup>; 1m/s

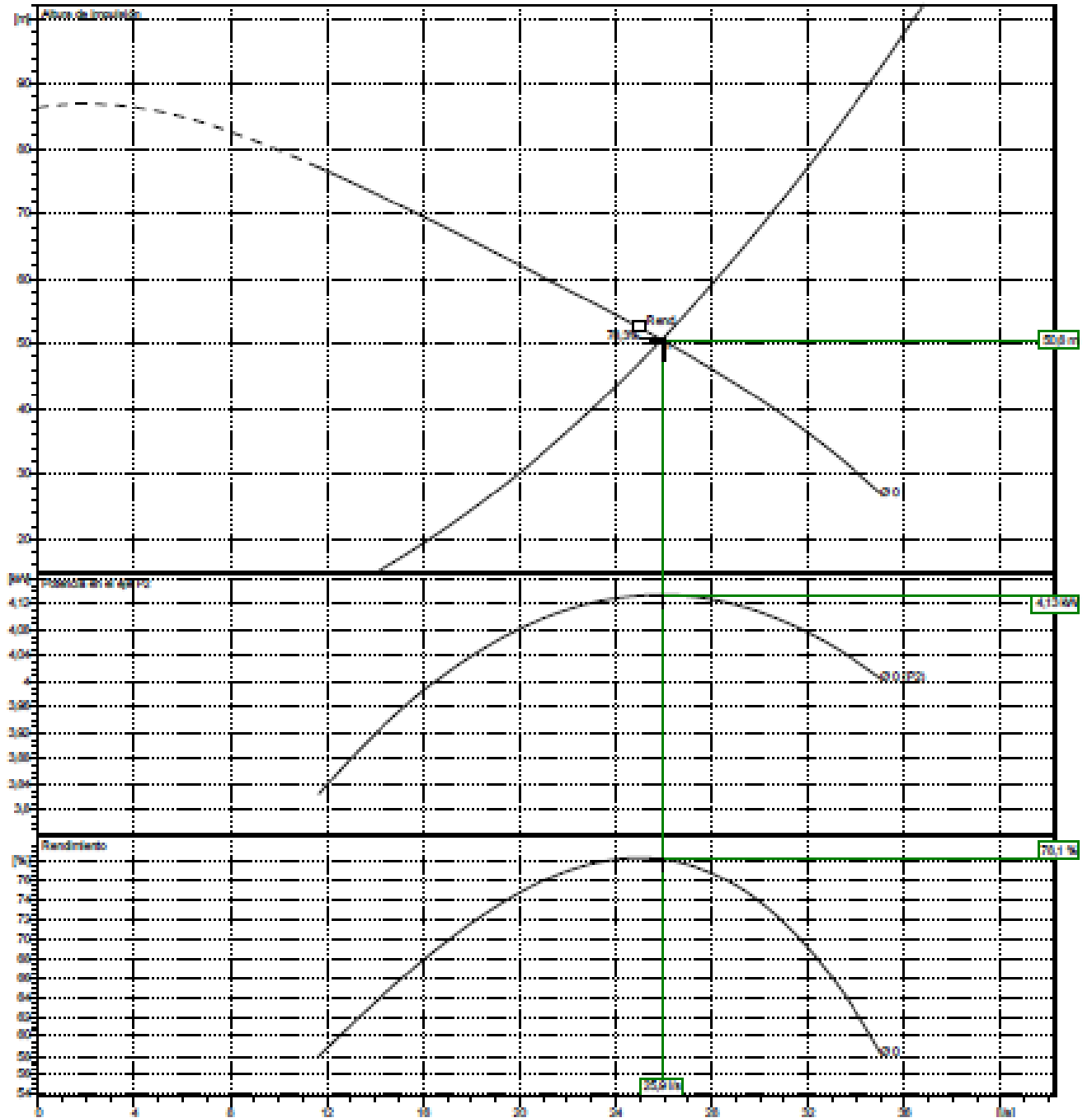


Figura 34. Bomba de captación EBARA.

#### 4.1.2 Bomba de suministro

El punto de operación de la bomba de suministro ha sido calculado previamente en el ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS, así que pasamos a la búsqueda en el mercado de una bomba que satisfaga los requerimientos del sistema con alto rendimiento y bajo consumo eléctrico.

Los requisitos de la bomba de suministro serán los siguientes:

- Caudal de 23 l/s.
- Altura útil 19 m.
- Bomba tipo centrífuga.
- Agua desalada como fluido de trabajo.

Se ha vuelto a realizar la búsqueda con los mismos fabricantes de bombas que se han mencionado en el apartado de bombas de captación (KSB, INGETEAM y EBARA), pero en este caso el fabricante INGETEAM no ofrece ninguna bomba ya que sus bombas centrífugas están diseñadas para abordar caudales mayores, por lo que se analizarán las soluciones propuestas por KSB y EBARA.

La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos para la bomba de suministro recomendada por los fabricantes mencionados.

Fabricante	KSB	EBARA
Modelo	ETB 065-050-125	3D 65-125/7,5
Rendimiento	81,0%	85,6%
Potencia Motor (kW)	5,50	7,50

**Tabla 8. Evaluación de bombas de suministro.**

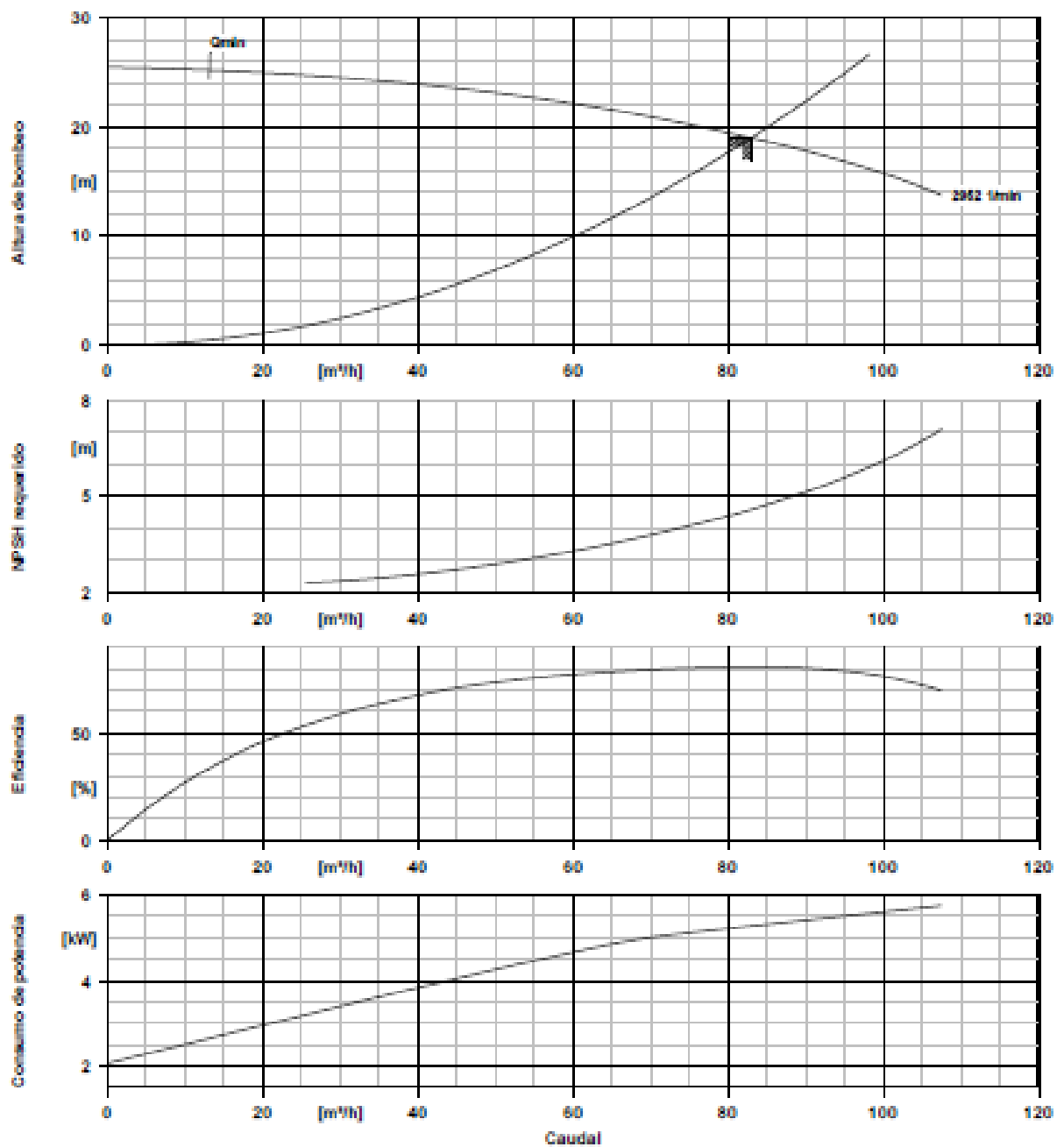
En este caso, la bomba 3D 65-125/7,5 de EBARA ofrece un rendimiento mayor, además, al disponer de un motor eléctrico de mayor potencia se podría aumentar la presión o caudal de suministro en caso de que sea necesario. Por eso consideramos esta bomba la más oportuna para el sistema de desalación.

Se muestran las curvas características del fabricante de cada bomba.

ETB 065-050-125 GG AA11D200552 BM

Versión nº.: 1

Bomba centrífuga Etabloc para bajas presiones

**Datos de curvas**

Densidad del fluido	998 kg/m³	Altura de bombeo requerida	19,00 m
Viscosidad	1,00 mm²/s	IEM (índice de eficiencia mínima)	≥ 0,70
Caudal bombeado requerido	83,00 m³/h	Diámetro efectivo del rodete	138,0 mm
Altura de bombeo	18,99 m		

Figura 35. Bomba de suministro KSB.

# Curva

Nombre de la bomba: **3D65-125/7.5**

Customer	Fecha: 27-February-2015	Empresa
Contacto	Ref.	Issued by
Teléfono	Proyecto	Teléfono
Correo electrónico	ID proyecto	Correo electrónico

Datos de trabajo teóricos

Bomba

1	Caudal	l/s	23	Operating Flow	l/s	25,1	Impeller Dia. Designed	mm	149
2	Altura de impulsión	m	19	Operating Head	m	22,6	Frecuencia	Hz	50
3	Altura geodésica	m	0				Velocidad	1/min	2900

Test standard: ISO 9906-Annex A Agua limpia (100%) : 200K; 998,3kg/m<sup>3</sup>; 1mm/s

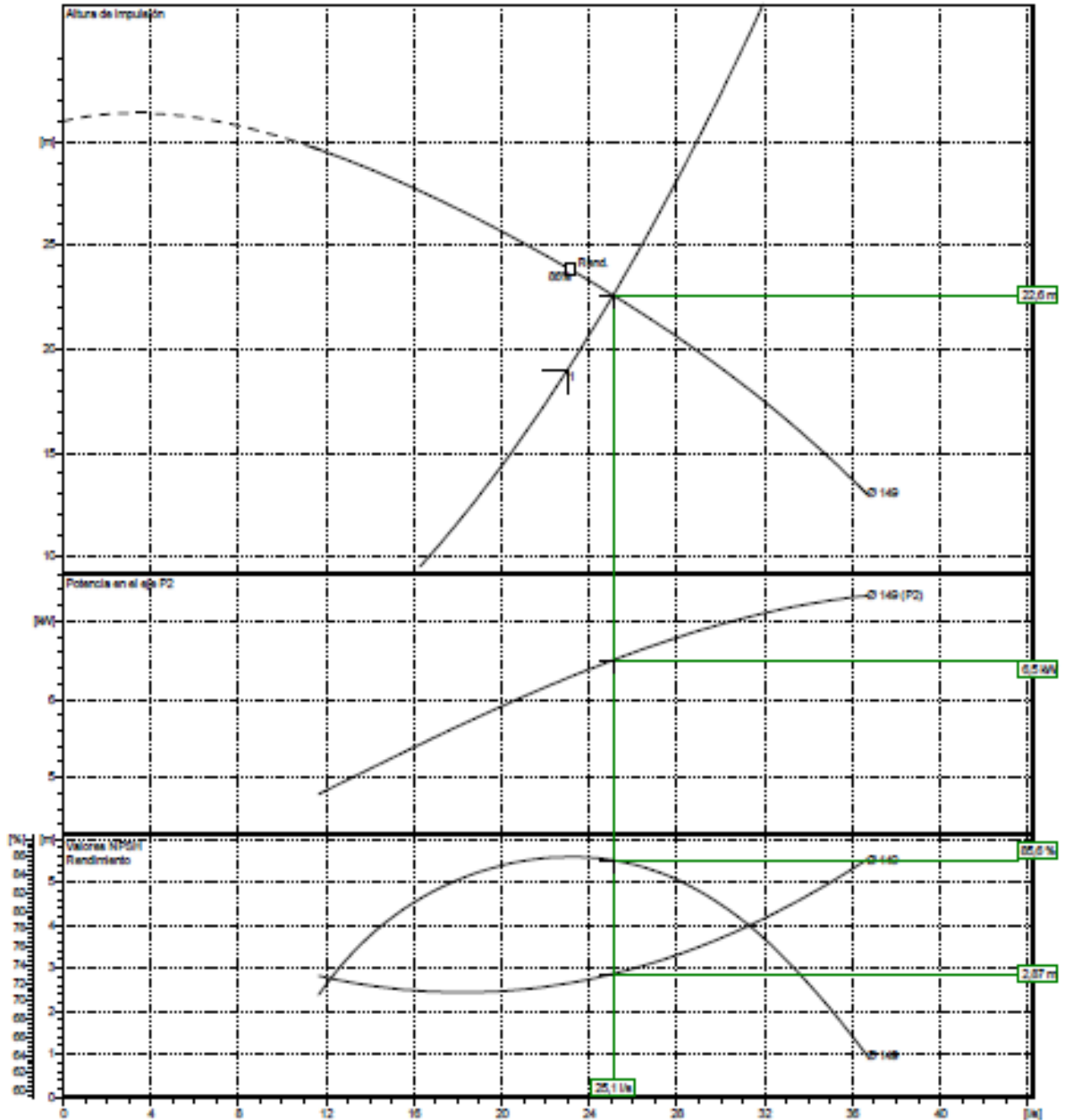


Figura 36. Bomba de suministro EBARA.

### 4.1.3 Membranas

Existen muchos fabricantes en el sector de las membranas de ósmosis inversa, sin embargo, debido a su experiencia y especialización, son tres los principales fabricantes que abarcan este mercado:

- Hydranautics a Nitto Group Company.
- Toray membrane.
- Dow Chemical.

Durante este trabajo se estudiarán las soluciones de membranas ofertadas por el fabricante Hydranautics debido a que otros compañeros de carrera (Alberto Hernández Gonzales, Diego Gonzales Fariña y Eduardo Andrés Gómez) realizarán proyectos de plantas de desalación similares, donde cada uno estudiará las posibilidades de un fabricante en concreto. Además, Hydranautics dispone de un software específico de cálculo de sistemas de membranas incluyendo el sistema de recuperación de energía, el IMSdesign (en el ANEXO VI. SOFTWARE ESPECÍFICOS se abarca con profundidad el funcionamiento del programa).

Dentro del catálogo de membranas, Hydranautics dispone de una gran variedad de modelos en función del agua a tratar. En este caso, al tratarse de agua de mar se debe recurrir a la gama SWC.

Las membranas SWC tienen configuración en espiral ofreciendo una alta productividad al tener el más elevado rechazo de sales de todas sus gamas.

Los modelos de la gama SWC de Hydranautics son los siguientes:

- SWC4+: Alto rechazo de sales y elevado rechazo de boro.
- SWC4 MAX: Similar a la anterior con mayor superficie de filtración.
- SWC4B MAX: Mayor rechazo de boro para evitar segundos pasos.
- SWC5: Combina alto caudal, rechazo de sales y boro con una menor presión de operación.
- SWC5 MAX: Similar a la anterior con una mayor superficie de filtración.
- SWC5-LD: Características similares a la SWC5 con bajo ensuciamiento.
- SWC6 MAX: Ofrece el mayor caudal de producción y su correspondiente ahorro energético.

En este proyecto se compararán las prestaciones de las membranas SCWC4+, SCWC4 MAX, SCWC5 MAX y SCWC6 MAX.

El procedimiento para elegir las membranas de nuestro sistema será el siguiente:

- Lo primero que se hará será ver cuáles son las peores condiciones para el rechazo de sales y boro, los dos parámetros que debe cumplir, donde el boro debe ser inferior a 1ppm y las sales totales a 500 ppm. Estas condiciones estarán fijadas en una edad de membrana de 3 años, una temperatura de agua de 24°C (en el apartado 8.2.1 AGUA de la memoria se muestra que la temperatura máxima del agua es de 26°C, la reducción a 24°C se debe a que la primera es superficial y debido a la profundidad de captación la temperatura del agua desciende) y un pH regulado tras el pretratamiento de 7. Con estas condiciones se eliminarán las opciones de las membranas que no cumplan con los requisitos legales de boro y salinidad.
- El otro parámetro concluyente que se tendrá en cuenta para las membranas que superen el primer filtro será la elección de la membrana que ofrezca un una menor presión de operación, el cual está ligado generalmente a un menor consumo específico de la planta. Para la elección se mantendrán las condiciones anteriormente citadas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada membrana en el software IMSdesign.

Resultados Cálculo									
		Presión	Caudal/tubo						
		bar	m3/hr		Vm2-hr				
Arreglo	Tubos	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta		^
1-1	23	64,3	63,2	8,1	4,4	16,2	1,02		
1-2	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		
1-3	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		
1-4	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		^

Concentración Perm. (ppm)											
Ca	0,42	K	2,46	Sr	0,01	Cl	79,63	NO3	0,00	CO2	8,30
Mg	1,33	NH4	0,00	CO3	0,00	SO4	3,01	B	0,69	pH	5,4
Na	59,05	Ba	0,00	HCO3	1,20	F	7,42	SiO2	0,00		
SDT total										155,2	ppm

Figura 37. Resultados SWC4+.

Resultados Cálculo									
		Presión	Caudal/tubo						
		bar	m3/hr		Vm2-hr				
Arreglo	Tubos	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta		^
1-1	21	64,1	62,9	8,8	4,9	16,2	1,02		
1-2	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		
1-3	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		
1-4	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		^

Concentración Perm. (ppm)											
Ca	0,43	K	2,49	Sr	0,01	Cl	80,66	NO3	0,00	CO2	8,30
Mg	1,34	NH4	0,00	CO3	0,00	SO4	3,05	B	0,69	pH	5,4
Na	59,81	Ba	0,00	HCO3	1,22	F	7,52	SiO2	0,00		
SDT total										157,2	ppm

Figura 38. Resultados SWC4 MAX.



Resultados Cálculo									
Presión			Caudal/tubo						
Arreglo	Tubos	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta		
1-1	21	58,6	57,4	8,8	4,9	16,2	1,02		
1-2	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		
1-3	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		
1-4	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		

Concentración Perm. (ppm)											
Ca	0,61	K	3,51	Sr	0,01	Cl	113,76	NO3	0,00	CO2	8,30
Mg	1,90	NH4	0,00	CO3	0,00	SO4	4,31	B	1,19	pH	5,5
Na	84,34	Ba	0,00	HCO3	1,72	F	10,60	SiO2	0,00		
SDT total										221,9	ppm

Figura 39. Resultados SWC5 MAX.

Resultados Cálculo									
Presión			Caudal/tubo						
Arreglo	Tubos	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta		
1-1	21	55,4	54,3	8,8	4,9	16,2	1,01		
1-2	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		
1-3	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		
1-4	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		

Concentración Perm. (ppm)											
Ca	1,01	K	5,83	Sr	0,02	Cl	189,02	NO3	0,00	CO2	8,30
Mg	3,15	NH4	0,00	CO3	0,00	SO4	7,16	B	2,01	pH	5,8
Na	140,11	Ba	0,00	HCO3	2,85	F	17,60	SiO2	0,00		
SDT total										368,8	ppm

Figura 40. Resultados SWC6 MAX.

A modo resumen de los resultados obtenidos en este análisis, se muestra la Tabla 9, donde automáticamente quedan descartadas del análisis las membranas del modelo SWC5 MAX y SWC6 MAX debido a que el índice de boro del agua productos es superior a 1ppm.

Modelo	Boro (ppm)	SDT (ppm)	P. Operación (Bar)	P. Rechazo (Bar)
SWC4+	0,69	155,2	64,30	63,20
SWC4 MAX	0,69	157,2	64,10	62,90
SWC5 MAX	1,19	221,9	58,60	57,40
SWC6 MAX	2,01	368,8	55,40	54,30

Tabla 9. Resultados según modelo de membrana.

En los modelos SWC4+ y el SWC4 MAX se encuentran resultados similares tanto en las propiedades del agua producto como en las presiones de operación y de rechazo, además, extrapolando los datos de presiones a la hoja de cálculos Excel utilizada para la selección de la recuperación en el ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS, se consiguen consumos específicos iguales de 2,86 kW/m<sup>3</sup> para las condiciones previamente fijadas.

Con los datos obtenidos hasta ahora cualquier modelo podría ser válido, por lo que se pasa a ver la configuración recomendada por el software para dada una de las membranas.

Para el modelo SWC4+ sugiere una configuración de 6x23 y para el modelo SWC4 MAX lo da de 6x21, justificado por el área extra de las membranas de este modelo. Como la planta de desalación es relativamente pequeña, se tendrá preferencia por los equipos compactos, siendo entonces el modelo de membrana elegido el SWC4 MAX con una configuración de 21 permeadores de 6 membranas cada uno.

En el ANEXO V. MEMBRANA, se muestra un análisis detallado de las condiciones de operación de la membrana.

#### 4.1.4 Intercambiador de presión

Energy Recovery dispone de un software que permite realizar el dimensionado del sistema de recuperación, mediante intercambiadores de presión, en función de la capacidad de la planta y las presiones de operación, ofreciendo distintos resultados para sus modelos comerciales, el software `ERI PX Power Model Selector`. Se explicará con mayor profundidad en el ANEXO VI. SOFTWARE ESPECÍFICOS.

Dado que el software requiere como datos de entrada las presiones, se hará un sondeo de las presiones necesarias al añadir un intercambiador de presión en el sistema con el software del fabricante de membranas (IMSdesign) donde como parámetros iniciales del intercambiador se supondrán los proporcionados por el Hydranautics (una fuga de un 1%, mezcla volumétrica del 5% y una diferencia de presión de 0,5 bar). En este sondeo se tomarán las condiciones más desfavorables para la presión de trabajo citadas en el apartado anterior sobre las membranas, a las que corresponde una temperatura y pH del agua de 17°C y 7 y una edad de membrana de 4 años.

Resultados Cálculo									
		Presión		Caudal/tubo		Flux		Beta	
Arreglo	Tubos	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta		
1-1	21	70,8	69,6	8,8	4,9	16,2	1,03		
1-2	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		
1-3	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		
1-4	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		

Concentración Perm. (ppm)												
Ca	0,34	K	1,99	Sr	0,01	Cl	64,57	NO3	0,00	CO2	9,46	
Mg	1,08	NH4	0,00	CO3	0,00	SO4	2,44	B	0,51	pH	5,3	
Na	47,88	Ba	0,00	HCO3	0,94	F	6,02	SiO2	0,00			
										SDT total	125,8	ppm

Figura 41. Sondeo de presiones para el intercambiador. IMSdesign.

Los resultados se muestran en la Figura 41, la presión del agua a la entrada de la membrana deberá ser de 70,8 bares y la presión de rechazo será de 69,6 bares. Con estos datos pasamos a hacer uso del software de Energy Recovery para ver el rendimiento de cada modelo de intercambiador y la cantidad que debe tener.

Los resultados del proceso de comprobación de los distintos modelos se muestran en la Tabla 10, donde se muestran los rendimientos que dan y la cantidad que requeriría la planta.

Modelo	Cantidad	Rendimiento
PX 30S	15	93,93%
PX 45S	10	94,44%
PX 70S	7	95,49%
PX 90S	5	95,14%
PX 140S	4	94,85%
PX 180	3	96,98%
PX 220	3	97,45%
PX260	2	96,63%
PX Q260	2	96,99%
PX 300	2	97,07%
PX Q300	2	97,54%

**Tabla 10. Modelos de intercambiadores. Energy Recovery.**

Por lo general, los rendimientos que dan los intercambiadores de presión son altos, ofreciendo un mayor rendimiento los intercambiadores de mayor tamaño.

Para este proyecto el intercambiador seleccionado será el PX 220 que ofrece un rendimiento del 97,45% para estas condiciones de operación y la cantidad de equipos necesarios será de 3, lo que nos permite modular los 21 permeadores para que el rechazo de cada 7 de ellos se dirija de forma independiente hacia el intercambiador de presión.

Los resultados específicos obtenidos para este modelo de intercambiador se muestran en la Figura 42. La mezcla volumétrica será del 6% y la fuga será del 1,4%, en lugar del 5 y 1% supuestos para el sondeo inicial.

Aunque esta variación en fuga y mezcla volumétrica repercute ligeramente en las presiones de operación, el resultado se considerará válido para el dimensionado del modelo y cantidad de intercambiadores de presión. En la búsqueda del punto de operación de la bomba de alta presión se procede a un proceso iterativo entre los resultados del software de las membranas y del intercambiador para minimizar el error (ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS).

<b>PX Technology Performance</b>	
PX unitary flow	34,0 m <sup>3</sup> /hr
Salinity Increase at membranes	2,8%
Volumetric mixing VM	6,0%
Lubrication flow (LF) per PX array	1,4 m <sup>3</sup> /hr
LF as % of concentrate flow	1,4%
HP DP	0,5 bar
LP DP	0,4 bar
RO Specific Energy **	3,00 kWh/m <sup>3</sup>
Efficiency	97,45%

Figura 42. Resultados intercambiador PX 220. Energy Recovery.

#### 4.1.5 Bomba boosters

El punto de operación de la bomba booster ha sido calculado en el ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS. Se procede a estudiar las posibles bombas recomendadas por los fabricantes que ofrezcan un alto rendimiento en este punto de operación.

Requisitos de la bomba booster:

- Caudal de 27,9 l/s.
- Altura útil 17,9 m.
- Bomba tipo centrífuga.
- Agua de mar como fluido de trabajo.

Como en el caso de las bombas de suministro, se estudiarán las bombas ofertadas por los fabricantes KSB y EBARA para conocer sus rendimientos y características técnicas. Una vez obtenidos estos resultados se elegirá la opción que más se adapte a la planta de desalación.

A continuación, en la Tabla 10, se muestran los resultados obtenidos para las bombas recomendadas por cada uno de los fabricantes.

Fabricante	KSB	EBARA
Modelo	MCPK100-065-125	100x80FS S2GC5
Rendimiento	76,5%	82,3%
Potencia (kW)	11,00	7,50

Tabla 11. Comparación de bombas boosters.

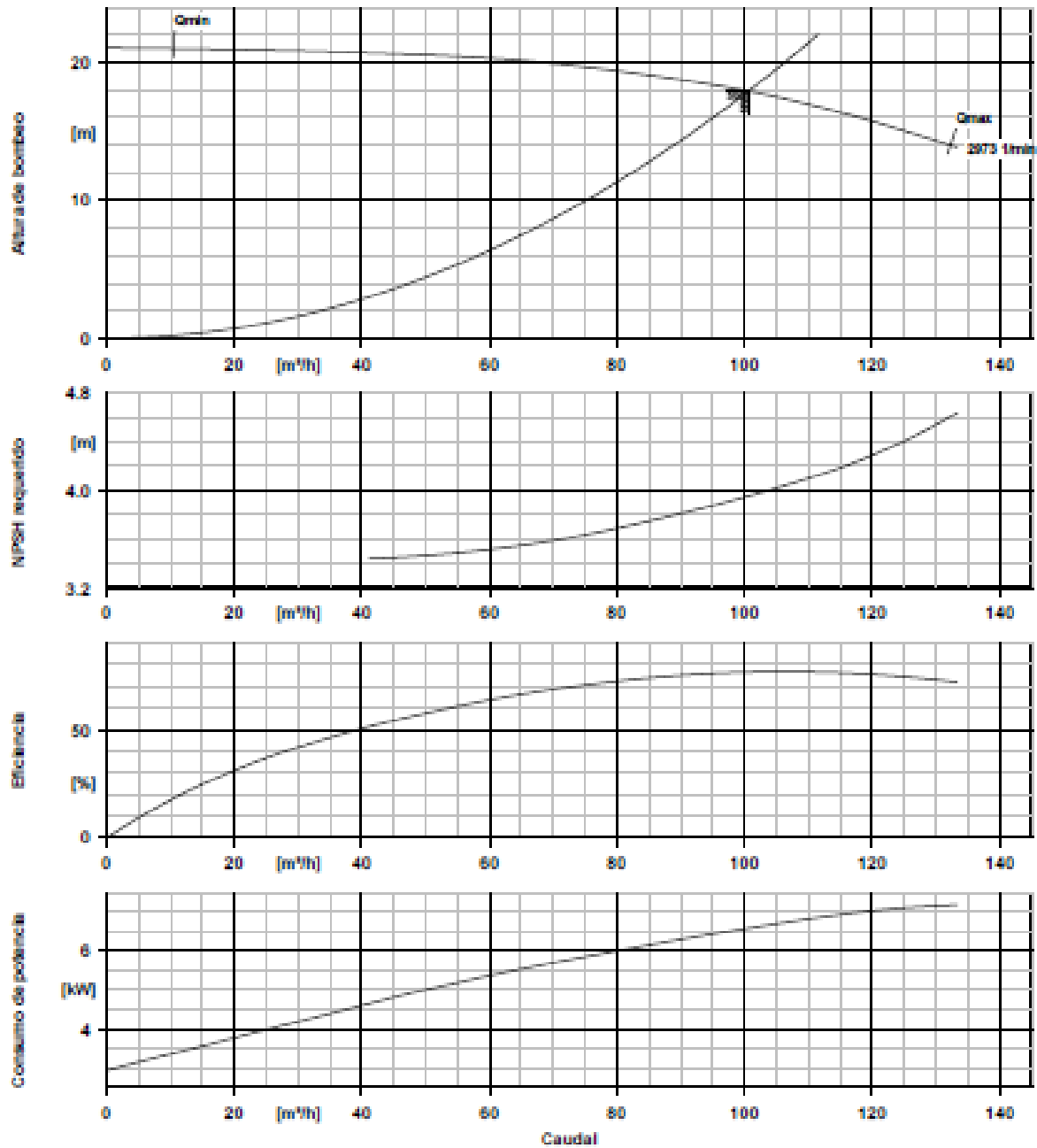
La bomba booster elegida es la del fabricante EBARA, 100x80FS S2GC5, ya que ofrece un mayor rendimiento y una potencia del motor más ajustada a las necesidades que la del fabricante KSB, el cual tiene un motor sobredimensionado.

Se pasa a mostrar las curvas características de los modelos de bombas comparadas:

MCPK100-065-125 CC MA 01102A

Versión nº: 1

Bomba química MegaCPK según EN 22858/ISO 2858/ISO 5199 y Directiva 94/9/EC (ATEX)



**Datos de curvas**

Densidad del fluido	1028 kg/m³	Altura de bombeo	17,93 m
Viscosidad	1,07 mm²/s	Altura de bombeo requerida	17,90 m
Caudal bombeado requerido	100,50 m³/h	Diámetro efectivo del rodete	131,0 mm

Figura 43. Bomba boosters KSB.

# Curva

Nombre de la bomba: 100X80FSS2GC5 7.5

Customer	Fecha: 16-March-2015	Empresa
Contacto	Ref.	Issued by
Teléfono	Proyecto	Teléfono
Comeo electrónico	ID proyecto	Comeo electrónico

Datos de trabajo teóricos

1	Caudal	l/s	27,89
2	Altura de impulsión	m	17,9
3	Altura geodésica	m	0

Bomba

Operating Flow	l/s	29,7	Rodeo Diámetro Designed	mm	147
Operating Head	m	20,3	Frecuencia	Hz	50
			Velocidad	1/min	2910

Test standard: ISO 9906-Annex A

Agua Impul. [100%]: 203K; 998,3kg/m<sup>3</sup>; 1mm<sup>3</sup>/s

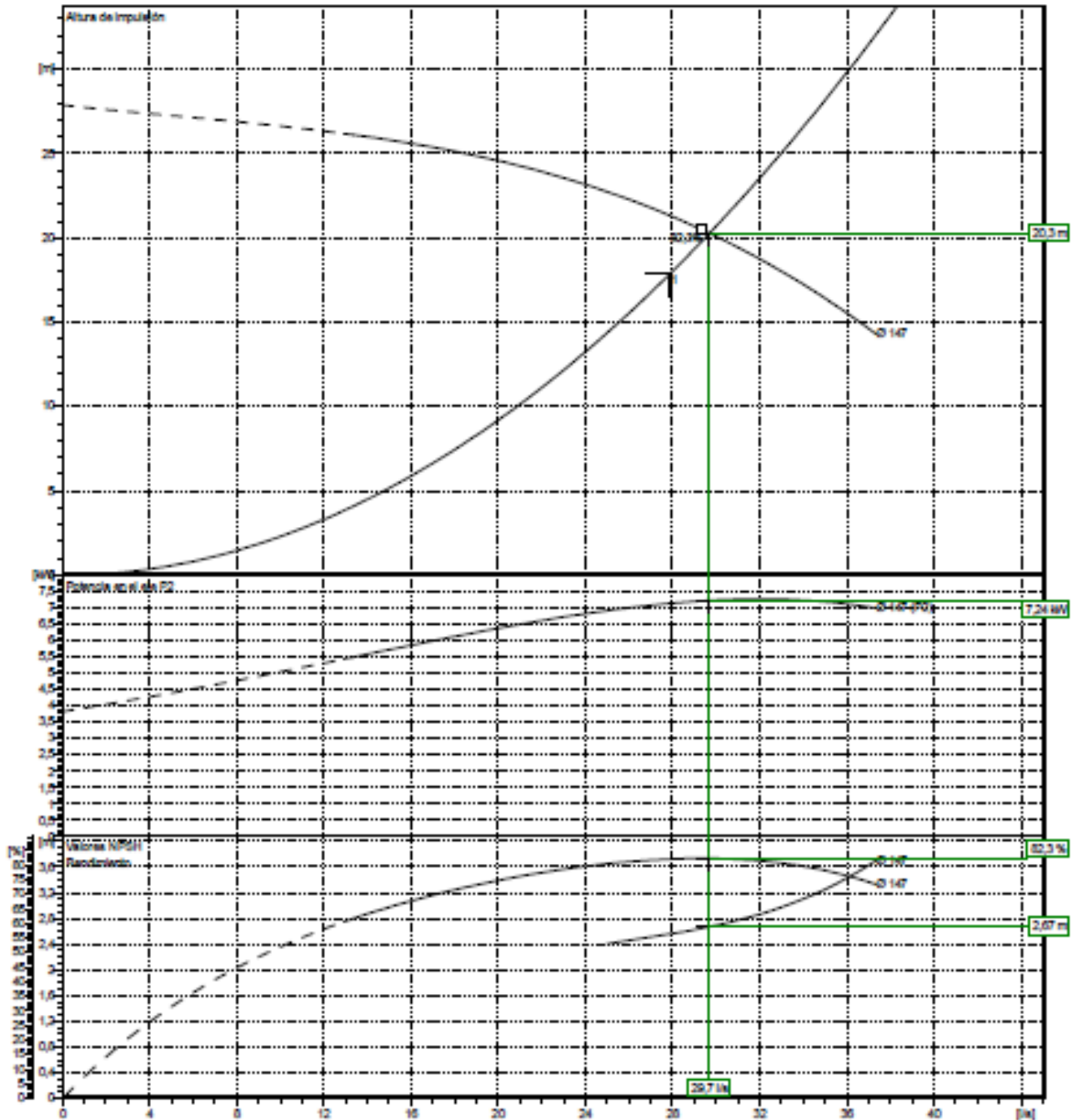


Figura 44. Bomba boosters EBARA.

#### 4.1.6 Bomba de alta presión

La bomba de alta presión se diseñará con el punto de operación calculado en el ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS. Se estudiarán las bombas que con este punto de operación con el mayor rendimiento.

Requisitos de la bomba de alta presión:

- Caudal de 23,5 l/s.
- Altura útil 697,2 m.
- Bomba tipo centrífuga multietapa.
- Agua de mar como fluido de trabajo.

Debido a la gran potencia que deben tener las bombas de alta presión son pocos las empresas que las fabrican. Se estudiarán las opciones ofertadas por los fabricantes KSB y Energy Recovery para conocer sus rendimientos y características técnicas.

La Tabla 12 muestra los resultados obtenidos para las bombas recomendadas por cada uno de los fabricantes mencionados.

Fabricante	KSB	Energy Recovery
Modelo	RO A65/13B 6,1 31,80	3x4x7 A
Rendimiento	72,2%	75,8%
Potencia (kW)	250,00	224,00

**Tabla 12. Comparación de bombas de alta presión.**

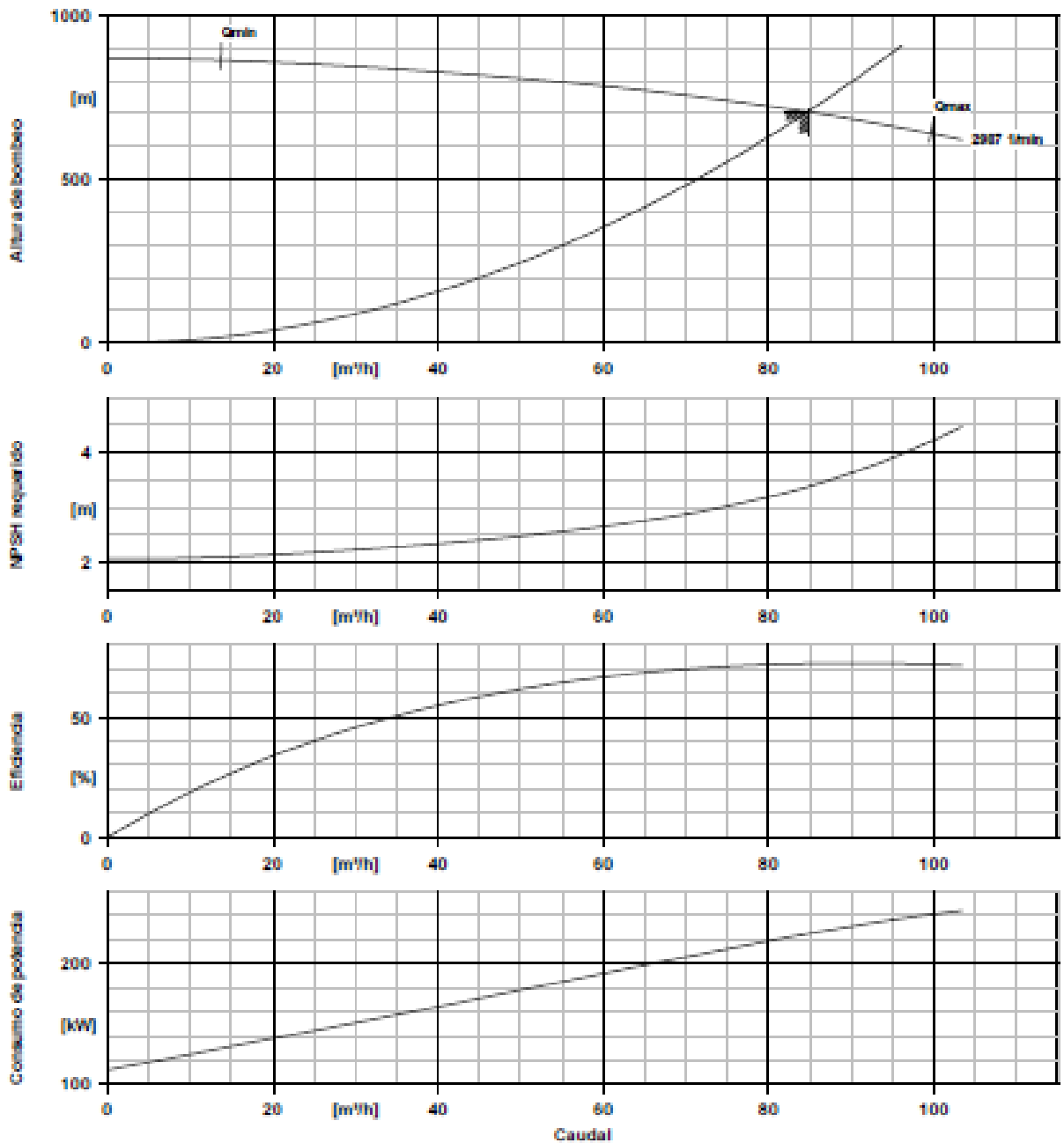
La bomba 3x4x7 A del fabricante Energy Recovery ofrece un mayor rendimiento, además, esta empresa se distingue por su calidad de productos, por lo que esta será la bomba elegida para la planta de desalación.

Se muestran las curvas características de los modelos de bombas comparadas:



Multitec RO A 65/ 13B-6.1 31.80

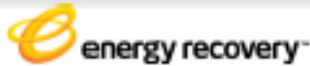
Versión nº.: 1



**Datos de curvas**

Densidad del fluido	998 kg/m³	Altura de bombeo	705,68 m
Viscosidad	1,00 mm²/s	Altura de bombeo requerida	697,20 m
Caudal bombeado requerido	84,70 m³/h	Diámetro efectivo del rodete	214,0 mm

Figura 45. Bomba de alta presión KSB.



ERI Quotation System 15.0.4.0

Pump Performance Datasheet			
Customer :		Project name :	338808
Customer reference :		Size :	3x4x7-A
Item number :	007	Stages :	20
Service :		Based on curve number :	3x4x7-A
Quantity :	1	Date last saved :	19 Mar 2015 8:00 AM
Operating Conditions		Liquid	
Flow, rated :	84.70 m3/h	Liquid type :	Sea Water
Differential head / pressure, rated (requested) :	71.10 bar	Additional liquid description :	
Differential head / pressure, rated (actual) :	71.24 bar	Solids diameter, max :	0.00 mm
Suction pressure, rated / max :	0.00 / 0.00 bar.g	Solids concentration, by volume :	0.00 %
NPSH available, rated :	Ample	Temperature, max :	20.00 deg C
Frequency :	50 Hz	Fluid density, rated / max :	1.026 / 1.026 kg/dm3
		Viscosity, rated :	1.05 cSt
		Vapor pressure, rated :	0.07 bar.a
Performance		Material	
Speed, rated :	3,399 rpm	Material selected :	Standard
Impeller diameter, rated :	178 mm		
Impeller diameter, maximum :	178 mm	Pressure Data	
Impeller diameter, minimum :	178 mm	Maximum working pressure :	97.20 bar.g
Efficiency :	75.82 %	Maximum allowable working pressure :	N/A
NPSH required / margin required :	7.38 / 0.00 m	Maximum allowable suction pressure :	N/A
nq (imp. eye flow) / S (imp. eye flow) :	40 / 90 Metric units	Hydrostatic test pressure :	N/A
MCSF :	24.25 m3/h	Driver & Power Data	
Head, maximum, rated diameter :	97.20 bar	Driver sizing specification :	Rated power
Head rise to shutoff :	36.44 %	Margin over specification :	0.00 %
Flow, best eff. point (BEP) :	99.54 m3/h	Service factor :	1.00
Flow ratio (rated / BEP) :	85.10 %	Power, hydraulic :	168 kW
Diameter ratio (rated / max) :	100.00 %	Power, rated :	221 kW
Head ratio (rated dia / max dia) :	100.00 %	Power, maximum, rated diameter :	232 kW
Cq/Ch/Ce/Cn [ANSI/HI 9.6.7-2010] :	1.00 / 1.00 / 1.00 / 1.00	Minimum recommended motor rating :	224 kW / 300 hp
Selection status :	Acceptable		

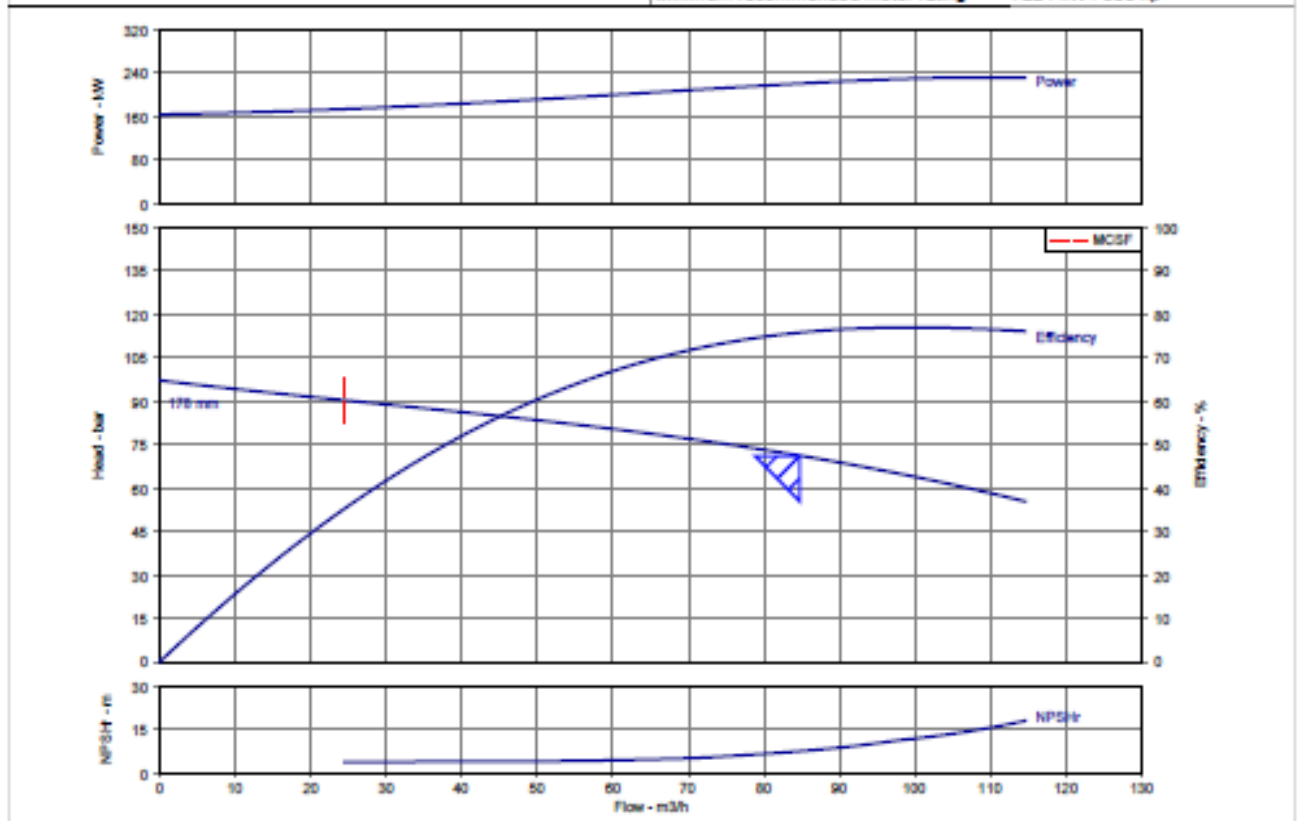


Figura 46. Bomba de alta presión Energy Recovery.

## 4.2 Aerogenerador.

### 4.2.1 Elección de aerogenerador, ITC

Para la elección del aerogenerador se estudiarán las opciones disponibles por los fabricantes Vestas, Enercon y Gamesa. Estos están en la lista de los principales fabricantes de aerogeneradores a nivel mundial y han distribuidos aerogeneradores por toda España e incluso Canarias, lo que proporciona experiencia cercana en el sector.

Para realizar un primer sondeo se utilizará la herramienta online del Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) que permite estimar la energía producida por un aerogenerador en función de su posición, altura y modelo (predefinido en su base de datos) como se muestra en la Figura 47.

Recurso Eólico de Canarias  
Estimación de la Energía producida por un Aerogenerador

Posición (UTM)		Límites R.E.C
X =	650350	[170550, 677550]
Y =	3217850	[3040750, 3274850]
Aerogenerador		
Modelo:	VESTAS V52/850	?
Curva de potencia:	Seleccionar archivo Ningún archivo seleccionado	?
Altura (m):	40	?

Calcular

Figura 47. Herramienta para estimar la energía producida por un aerogenerador. ITC.

En este caso la posición del aerogenerador es en coordenadas UTM:

- X= 650350
- Y= 3217850

La altura de la torre se estimará en un primer sondeo en 40m, que luego se contrastará con la propuesta por el fabricante del aerogenerador.

Se comprobarán las prestaciones de los aerogeneradores ofertados por los fabricantes mencionados anteriormente (Vestas, Enercon y Gamesa), cuya potencia nominal sea inferior a 900 kW y de entre estos, se estudiarán los que anualmente generen una energía similar a la consumida por la planta de desalación en el mismo periodo de tiempo.

Los modelos de aerogeneradores de los fabricantes a estudiar con potencias inferiores a 900 kW son los siguientes:

- Enercon E-40, con una potencia de 600 kW.
- Enercon E-44, con una potencia de 900 kW.
- Enercon E-48, con una potencia de 800 kW.
- Gamesa G52, con una potencia de 850 kW.
- Gamesa G58, con una potencia de 850 kW.
- Vestas V42, con una potencia de 600 kW.
- Vestas V44, con una potencia de 600 kW.
- Vestas V52, con una potencia de 850 kW.

Utilizando la herramienta para estimar la energía producida por un aerogenerador del ITC se pasa a mostrar los resultados obtenidos para cada uno de estos modelos:

Coord X (UTM):	650350	
Coord Y (UTM):	3217850	
Tomo detalle numérico:	<a href="#">Fuerteventuralanzarote17.pdf</a>	
Aerogenerador:	ENERCON E-40 /600	
Altura:	40 m	
Cte K de Weibull (40 m):	2.616	
Velocidad viento (40 m):	6.5 m/s	
Dirección predominante del viento:	NNE	
Energía anual estimada:	1097020.7 kWh	
Potencia anual:	125.231 kW	
Horas anuales equivalentes:	1828.4 h	

**Figura 48. Enercon E-40. ITC.**

Coord X (UTM):	650350	
Coord Y (UTM):	3217850	
Tomo detalle numérico:	<a href="#">Fuerteventuralanzarote17.pdf</a>	
Aerogenerador:	ENERCON E-44	
Altura:	40 m	
Cte K de Weibull (40 m):	2.616	
Velocidad viento (40 m):	6.5 m/s	
Dirección predominante del viento:	NNE	
Energía anual estimada:	1603092.6 kWh	
Potencia anual:	183.001 kW	
Horas anuales equivalentes:	1781.2 h	

**Figura 49. Enercon E-44. ITC.**

Coord X (UTM):	650350	
Coord Y (UTM):	3217850	
Tomo detalle numérico:	<a href="#">FuerteventuraLanzarote17.pdf</a>	
Aerogenerador:	ENERCON E-48	?
Altura:	40 m	
Cte K de Weibull (40 m):	2.616	?
Velocidad viento (40 m):	6.5 m/s	
Dirección predominante del viento:	NNE	
Energía anual estimada:	1872613.6 kWh	?
Potencia anual:	213.769 kW	?
Horas anuales equivalentes:	2340.8 h	?

Figura 50. Enercon E-48. ITC.

Coord X (UTM):	650350	
Coord Y (UTM):	3217850	
Tomo detalle numérico:	<a href="#">FuerteventuraLanzarote17.pdf</a>	
Aerogenerador:	GAMESA G52-850	?
Altura:	40 m	
Cte K de Weibull (40 m):	2.616	?
Velocidad viento (40 m):	6.5 m/s	
Dirección predominante del viento:	NNE	
Energía anual estimada:	1940058.4 kWh	?
Potencia anual:	221.468 kW	?
Horas anuales equivalentes:	2282.4 h	?

Figura 51. Gamesa G52. ITC.

Coord X (UTM):	650350	
Coord Y (UTM):	3217850	
Tomo detalle numérico:	<a href="#">FuerteventuraLanzarote17.pdf</a>	
Aerogenerador:	GAMESA G58/850	?
Altura:	40 m	
Cte K de Weibull (40 m):	2.616	?
Velocidad viento (40 m):	6.5 m/s	
Dirección predominante del viento:	NNE	
Energía anual estimada:	2300282.1 kWh	?
Potencia anual:	262.589 kW	?
Horas anuales equivalentes:	2706.2 h	?

Figura 52. Gamesa G58. ITC.

Coord X (UTM):	650350	
Coord Y (UTM):	3217850	
Tomo detalle numérico:	<a href="#">FuerteventuraLanzarote17.pdf</a>	
Aerogenerador:	VESTAS V42/600	?
	KW	
Altura:	40 m	
Cte K de Weibull (40 m):	2.616	?
Velocidad viento (40 m):	6.5 m/s	
Dirección predominante del viento:	NNE	
Energía anual estimada:	491970.3 kWh	?
Potencia anual:	56.161 kW	?
Horas anuales equivalentes:	820 h	?

**Figura 53. Vestas V42. ITC.**

Coord X (UTM):	650350	
Coord Y (UTM):	3217850	
Tomo detalle numérico:	<a href="#">FuerteventuraLanzarote17.pdf</a>	
Aerogenerador:	VESTAS V44/600	?
	KW	
Altura:	40 m	
Cte K de Weibull (40 m):	2.616	?
Velocidad viento (40 m):	6.5 m/s	
Dirección predominante del viento:	NNE	
Energía anual estimada:	581146.9 kWh	?
Potencia anual:	66.341 kW	?
Horas anuales equivalentes:	968.6 h	?

**Figura 54. Vestas V44. ITC.**

Coord X (UTM):	650350	
Coord Y (UTM):	3217850	
Tomo detalle numérico:	<a href="#">FuerteventuraLanzarote17.pdf</a>	
Aerogenerador:	VESTAS V52/850	?
	40 m	
Altura:	40 m	
Cte K de Weibull (40 m):	2.616	?
Velocidad viento (40 m):	6.5 m/s	
Dirección predominante del viento:	NNE	
Energía anual estimada:	1946909.6 kWh	?
Potencia anual:	222.25 kW	?
Horas anuales equivalentes:	2286.4 h	?

**Figura 55. Vestas V52. ITC.**

A fin de facilitar la comparación, en la Tabla 13 se recogen los resultados obtenidos para cada uno de los modelos estudiados.

Fabricante	Modelo	Potencia nominal (kW)	E. Anual (GWh)	P. Promedio (kW)
Enercon	E-40	600	1,097	125,23
	E-44	900	1,603	183,00
	E-48	800	1,873	213,77
Gamesa	G52	850	1,940	221,47
	G58	850	2,300	262,59
Vestas	V42	600	0,492	56,16
	V44	600	0,581	66,34
	V52	850	1,947	222,25

**Tabla 13. Modelos de aerogeneradores.**

El consumo energético anual de la planta de desalación es de 2,12 GWh, donde el intervalo aceptable de energía procedente de aerogenerador se ha estipulado entre el 85 y el 115% del total (entre 1,80 y 2,43 GWh), donde la potencia de la desaladora ronda los 270 kW.

Debido a que solo se dispondrá de un único aerogenerador, el diámetro del rotor no es un factor limitante en diseño. En caso de haber más de un aerogenerador, este diámetro sería determinante para la distancia mínima exigida entre los aerogeneradores de la misma línea y entre las líneas de aerogeneradores.

Teniendo en cuenta estos factores, el aerogenerador más conveniente para la instalación será el G58 del fabricante Gamesa, ya que la potencia promedio anual es muy cercana a la potencia de la planta de desalación. Se prevé un excedente en el cómputo de energía anual, debido al tipo de conexión, este excedente será vertido a la red eléctrica obteniendo así beneficios económicos.

Las alturas de la torre del aerogenerador son 44, 55 y 65 metros. Debido a que el coste económico e impacto visual aumentan de manera importante a mayor altura de la torre, y que haciendo el análisis a una altura de 40 m se cumplen con las necesidades energéticas de la planta, se plantea el uso de la torre de 44 m. Otra observación a tener en cuenta en la altura es dirección predominante del viento, en este caso es NNE, por lo que los obstáculos y rugosidad en esa dirección son prácticamente nulos al dar hacia la costa, lo que implica que la velocidad del viento no se vea afectada significativamente por el terreno.

Fijando ya la posición, modelo y altura de torre del aerogenerador se realiza un nuevo análisis detallado mediante la herramienta del ITC concretando estos datos.



Figura 56. Resultados para el aerogenerador Gamesa G58. ITC.

En la Figura 56 se muestra la energía anual estimada por la herramienta de estimación de energía de un aerogenerador del ITC es de 2,37 GWh con una potencia promedio anual de 271 kW.

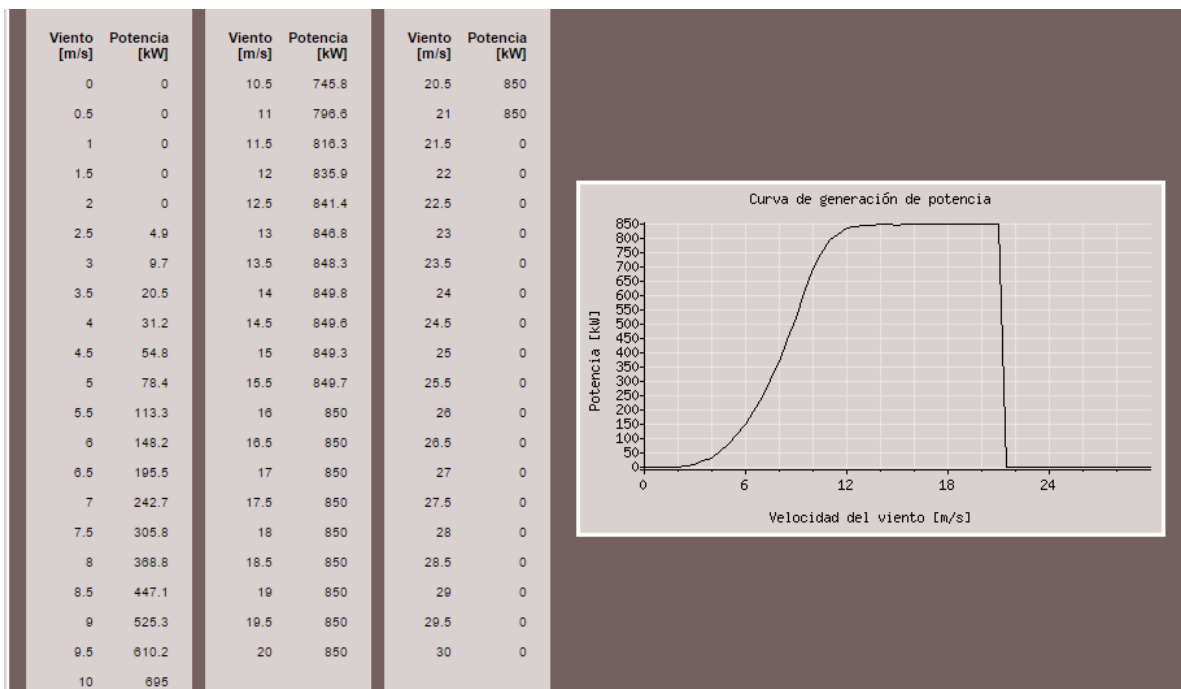


Figura 57. Curva de potencia del aerogenerador Gamesa G58. ITC.



**4.2.2 Resultados, WindPower**

WindPower es la página web de la Asociación de la Industria Eólica Danesa (DWIA), entre los componentes de ésta asociación destacan importantes fabricantes de aerogeneradores y empresas de energía.

En su página web disponen de un programa de cálculo de la potencia de un aerogenerador, el interfaz de dicho programa online se muestra en la Figura 58.

**CALCULATOR**

Datos del emplazamiento ?  
 Selección de los datos del emplazamiento ▼

Datos de densidad del aire ?  
 15 °C temp a 0 m de altitud (= 101.325 kPa de presión)  
 1.225652735 kg/m³ de densidad

Datos de distribución del viento en el emplazamiento ?  
 2.611 parámetro de forma de Weibull  
 6.6 m/s de velocidad media del viento = 7.42824985 parámetro de escala de Weibull  
 44 m de altura, Longitud de rugosidad 0.03 m = clase de rugosidad  
 1 ▼

---

Datos del aerogenerador ?  
 User Example ▼ 850 kW  
 3 m/s de velocidad de conexión, 23 m/s de velocidad de corte  
 58 m de diámetro de rotor, 44 m de altura de buje Alturas std ▼

Calcular
Volver al ejemplo
Densidad de potencia
Curva de potencia
Coeficiente de potencia
?

---

Resultados de la potencia de salida en el emplazamiento

Potencia de entrada\* 269 W/m² de área de rotor

Max. potencia de entrada a\* 9.2 m/s

velocidad media del viento a la altura del buje\* 6.6 m/s

Resultados de la potencia de salida de la turbina

Potencia de salida\* 101 W/m² de área de rotor

Energía producida\* 885 kWh/m²/año ?

Energía producida\* 2339207 kWh/año

Factor de carga\* 31 por ciento

---

Curva de potencia del aerogenerador ?

m/s.....kW		m/s.....kW		m/s.....kW	
1	0	11	796.6	21	850
2	0	12	835.9	22	0
3	9.7	13	846.8	23	0
4	31.2	14	849.8	24	0
5	78.4	15	849.3	25	0
6	148.2	16	850	26	0
7	242.7	17	850	27	0
8	305.8	18	850	28	0
9	525.3	19	850	29	0
10	695	20	850	30	0

Figura 58. Programa de cálculo de potencia de un aerogenerador. WindPower.

Los datos del viento se pueden añadir manualmente (temperatura, velocidad media anual y parámetro de forma de Weibull) o seleccionando un emplazamiento en concreto de su lista. Este programa, al no ser específico de Canarias no dispone de datos de las islas, ni siquiera de Canarias en general, por lo que estos datos han sido añadidos a partir de los obtenidos según el ITC, donde sí se dispone de datos específicos de Canarias.

En cuanto a la información del aerogenerador pasa exactamente igual, el programa ofrece la posibilidad de elegir un aerogenerador de los que tiene en su base de datos, sin embargo, no dispone del modelo que se ha seleccionado, por lo que se ha tenido que añadir la información obtenida de la ficha técnica del aerogenerador, integrando la curva de potencia (potencia generada estipulada para diferentes velocidades de viento).

Como resultado, con este programa se obtiene una energía de 2,34 GWh, un valor muy cercano al obtenido por la herramienta del ITC de 2,37 GWh. Además proporciona otros parámetros como el factor de carga (31%) o la energía y potencia producidas por superficie de rotor. Los resultados gráficos obtenidos por el programa se muestran en la Figuras 59, 60 y 61.

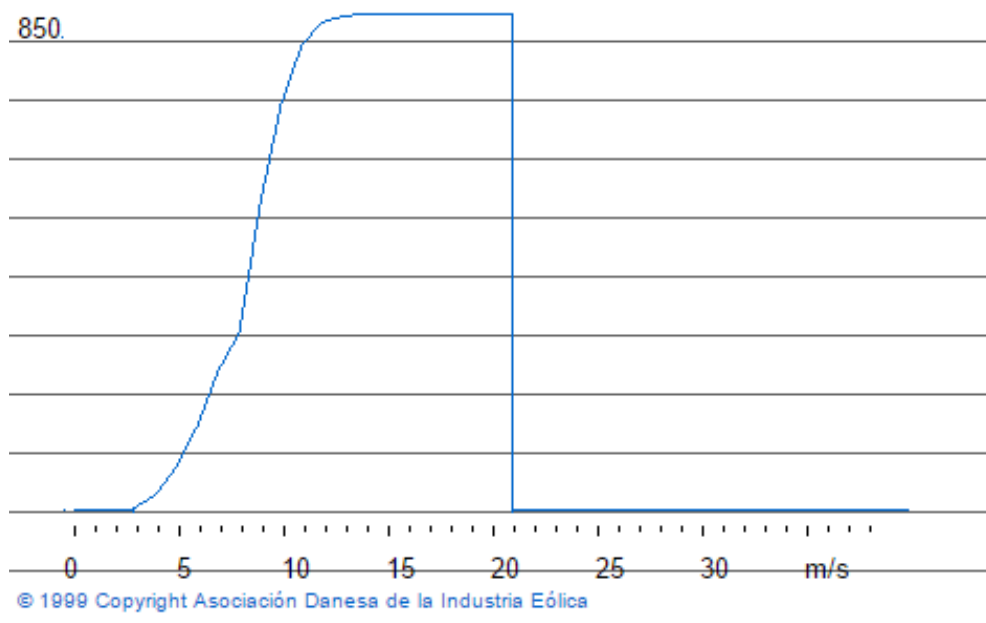


Figura 59. Curva de potencia del aerogenerador. WindPower.

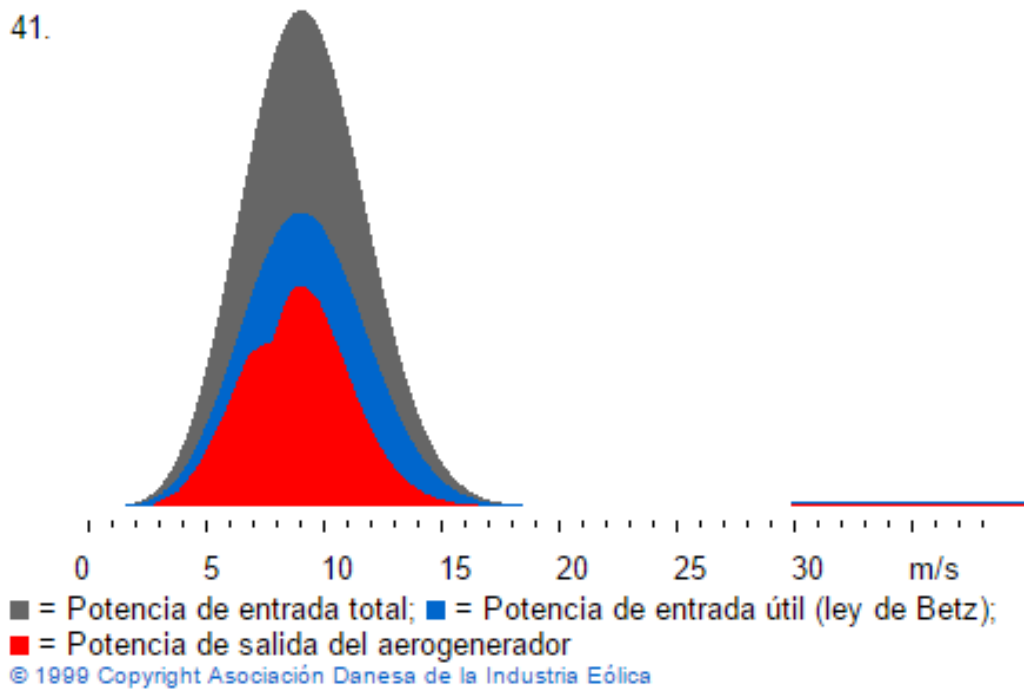


Figura 60. Densidad de potencia generada. WindPower.

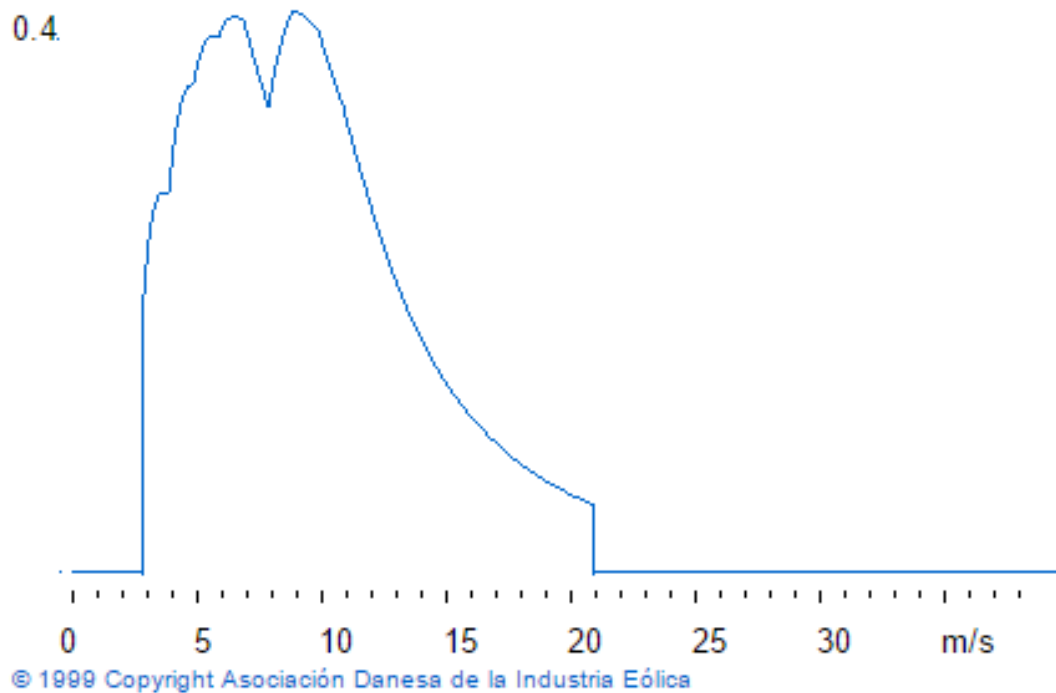


Figura 61. Coeficiente de potencia generado. WindPower.

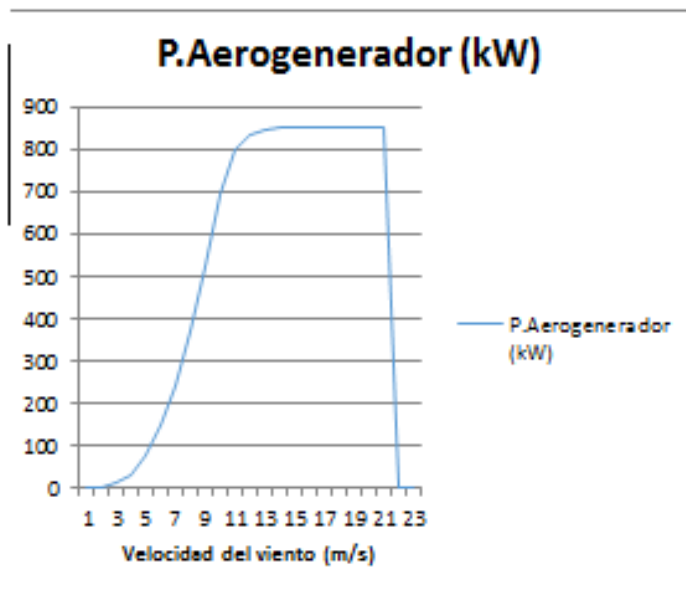
### 4.2.3 Hoja de cálculos de elaboración propia

Para finalizar con la comprobación de resultados se procede a calcular la potencia promedio y la energía anual producida por el aerogenerador elegido mediante una hoja de cálculos de elaboración propia.

Los datos de entrada para realizar el cálculo se muestran en la Figura 62, vienen determinados por las características del viento (densidad, velocidad media, factor de forma y factor de escala) y las del aerogenerador (diámetro del rotor y curva de potencia del fabricante).

Datos del viento		
Densidad ( $\rho$ )	1,225	kg/m <sup>3</sup>
Velocidad media	6,6	m/s
Factor de forma (k)	2,611	
Factor de escala (c)	7,4283	

Datos del aerogenerador		
Diámetro de rotor	58	m
Área de barrido	2642,1	m <sup>2</sup>



Curva de potencia aerogenerador	
V (m/s)	P. Aerogenerador (kW)
1	0
2	0
3	9,7
4	31,2
5	78,4
6	148,2
7	242,7
8	368,8
9	525,3
10	695
11	796,6
12	835,9
13	846,8
14	849,8
15	849,3
16	850
17	850
18	850
19	850
20	850
21	850
22	0
23	0

Figura 62. Datos de entrada para el cálculo de potencia eólica. Elaboración propia.

La densidad del viento se ha fijado en 1,225 kg/m<sup>3</sup> correspondiente a 1 atmósfera y 15°C, su velocidad media y el factor de forma (k) se han tomado de los datos aportados por el ITC, y el factor de escala (c) del calculador de WindPower. Tanto el diámetro del rotor como la potencia producida por el aerogenerador para las distintas velocidades de viento se han exportado de los datos del fabricante Gamesa.

Con los datos del viento se calculó el factor de probabilidad de velocidad del viento en cada intervalo (f) mediante la ecuación (8).

$$f = \frac{k}{c} * \left(\frac{k}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{k}{c}\right)^k\right] \quad (8)$$

Tras tener el factor de probabilidad para cada intervalo de velocidad de viento, mediante la ecuación (9) se procedió a calcular la potencia promedio generada combinando en intervalos de velocidad la potencia instantánea y la distribución de probabilidades.

$$\text{Potencia promedio generada} = \sum \text{Potencia instantanea } (v) * f(v) * \Delta v \quad (9)$$

De manera similar a la potencia promedio generada, se calculó la potencia promedio del viento utilizando la ecuación (10).

$$\text{Potencia promedio del viento} = \sum \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * f(v) * \Delta v \quad (10)$$

Finalmente se procede a calcular el límite de Betz (11), límite teórico por el que los sistemas de captación eólica no pueden extraer en ningún caso más de un 60% de la potencia del viento, debido a que la velocidad del viento, tras pasar el rotor, puede reducirse como máximo a un tercio de la velocidad que lleva antes de pasar por éste.

$$\text{Potencia límite} = \sum \text{Potencia promedio del viento } (v) * 0,6 \quad (11)$$

Los resultados de estas potencias y su representación gráfica se muestran en la Figura 63. Como era de esperar, la representación gráfica se parece bastante a la Figura 60, obtenida por el calculador de WindPower.

Probabilidad de velocidad de viento (f)	Potencia promedio generada (kW)	Potencia promedio del viento (kW)	Límite de Betz (kW)
0,0138	0,00	0,00	0,00
0,0411	0,00	0,00	0,00
0,0743	0,72	3,25	1,95
0,1063	3,32	11,01	6,61
0,1302	10,20	26,33	15,80
0,1406	20,83	49,13	29,48
0,1357	32,92	75,30	45,18
0,1177	43,40	97,51	58,51
0,0919	48,28	108,43	65,06
0,0646	44,88	104,50	62,70
0,0407	32,46	87,76	52,66
0,0230	19,25	64,39	38,63
0,0116	9,84	41,30	24,78
0,0052	4,43	23,15	13,89
0,0021	1,76	11,33	6,80
0,0007	0,62	4,83	2,90
0,0002	0,19	1,79	1,08
0,0001	0,05	0,58	0,35
0,0000	0,01	0,16	0,10
0,0000	0,00	0,04	0,02
0,0000	0,00	0,01	0,00
0,0000	0,00	0,00	0,00
0,0000	0,00	0,00	0,00
Total	273,17	710,79	426,48

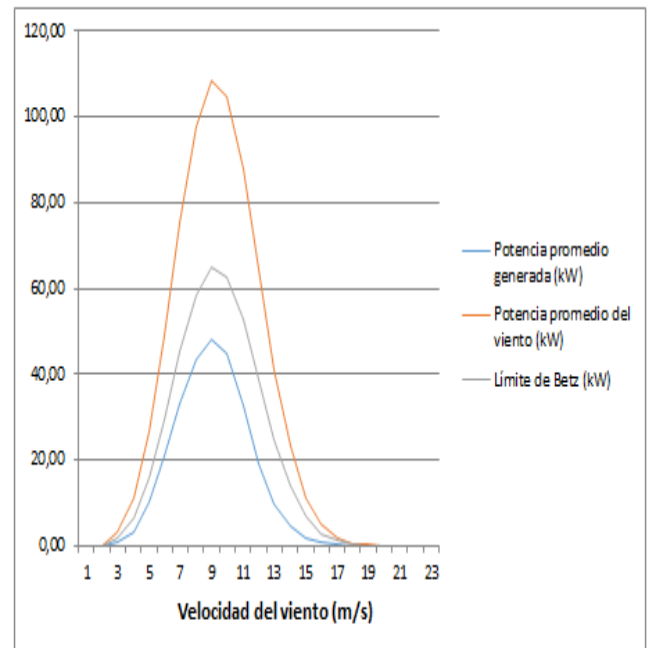


Figura 63. Potencia promedio generada, límite de Betz y del viento. Elaboración propia.

Obtenidos los resultados anteriores, se precede a calcular la energía anual producida, coeficiente de potencia (cp) y factor de carga, estos dos últimos con las ecuaciones (12) y (13).

$$\text{Coeficiente de potencia (cp)} = \frac{\text{Potencia promedio generada}}{\text{Potencia promedio del viento}} \quad (12)$$

$$\text{Factor de carga} = \frac{\text{Potencia promedio generada}}{\text{Potencia nominal del aerogenerador}} \quad (13)$$

Los resultados obtenidos mediante la hoja de cálculo de elaboración propia son los siguientes:

- Potencia promedio: 273,17 kW.
- Energía anual: 2,39 GWh.
- Coeficiente de potencia: 38%.
- Factor de carga: 32%.

#### 4.2.4 Comparación de resultados

Finalmente se comparan los resultados obtenidos mediante las tres fuentes (ITC, WindPower y Excel de elaboración propia). En la Tabla 14 se ven cada uno de ellos para proceder a su análisis.

Fuente	Potencia promedio (kW)	% Error	Generación anual (GWh)	% Error
ITC	271	0,0%	2,37	0,0%
WindPower	269	0,7%	2,34	1,3%
Excel propio	273	0,7%	2,39	0,8%

Tabla 14. Comparación de resultados eólicos.

Se ha tomado como referencia para calcular el error los datos obtenidos en el ITC. Como se puede ver, los errores son relativamente bajos, no superando en ningún caso el 2%, por lo que todos los resultados se podrían considerar aptos para el cálculo.

Debido a la especialización del ITC en el ámbito de la energía eólica en Canarias, son los datos proporcionados por éste los que se tomarán como referencia para el presente proyecto.

## 5 ANEXO V. MEMBRANA

Tras haber seleccionado el modelo de membrana SWC4 MAX del fabricante Hydranautics ya que es la que más se adapta a las necesidades de la planta de desalación, se procede a realizar un análisis de la respuesta de dicho modelo de membrana ante las diferentes condiciones de operación a las que estará cometida.

Para ello se modificarán las variantes de temperatura de trabajo, pH de entrada del agua de alimentación al núcleo de desalación y edad de las membranas y, mediante el software IMSdesign, se obtendrán los valores correspondientes a índice de boro, SDT (sales disueltas) y presión de entrada a las membranas. Una vez obtenidos estos valores, se analizarán los casos más desfavorables, el que ofrezca un mayor índice de boro, que corresponderá con el de mayor SDT, y el que requiera la mayor presión de operación de la planta, valor que se utilizará para el análisis energético.

La secuencia a seguir será la de fijar dos parámetros y modificar el restante en su rango de trabajo. Los parámetros fijados se tomarán como el valor medio dentro del rango de cada uno de ellos y los intervalos variarán en función del parámetro variable. Los rangos de temperatura, pH y edad serán los siguientes:

- Temperatura: De 17 a 24°C.
- pH: De 6 a 8.
- Edad: De 0 a 4 años.

Se comenzará con el estudio de las condiciones de trabajo de la membrana para los diferentes rangos de temperatura, seguido del pH y finalmente según la edad de la membrana.

### 5.1 Variación de temperatura del agua

Las propiedades del agua se han citado en el apartado 8.2.1 Agua de la memoria, donde se puede ver que su rango de temperatura según el Plan Hidrológico de Lanzarote está entre 26 y 17°C. Al tratarse de extracción mediante pozo costero, la temperatura del agua, particularmente en los meses cálidos, es menor a la temperatura superficial, de donde han sido recogidos estos datos, por lo tanto se tratará el rango de temperatura para su estudio entre 24 y 17°C y las comprobaciones se realizarán a 17, 19, 21 y 24°C.

Como parámetro fijo tenemos el pH con un valor de 7 y la edad de las membranas que será de 2 años. A continuación se muestran los resultados obtenidos en el software IMSdesign.



Resultados Cálculo							
Arreglo	Presión		Caudal/tubo		Flux	Beta	
	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.			
1-1	66.8	65.5	8.8	4.9	16.2	1.02	
1-2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	
1-3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	
1-4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	

Concentración Perm. (ppm)											
Ca	0.30	K	1.74	Sr	0.01	Cl	56.43	NO3	0.00	CO2	9.29
Mg	0.94	NH4	0.00	CO3	0.00	SO4	2.13	B	0.45	pH	5.2
Na	41.84	Ba	0.00	HCO3	0.82	F	5.26	SiO2	0.00		
SDT total										109.9	ppm

Figura 64. Temperatura 17°C. IMSdesign.

Resultados Cálculo							
Arreglo	Presión		Caudal/tubo		Flux	Beta	
	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.			
1-1	65.4	64.2	8.8	4.9	16.2	1.02	
1-2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	
1-3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	
1-4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	

Concentración Perm. (ppm)											
Ca	0.33	K	1.90	Sr	0.01	Cl	61.58	NO3	0.00	CO2	8.97
Mg	1.03	NH4	0.00	CO3	0.00	SO4	2.33	B	0.50	pH	5.3
Na	45.66	Ba	0.00	HCO3	0.91	F	5.74	SiO2	0.00		
SDT total										120.0	ppm

Figura 65. Temperatura 19°C. IMSdesign.

Resultados Cálculo							
Arreglo	Presión		Caudal/tubo		Flux	Beta	
	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.			
1-1	64.3	63.1	8.8	4.9	16.2	1.02	
1-2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	
1-3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	
1-4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	

Concentración Perm. (ppm)											
Ca	0.36	K	2.07	Sr	0.01	Cl	67.11	NO3	0.00	CO2	8.69
Mg	1.12	NH4	0.00	CO3	0.00	SO4	2.54	B	0.56	pH	5.3
Na	49.76	Ba	0.00	HCO3	1.00	F	6.26	SiO2	0.00		
SDT total										130.8	ppm

Figura 66. Temperatura 21°C. IMSdesign.

Resultados Cálculo							
Arreglo	Presión		Caudal/tubo		Flux	Beta	
	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.			
1-1	63.1	61.9	8.8	4.9	16.2	1.02	
1-2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	
1-3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	
1-4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	

Concentración Perm. (ppm)											
Ca	0.41	K	2.35	Sr	0.01	Cl	76.19	NO3	0.00	CO2	8.30
Mg	1.27	NH4	0.00	CO3	0.00	SO4	2.88	B	0.66	pH	5.4
Na	56.49	Ba	0.00	HCO3	1.15	F	7.10	SiO2	0.00		
SDT total										148.5	ppm

Figura 67. Temperatura 24°C. IMSdesign.

En la Tabla 15 se muestra un resumen de los datos obtenidos en este análisis en variando la temperatura de agua de entrada al núcleo de desalación, donde como se aprecia que la tendencia de la presión de operación es a aumentar a medida que baja la temperatura, sin embargo, el índice de boro y el SDT aumentan a medida que aumenta la temperatura.

Temperatura (°C)	P. Operación (bar)	Boro (ppm)	SDT (ppm)
17	66,80	0,45	109,90
19	65,40	0,50	120,00
21	64,30	0,56	130,80
24	63,10	0,66	148,50

Tabla 15. Variación con temperatura.

## 5.2 Variación de pH del agua

El pH del agua de mar varía entre 8,1 y 8,6, pero antes de que esta agua llegue al núcleo de desalación, es tratada para tener unas determinadas condiciones y así optimizar el proceso de desalación y evitar posibles problemas con los equipos. Una de las partes más importante de este proceso de pretratamiento consiste en el control del pH para evitar problemas por precipitaciones y facilitar el funcionamiento de la membrana.

Para la membrana SWC4 MAX el fabricante recomienda un pH de entre 6,5 y 7, por lo que se evaluarán los valores de pH entre 6 y 8 en intervalos de 0,5 aunque, al ser un parámetro regulable, se fijará a 7 para las evaluaciones más desfavorables.

En este caso como parámetros fijos tenemos la temperatura del agua, que se fijará en 20°C, y la edad de la membrana, que será de 2 años como en el caso anterior.

La Tabla 16 muestra los resultados obtenidos con el software del fabricante para los distintos valores de pH, donde se ha añadido una columna correspondiente a la dosificación química de pretratamiento (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) necesaria para conseguir el pH deseado.

pH	P. Operación (bar)	Boro (ppm)	SDT (ppm)	H2SO4 (ppm)
6	64,80	0,55	124,90	18,70
6,5	64,80	0,55	125,20	18,40
7	64,90	0,53	125,30	17,20
7,5	64,90	0,49	125,30	13,60
8	64,90	0,41	125,50	3,50

Tabla 16. Variación con el pH.

A a medida que aumenta el pH, el índice de boro disminuye, los parámetros STD y presión de operación apenas se modifican al variar el pH, y la dosificación de químico aumenta a medida que el pH de entrada al núcleo de desalación se aleja del pH del agua del mar, tomado en este caso como 8,1.

Resultados Cálculo									
Presión		Caudal/tubo		Flux		Beta			
Arreolo	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta			
1-1	64,8	63,6	8,8	4,9	16,2	1,02			
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00			
1-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00			
1-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00			
Concentración Perm. (ppm)									
Ca	0,34K	1,99Sr	0,01Cl	64,29NO3	0,00CO2	54,22			
Mg	1,07NH4	0,00CO3	0,00SO4	2,43B	0,55pH	4,3			
Na	47,67Ba	0,00HCO3	0,58F	6,00SiO2	0,00				
					SDT total	124,9	ppm		

Figura 68. pH 6. IMSdesign.

Resultados Cálculo									
Presión		Caudal/tubo		Flux		Beta			
Arreolo	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta			
1-1	64,8	63,6	8,8	4,9	16,2	1,02			
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00			
1-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00			
1-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00			
Concentración Perm. (ppm)									
Ca	0,34K	1,99Sr	0,01Cl	64,29NO3	0,00CO2	24,34			
Mg	1,07NH4	0,00CO3	0,00SO4	2,43B	0,55pH	4,8			
Na	47,67Ba	0,00HCO3	0,83F	6,00SiO2	0,00				
					SDT total	125,2	ppm		

Figura 69. pH 6,5. IMSdesign.

Resultados Cálculo											
Presión		Caudal/tubo									
Arreglo	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta					
1-1	64.9	63.7	8.8	4.9	16.2	1.02					
1-2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00					
1-3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00					
1-4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00					
Concentración Perm. (ppm)											
Ca	0.34	K	1.99	Sr	0.01	Cl	64.29	NO3	0.00	CO2	8.83
Mg	1.07	NH4	0.00	CO3	0.00	SO4	2.43	B	0.53	pH	5.3
Na	47.67	Ba	0.00	HCO3	0.95	F	6.00	SiO2	0.00		
SDT total										125.3	ppm

Figura 70. pH 7. IMSdesign.

Resultados Cálculo											
Presión		Caudal/tubo									
Arreglo	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta					
1-1	64.9	63.7	8.8	4.9	16.2	1.02					
1-2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00					
1-3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00					
1-4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00					
Concentración Perm. (ppm)											
Ca	0.34	K	1.99	Sr	0.01	Cl	64.30	NO3	0.00	CO2	2.88
Mg	1.07	NH4	0.00	CO3	0.00	SO4	2.43	B	0.49	pH	5.8
Na	47.68	Ba	0.00	HCO3	0.98	F	6.00	SiO2	0.00		
SDT total										125.3	ppm

Figura 71. pH 7,5. IMSdesign.

Resultados Cálculo											
Presión		Caudal/tubo									
Arreglo	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta					
1-1	64.9	63.7	8.8	4.9	16.2	1.02					
1-2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00					
1-3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00					
1-4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00					
Concentración Perm. (ppm)											
Ca	0.34	K	1.99	Sr	0.01	Cl	64.29	NO3	0.00	CO2	0.87
Mg	1.07	NH4	0.00	CO3	0.00	SO4	2.42	B	0.41	pH	6.3
Na	47.68	Ba	0.00	HCO3	0.94	F	6.00	SiO2	0.00		
SDT total										125.1	ppm

Figura 72. pH 8. IMSdesign.

### 5.3 Variación de edad de la membrana

Con el uso, las membranas se van ensuciando, por lo que es necesario hacer un estudio del tiempo de utilización. Para ello se hace uso de los datos del fabricante, el que recomienda un tiempo de uso de las membranas de entre 3 y 4 años. Se estudiarán los casos desde 0 hasta 4 años de membrana yendo año por año.

En cuanto a la disminución de flujo e incremento de paso de sales por año se tomarán los datos que ofrece el software IMSdesign del propio fabricante, los cuales son respectivamente 5% y 7%.

El parámetro de temperatura se mantendrá igual que el caso anterior a 20°C y el pH a 7.

En la Tabla 17 se muestran los resultados obtenidos para los distintos años de utilización de la membrana.

Años	P. Operación (bar)	Boro (ppm)	SDT (ppm)
0	62,80	0,47	110,50
1	63,80	0,50	117,90
2	64,90	0,53	125,30
3	66,00	0,56	132,70
4	67,20	0,59	140,00

Tabla 17. Variación con la edad de la membrana.

Era predecible que los parámetros estudiados (presión de operación, índice de boro y SDT) aumentarían con el tiempo de uso de las membranas debido al incremento de paso de sales y al ensuciamiento. La edad adquiere gran influencia en la presión de operación, por lo que es necesario tener en cuenta este dato a la hora de dimensionar otros elementos, especialmente la bomba de alta presión.

Resultados Cálculo							
Presión		Caudal/tubo		m3/hr		l/m2-hr	
Arreglo	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta	
1-1	62,8	61,5	8,8	4,9	16,2	1,02	
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	
1-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	
1-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	

Concentración Perm. (ppm)							
Ca	0,30K	1,75Sr	0,01Cl	56,70NO3	0,00CO2	8,83	
Mg	0,94NH4	0,00CO3	0,00SO4	2,14B	0,47pH	5,2	
Na	42,04Ba	0,00HCO3	0,84F	5,29SiO2	0,00		
SDT total						110,5 ppm	

Figura 73. Membrana nueva. IMSdesign.

Resultados Cálculo							
Presión		Caudal/tubo		m3/hr		l/m2-hr	
Arreglo	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta	
1-1	63,8	62,6	8,8	4,9	16,2	1,02	
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	
1-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	
1-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	

Concentración Perm. (ppm)							
Ca	0,32K	1,87Sr	0,01Cl	60,50NO3	0,00CO2	8,83	
Mg	1,01NH4	0,00CO3	0,00SO4	2,29B	0,50pH	5,2	
Na	44,86Ba	0,00HCO3	0,90F	5,64SiO2	0,00		
SDT total						117,9 ppm	

Figura 74. Membrana de 1 año. IMSdesign.

Resultados Cálculo							
Presión		Caudal/tubo		m3/hr		l/m2-hr	
Arreglo	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta	
1-1	64,9	63,7	8,8	4,9	16,2	1,02	
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	
1-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	
1-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	

Concentración Perm. (ppm)							
Ca	0,34K	1,99Sr	0,01Cl	64,29NO3	0,00CO2	8,83	
Mg	1,07NH4	0,00CO3	0,00SO4	2,43B	0,53pH	5,3	
Na	47,67Ba	0,00HCO3	0,95F	6,00SiO2	0,00		
SDT total						125,3 ppm	

Figura 75. Membrana de 2 años. IMSdesign.

Resultados Cálculo							
Presión		Caudal/tubo		m3/hr		l/m2-hr	
Arreglo	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta	
1-1	66,0	64,8	8,8	4,9	16,2	1,02	
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	
1-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	
1-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	

Concentración Perm. (ppm)							
Ca	0,36K	2,10Sr	0,01Cl	68,08NO3	0,00CO2	8,83	
Mg	1,13NH4	0,00CO3	0,00SO4	2,57B	0,56pH	5,3	
Na	50,48Ba	0,00HCO3	1,01F	6,35SiO2	0,00		
SDT total						132,7 ppm	

Figura 76. Membrana de 3 años. IMSdesign.

Resultados Cálculo							
Presión		Caudal/tubo		m3/hr		l/m2-hr	
Arreglo	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta	
1-1	67,2	66,0	8,8	4,9	16,2	1,02	
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	
1-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	
1-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	

Concentración Perm. (ppm)							
Ca	0,38K	2,22Sr	0,01Cl	71,85NO3	0,00CO2	8,83	
Mg	1,20NH4	0,00CO3	0,00SO4	2,72B	0,59pH	5,3	
Na	53,28Ba	0,00HCO3	1,06F	6,70SiO2	0,00		
SDT total						140,0 ppm	

Figura 77. Membrana de 4 años. IMSdesign.

## 5.4 Casos más desfavorables

Como se comentó anteriormente, se buscarán los dos casos más desfavorables, donde haya una mayor presión de operación y donde el índice de boro sea mayor. Para ello recurrimos a la Figura 78, donde se muestran las gráficas, a modo de resumen, de los resultados obtenidos en los estudios en los apartados anteriores.

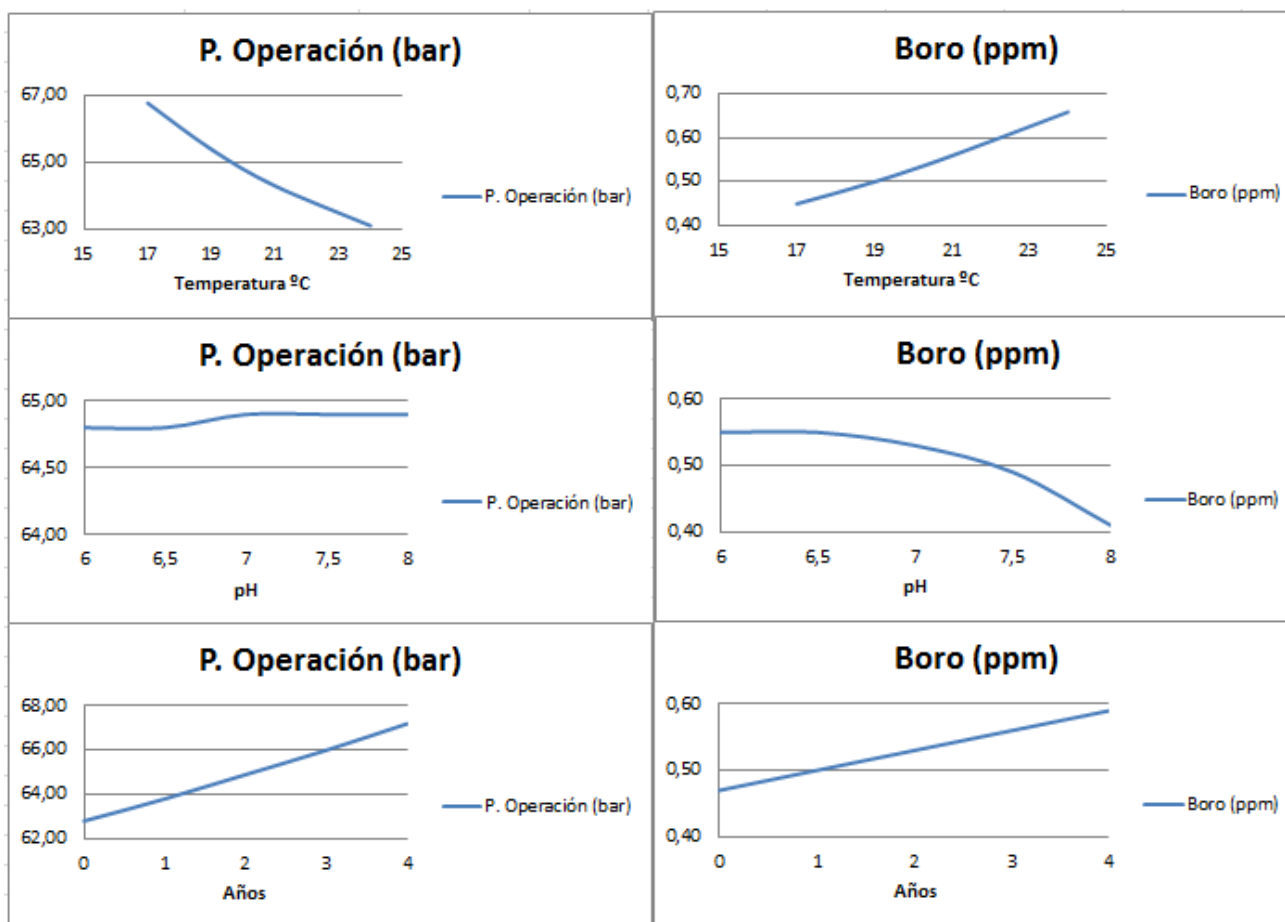


Figura 78. Resumen de variables para membranas.

En la búsqueda del caso más desfavorable se desprejará la variación en el pH de entrada al núcleo de desalación ya que se fijará a 7 por recomendación del fabricante. Teniendo en cuenta esto, los casos más desfavorables son:

- Para la presión de operación (P. Operación): Menor temperatura y más edad de membranas.
- Para el índice de boro (Boro): Mayor temperatura y más edad de membranas.

En ambos casos coinciden en pH de 7 y en edad de la membrana, que será diseñada para 4 años, por lo tanto estos valores quedarán fijos, y el factor determinante a la hora de determinar el caso más desfavorable para presión de operación e índice de boro será la temperatura más baja y más alta respectivamente. Pasamos a hacer el estudio de estos dos casos, para temperaturas de 17 y 24°C.

Resultados Cálculo									
		Presión bar		Caudal/tubo		m3/hr		Vm2-hr	
Arreglo	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta			
1-1	71,1	69,8	8,8	4,9	16,2	1,03			
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00			
1-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00			
1-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00			

Concentración Perm. (ppm)											
Ca	0,35	K	2,00	Sr	0,01	Cl	64,88	NO3	0,00	CO2	9,50
Mg	1,08	NH4	0,00	CO3	0,00	SO4	2,45	B	0,52	pH	5,3
Na	48,11	Ba	0,00	HCO3	0,95	F	6,05	SiO2	0,00		
SDT total										126,4	ppm

Figura 79. 17°C, pH7 y años de membrana. P. Operación. IMSdesign.

Resultados Cálculo									
		Presión bar		Caudal/tubo		m3/hr		Vm2-hr	
Arreglo	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta			
1-1	66,8	65,6	8,8	4,9	16,2	1,02			
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00			
1-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00			
1-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00			

Concentración Perm. (ppm)											
Ca	0,47	K	2,71	Sr	0,01	Cl	87,62	NO3	0,00	CO2	8,51
Mg	1,46	NH4	0,00	CO3	0,00	SO4	3,32	B	0,75	pH	5,4
Na	64,96	Ba	0,00	HCO3	1,33	F	8,17	SiO2	0,00		
SDT total										170,8	ppm

Figura 80. 24°C, pH7 y años de membrana. Índice de boro. IMSdesign.

La máxima presión de operación será de 71,1 bar, cuando el agua esté a 17°C, y el mayor índice de boro obtenido en el agua producto será de 0,75 ppm, cuando el agua esté a 24°C, este valor se considera muy aceptable ya que está por debajo del requisito legal de 1ppm teniendo un margen del 25%.

Hay que tener en cuenta que en estas comprobaciones no se ha considerado el recuperador de energía, un intercambiador de presión, por lo que durante el estudio, se realizará la comprobación en estas condiciones más desfavorables para obtener resultados que se acerquen más a la realidad, ya que debido a la mezcla de flujos en el intercambiador, las propiedades del agua de entrada a la membrana se ven modificadas, y por lo tanto, también las del agua producto.





## 6 ANEXO VI. SOFTWARE ESPECÍFICO

Este anexo servirá para dar a conocer cómo funciona el software específico utilizado, tanto los diseñados por los fabricantes particulares como las hojas de cálculos de elaboración propia.

### 6.1 IMSdesing

El software IMSdesign es el calculador de núcleos de desalación diseñado por la casa Hydranautics, especializado el diseño de plantas de desalación mediante osmosis inversa utilizando las membranas que ofrecen en su catálogo de productos.

Este programa se puede descargar de forma gratuita desde la página web oficial de Hydranautics ([www.membranes.com](http://www.membranes.com)). Tras su descarga e instalación, al ejecutarlo ofrece la posibilidad de diseñar sistemas de ultra filtración (UF), ósmosis inversa (OI) o sistemas mixtos (OI + UF), Figura 81.



Figura 81. Interfaz principal. IMSdesign

Para el caso de estudio, se accede a la opción de Diseño OI ya que lo que se desea dimensionar es el sistema de membranas de OI. Al seleccionarlo, se abre la ventana de Análisis (Figura82), donde se solicitan los datos de proyecto (Nombre, código y fecha), así como las propiedades físico-químicas del agua de alimentación. En esta primera entrada de datos, el programa permite realizar un

autobalance de iones y calcula automáticamente la concentración de sales disueltas (SDT) y la presión osmótica.

Proyecto	JF	Código	JF	Alim.	Agua de mar - pozo	Fecha		
pH	8,10	Turbid.	0,0	Cond. E	59065 µS/cm	CO2	0,834 ppm	
Temp.	21,0 C	SDI	3,0	H2S	0,0 ppm	Fe	0,000 ppm	
Ca	412,0 ppm		20,55 meq	CO3	14,8 ppm		0,49 meq	
Mg	1290,0 ppm		106,17 meq	HCO3	154,0 ppm		2,52 meq	
Na	11970,8 ppm		520,47 meq	SO4	2910,0 ppm		60,63 meq	
K	399,0 ppm		10,23 meq	Cl	19369,0 ppm		546,38 meq	
NH4	0,0 ppm		0,00 meq	F	904,0 ppm		47,58 meq	
Ba	0,014 ppm		0,00 meq	NO3	0,0 ppm		0,00 meq	
Sr	7,900 ppm		0,18 meq	B	4,50 ppm		0,00 meq	
				SiO2	0,0 ppm		0,00 meq	
Total Positiv.		657,60 meq		Auto balance		Total Negativ.		657,60 meq
SDT calculados	37436 ppm			Fuerza iónica	0,752		Impr.	
Sat. CaSO4	22,0 %			Sat. BaSO4	56,6 %			
Sat. Sílice	0,0 %			Saturación de	26,3 %		Guardar	
Índ. saturación	1,2 Langelier			Presión osmótica	27,6 bar			

Figura 82. Ventana de análisis del agua. IMSdesign.

Una vez definidas las propiedades del agua a tratar, se pasa al apartado de Diseño OI. En este apartado, en la parte superior, se deben añadir los datos correspondientes a:

- Tipo de agua de alimentación
- pH y temperatura del agua a la entrada de la membrana.
- Edad en años de la membrana.
- Tipo de químico para el pretratamiento y concentración. En el alcance del proyecto no se contemplan las condiciones químicas del pretratamiento del agua, sin embargo se elegirá ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) con una concentración del 100% como químico de pretratamiento ya que es el más utilizado para agua de mar.
- Caudal de agua producto deseado y el porcentaje de recuperación.
- Disminución de flujo anual, factor de ensuciamiento e incrementos de sales por año. Estos parámetros de funcionamiento serán los preestablecidos por el propio software.
- Sistema de mezclas, recirculación o recuperación de energía.

En la parte inferior se incorporan los datos relativos a:

- Número de pasos y etapas del núcleo de desalación.

- Modelo comercial de membranas a utilizar.

Inicialmente se añaden los datos relativos al caudal de agua producto y porcentaje de recuperación, además de los referentes a las propiedades del agua y edad y modelo de las membranas.

Al pulsar el botón ``Recalcular`` el software calcula la dosificación del producto químico seleccionado, el flux promedio (caudal de agua por unidad de superficie de la membrana) y los caudales de alimentación y de concentrado, también propone la configuración de membranas por tubo y cantidad de tubos más recomendable para dichas condiciones de funcionamiento. En la Figura 83 se muestra la interfaz del Diseño OI.

En este caso, se propone el estudio de una planta de desalación de un único paso con una única etapa.

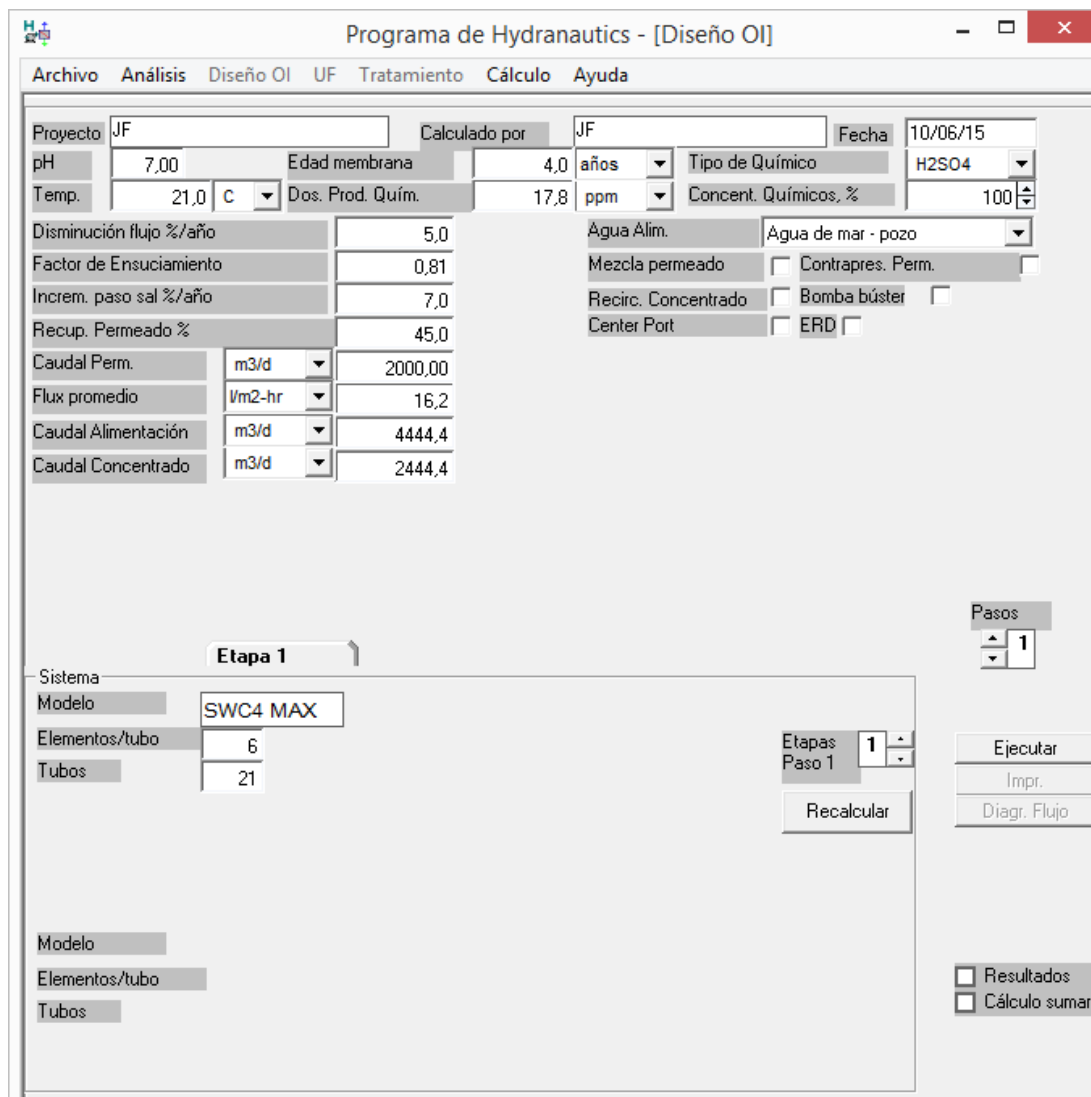
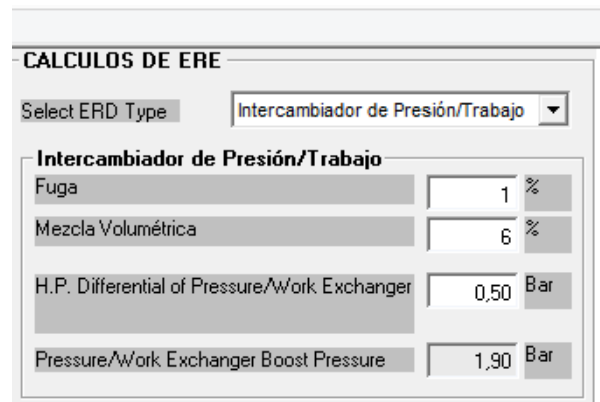


Figura 83. Ventana de diseño de OI. IMSdesign.

En caso de añadir un recuperador de energía por intercambiador de presión se debe seleccionar la casilla ``ERD``, entonces surgirá la ventana auxiliar de la Figura 84, haciendo referencia a los datos del intercambiador de presión.



**CALCULOS DE ERE**

Select ERD Type: Intercambiador de Presión/Trabajo

**Intercambiador de Presión/Trabajo**

Fuga: 1 %

Mezcla Volumétrica: 6 %

H.P. Differential of Pressure/Work Exchanger: 0,50 Bar

Pressure/Work Exchanger Boost Pressure: 1,90 Bar

Figura 84. Datos para intercambiador de presión. IMSdesign.

Inicialmente el software propone unos valores típicos de fuga, mezcla volumétrica y diferencia de presión, pero permite su modificación en caso de disponer de datos reales o proporcionados por el fabricante del intercambiador instalado.

Cuando ya están insertados todos los datos referentes al estudio se pulsa el botón ``Ejecutar`` mostrado en la Figura 83. En este momento el programa realiza los cálculos oportunos y muestra las propiedades esperadas para el agua producto y el agua de rechazo (concentrado) (Figura 85), permitiendo generar un informe en formato PDF del estudio realizado al pulsar el botón ``Impr`` o mostrar un diagrama de flujos del sistema (Figura 86) donde se muestran los caudales, presiones y concentraciones de sales del fluido en cada punto al pulsar el botón ``Diagr.Flujo``.

Resultados Cálculo									
		Presión		Caudal/tubo		Flux		Beta	
Arreglo	Tubos	Alim.	Conc.	Alim.	Conc.	Flux	Beta		
1-1	21	68,3	67,1	8,8	4,9	16,2	1,02		
1-2	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		
1-3	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		
1-4	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00		

Concentración Perm. (ppm)											
Ca	0,41	K	2,38	Sr	0,01	Cl	77,20	NO3	0,00	CO2	8,89
Mg	1,29	NH4	0,00	CO3	0,00	SO4	2,92	B	0,64	pH	5,3
Na	57,24	Ba	0,00	HCO3	1,15	F	7,20	SiO2	0,00		
SDT total										150,4	ppm

Parámetros Conc.					
CaSO4 sat. %	48	SrSO4 sat. %	58	Fuerza iónica	1,40
BaSO4 sat. %	116	SiO2 sat. %	0	Presión osmótica	51,5
Indice Saturación: Langelier		0,5	Stiff & Davis		-0,47
		SDT total		69875,1	
ppm					

Nota: Usar Inhib. Incrust.

Figura 85. Resultados de cálculo. IMSdesign.

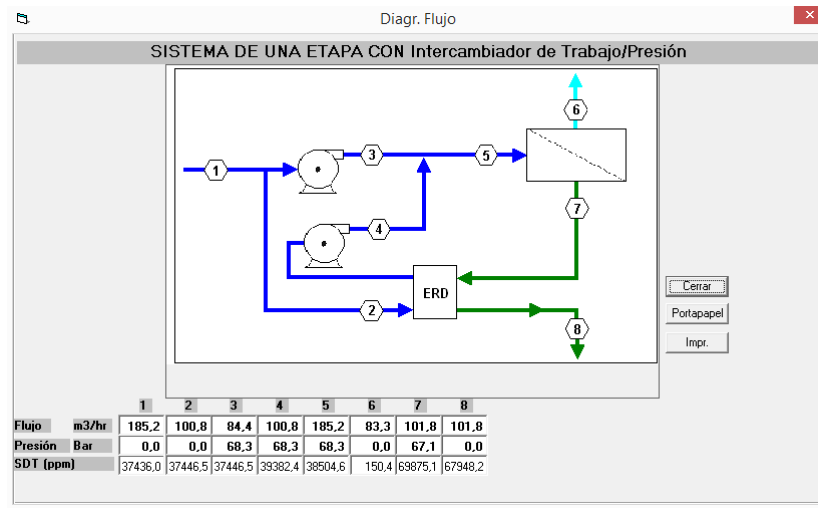


Figura 86. Diagrama de flujos. IMSdesign.

Para abordar el presente proyecto, estas opciones del programan han sido suficientes, sin embargo dispone de un apartado dedicado al cálculo que sería de gran utilidad en caso de realizar estudios utilizando únicamente el IMSdesign.

El apartado de "Calculo" dispone de dos opciones. En una de ellas, "Requer. de energía" se puede calcular el consumo específico del núcleo de desalación incorporando los datos relativos a la bomba, su rendimiento hidráulico y eléctrico. En la otra, "Coste" (Figura 87), permite hacer un sondeo de la inversión y el coste total del agua, para ello se deben incorporar datos relativos al coste de la energía, vida útil de la planta y de las membranas, coste de productos químicos, etc.

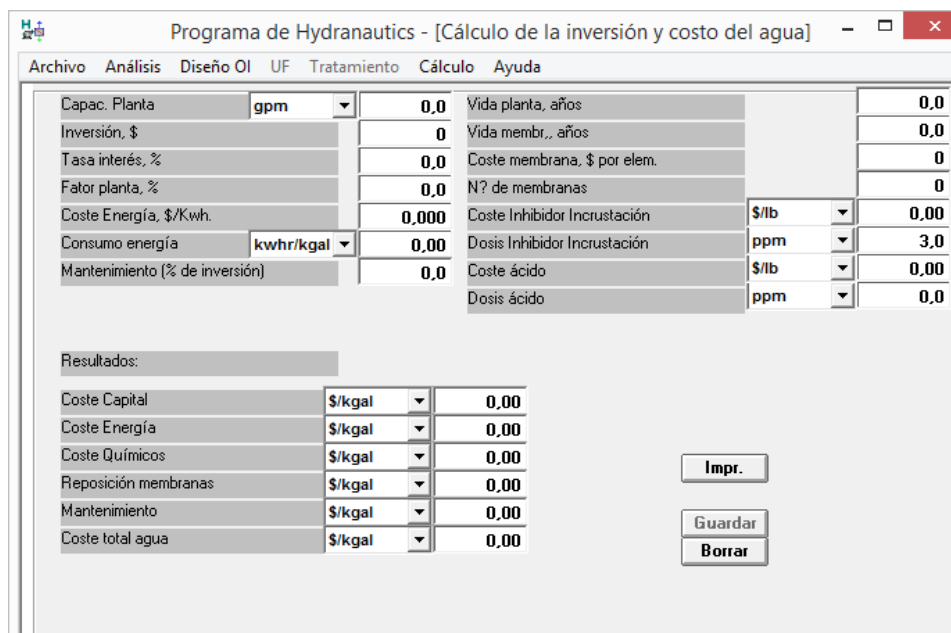


Figura 87. Apartado de coste. IMSdesign.

## 6.2 Energy Recovery

Energy Recovery dispone de su software para dimensionado de equipos de intercambiadores de presión, el ERI PowerModel Selector. Es una hoja de cálculos diseñada por el fabricante que permite elegir para un sistema de desalación en concreto un modelo de intercambiadores de presión calculando el número de elementos necesarios para su correcto funcionamiento. El software se puede descargar gratuitamente en la página web de Energy Recovery ([www.energyrecovery.com](http://www.energyrecovery.com)), donde tras descargarse no requiere instalación para su uso.

El interfaz de la hoja de cálculos se muestra en la Figura 88, los datos de entrada son las casillas con fondo rosado y fuente color roja, son:

- Los relativos a la concentración de sales, temperatura y presión del agua de captación a la entrada del núcleo de desalación
- Presión de entrada y salida de las membranas con el porcentaje de recuperación.
- Caudal de agua producto, concentración de sales y presión a la salida de las membranas.
- Modelo de intercambiador a utilizar (cuadro central con el texto ``PX-220``), además dispone de un auto selector, el botón ``AUTO SELECT PX MODEL & QTY`` que selecciona automáticamente el modelo que más se ajusta al sistema.

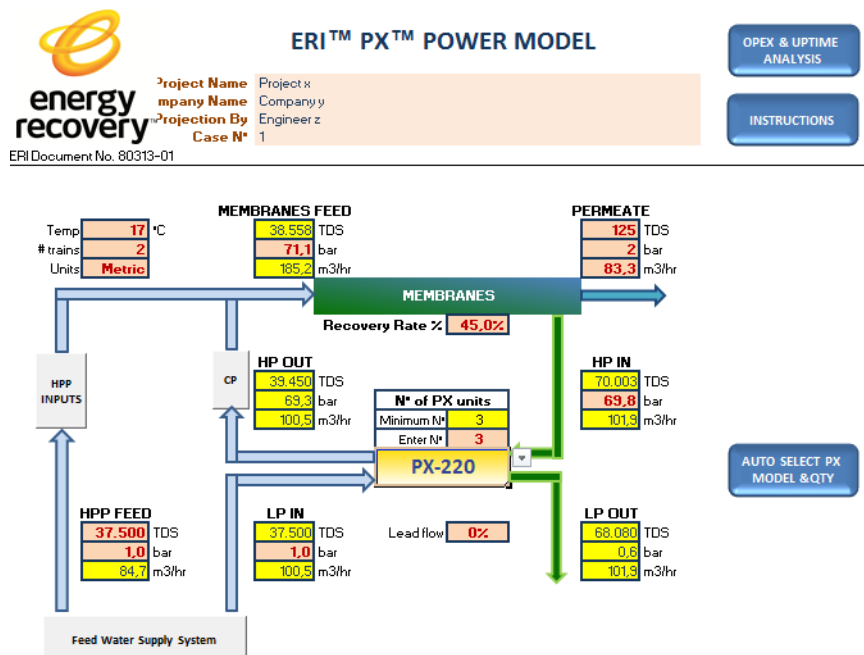


Figura 88. Interfaz de entrada de datos. Energy Recovery.

Por defecto, el software incorpora datos referentes a las bombas de alimentación, bomba de alta presión y booster, ya que al igual que el IMSdesign, permite realizar análisis energéticos del sistema pulsando el botón "OPEX & UPTIME ANALYSIS". La configuración de las bombas se puede modificar pulsando sobre las casillas "Feed Water Supply", "HPP INPUTS" y "CP" respectivamente para cada bomba, donde se requiere el rendimiento hidráulico y el rendimiento del motor.

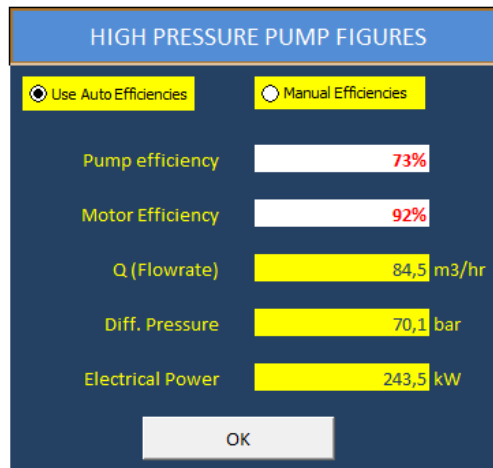


Figura 89. Datos referentes a las bombas. Energy Recovery.

Automáticamente tras insertar estos datos, el software calcula un número mínimo de intercambiadores de presión del modelo seleccionado así como los parámetros de salinidad y presión los distintos flujos de agua. En la parte inferior se muestra un cuadro resumen de los resultados (Figura 90), los cuales durante este proyecto han sido necesarios para conseguir una convergencia de resultados entre este software y el IMSdesign.

PX Technology Performance	
PX unitary flow	50,9 m3/hr
Salinity Increase at membranes	2,6%
Volumetric mixing VM	5,4%
Lubrication flow (LF) per PX array	1,2 m3/hr
LF as % of concentrate flow	1,2%
HP DP	0,9 bar
LP DP	0,7 bar
RO Specific Energy **	3,03 kWh/m3
Efficiency	96,63%

\*\* Does not Include Feedwater Supply Pump Energy consumption

Figura 90. Cuadro de resultados. Energy Recovery.



### 6.3 Hoja de cálculo elaboración propia para el sistema de desalación.

Para abarcar el cálculo energético del sistema de desalación se ha optado por la elaboración de una hoja de cálculo de elaboración propia.

Dentro de la hoja de cálculo se pueden diferenciar cinco apartados referentes a:

- Propiedades de los flujos.
- Cálculo de pérdidas de carga.
- Cuadro energético en los diferentes puntos de la instalación.
- Análisis energético de las bombas hidráulicas.
- Análisis energético de la planta de desalación.

En las tablas referentes a los cálculos habrán casillas sombreadas en color verde, las cuales harán referencia a valores decididos por el proyectista, elecciones propias del mismo, u obtenidos de otros software, y casillas sombreadas en naranja suave, los cuales harán referencia a parámetros fijados por diseño.

#### 6.3.1 Propiedades de los flujos

En este apartado se separan los flujos de alimentación, agua producto y rechazo. A partir del caudal de agua producto y la conversión de la planta se calculan los caudales (Q) de alimentación y de salmuera, mediante un balance de masas y el concepto de conversión, ecuaciones 14 y 15.

$$Q_{\text{alimentación}} = \frac{Q_{\text{producto}}}{\text{Conversión (tanto por uno)}} \quad (14)$$

$$Q_{\text{salmuera}} = Q_{\text{alimentación}} - Q_{\text{producto}} \quad (15)$$

Para la concentración de sales (C) se considerará nula (0) para el agua producto, y de 37437ppm para el agua de mar (dato obtenido del software IMSdesing tras incluir la composición química del agua), a partir de aquí con un balance de masas (16) para las concentraciones de sales se calculará la concentración de sales de la salmuera.

$$Q_{\text{alimentación}} * C_{\text{alimentación}} = Q_{\text{producto}} * C_{\text{producto}} + Q_{\text{rechazo}} * C_{\text{rechazo}} \quad (16)$$

La densidad del agua ( $\rho$ ) se fijará como la del agua pura a 25°C para el agua producto (997 kg/m<sup>3</sup>) y el agua de alimentación se tomará como valor común de agua de mar (1025 kg/m<sup>3</sup>). Nuevamente mediante un balance de masas (17) se calculará la densidad del flujo de rechazo.

$$Q_{\text{alimentación}} * \rho_{\text{alimentación}} = Q_{\text{producto}} * \rho_{\text{producto}} + Q_{\text{rechazo}} * \rho_{\text{rechazo}} \quad (17)$$

Realizando estos cálculos se consiguen los valores mostrados en la Figura 91 para los diferentes caudales flujos de agua.

Propiedades de los flujos						
Caudal	%	m <sup>3</sup> /dia	m <sup>3</sup> /s	Concentración (ppm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Peso esp. (N/m <sup>3</sup> )
Qproducto/bomba	45%	2000,00	0,023	0	997	9781
Qrechazo/intercambiador	55%	2444,44	0,028	68067	1048	10280
Qalimentación	100%	4444,44	0,051	37437	1025	10055

Figura 91. Interfaz de cálculo de las propiedades de los flujos.

### 6.3.2 Cálculos de pérdidas de carga

Los detalles sobre el cálculo de las pérdidas de carga así como las ecuaciones utilizadas se pueden ver en el ANEXO III. CÁLCULOS HIDRAULICOS apartado 3.1, por lo que en este apartado dedicado al software únicamente se mostrará el interfaz utilizado (Figura 92) mostrando además los resultados obtenidos para el presente proyecto y se explicará el procedimiento.

El procedimiento ha sido el de calcular un diámetro mediante el criterio de Bonnet para pasar a buscar una tubería comercial con un diámetro igual o superior. Una vez elegida la tubería y su material, se calcula la velocidad del fluido a través de ésta así como su número de Reynold. Posteriormente se procede a calcular el factor de fricción mediante la ecuación de Haaland para finalmente obtener la pérdida de carga (Hr) expresada en metros de la conducción, a esta pérdida de carga se le añadirá el 5% debido a los accesorios como pueden ser válvulas, codos... obteniendo la pérdida de carga utilizada para el diseño de la instalación.

Rugosidad de tubería k (mm)		Pérdidas de carga									
Caudal	kg/seg	Øbonnet (m)	Øcomercial (m)	V (m/s)	Reynold	L (m)	f (Haaland)	Hr (m)	% Accesorios	Hrt (m)	
Q(Producto)	23,08	0,19	0,20	0,737	165023	180	0,017	4,23	5%	4,44	
Q(Rechazo)	29,65	0,20	0,20	0,901	201695	300	0,016	10,22	5%	10,73	
Q(Alimentación total)	52,73	0,25	0,25	1,048	293375	200	0,015	5,52	5%	5,80	
Q(Alimentación individual)	26,36	0,19	0,20	0,819	183359	50	0,017	1,43	5%	1,50	

Figura 92. Interfaz de cálculo de pérdidas de carga.

### 6.3.3 Cuadro energético en los diferentes puntos de la instalación

En la hoja de cálculos se ha realizado un cuadro (Figura 93) donde se expone el caudal que circula por cada punto de estudio de la instalación así como energía potencial, cinética y de presión que tiene. Adicionalmente se ha añadido una columna donde se expone el total de la energía en cada punto y la presión a la que se encuentra el fluido.

Cuadro de estados energéticos en los puntos de la instalación						
Punto	Caudal	Potencial (m)	Cinética (m)	Presión (m)	Tota (m)	Presión (bar)
1	Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Total	18,50	0,06	24,86	43,42	2,50
3	Total	18,50	0,06	9,95	28,50	1,00
31	B. Alta	18,50	0,00	9,95	28,45	1,00
32	Intercambiador	18,50	0,00	9,95	28,45	1,00
4	Total	18,50	0,00	707,09	725,59	71,10
41	B. Alta	18,50	0,00	707,09	725,59	71,10
42	Intercambiador	18,50	0,00	707,09	725,59	71,10
5	Producto	18,50	0,03	5,11	23,64	0,50
6	Producto	18,50	0,03	3,07	21,59	0,30
7	Producto	36,00	0,00	0,00	36,00	0,00
8	Rechazo	18,50	0,00	678,99	697,49	69,80
9	Intercambiador	18,50	0,00	689,19	707,69	69,30
10	Rechazo	0,00	0,00	5,84	5,84	0,60

Figura 93. Cuadro de estados energéticos.

La energía cinética mostrada con valores nulos (0), hacen referencia a que a la hora de realizar los balances de energía esta variación no se tendrá en cuenta.

### 6.3.4 Análisis energético de las bombas hidráulicas.

El análisis energético de cada una de las bombas hidráulica es la principal finalidad de esta hoja de cálculos. Para ello se establecen los volúmenes de control de cada uno de los balances de energía oportunos con los caudales que pasarán por cada elemento (Figura 94). Los detalles sobre los balances de energía

realizados para cada uno de los equipos se pueden ver, como en los casos anteriores, en el ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS.

El procedimiento ha sido el de calcular la energía que debe suministrar la bomba en cuestión para que el agua de la entrada (primer punto del volumen de control) adquiera la energía necesaria en la salida (segundo punto del volumen de control), además, en los casos de la bomba de alimentación y de suministro, a esta diferencia de energía se le añadirá la energía debido a las pérdidas de carga.

A partir de ahí, teniendo en cuenta el peso específico del fluido ( $\gamma$ ), el caudal y la diferencia de energía se ha calculado la potencia hidráulica requerida ( $P_h$ ) (18), la potencia mecánica ( $P_m$ ) tras obtener el rendimiento hidráulico de la bomba seleccionada (19), y la potencia eléctrica ( $P_e$ ) suponiendo un rendimiento eléctrico del motor del 97% (20).

$$P_h = Q * \Delta H * \gamma (18)$$

$$P_m = P_h * \eta_{bomba} (19)$$

$$P_e = P_m * \eta_{eléctrico} (20)$$

Análisis energético de las bombas hidráulicas								
Proceso	V. Control	Caudal (m3/s)	Dif.Energía (m)	Potencia (Kw)	$\eta$ mecanico(%)	P. Mecánica (Kw)	$\eta$ eléctrico(%)	Potencia eléctrica
Bomba Alimentación	1--3	0,0257	50,72	13,12	79,5%	16,50	97,0%	17,01
Bomba Alta	3,1--4,1	0,0235	697,09	164,92	75,8%	217,57	97,0%	224,30
Bomba suministro	7--8	0,0231	18,85	4,27	85,6%	4,98	97,0%	5,14
Booster	10--4,2	0,0279	17,90	5,02	82,3%	6,11	97,0%	6,29

Figura 94. Interfaz de análisis energéticos de las bombas hidráulicas.

### 6.3.5 Análisis energético de la planta de desalación

Finalmente la hoja de cálculos muestra un cuadro resumen (Figura 95) con los principales consumos energéticos de la planta de desalación y la importancia que adquiere cada uno ellos frente al consumo total.

A fin de hacer un balance anual para poder hacer frente al dimensionado del sistema eólico o cualquier otro tipo de análisis energético, se ha calculado el consumo anual de la planta suponiendo un rendimiento anual de la misma del 90%.

R. Anual de la planta		90%		
Proceso	Potencia (kW)	Consumo específico	Consumo anual (GWh)	% Potencia
Captación	34,02	0,41	0,27	13%
Proceso OI	230,59	2,77	1,82	85%
Suministro	5,14	0,06	0,04	2%
Total	269,75	3,24	2,13	100%

Figura 95. Interfaz de análisis energético global de la planta de desalación.

## 6.4 Hoja de cálculo de elaboración propia para el sistema eólico

La hoja de cálculos diseñada para el dimensionado del sistema eólico se ha explicado detalladamente en el ANEXO IV. ELECCIÓN DE EQUIPOS apartado 4.2.3, debido a que se considera importante su entendimiento a la hora de abarcar dicho apartado a medida que se comparan los resultados con los obtenidos en la herramienta online del ITC y de WindPower.

## 7 ANEXO VII. EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE DESALACIÓN

Para poder predecir el consumo energético de la planta de desalación, y así realizar un correcto dimensionado de los aerogeneradores necesarios para alimentar la planta, es necesario realizar un análisis energético de sus principales equipos consumidores de energía, las bombas. Para esto, se debe prestar atención tanto a los rendimientos de los equipos cómo las propiedades del fluido a la entrada y salida de éstos.

Debido a falta de datos de los fabricantes, se tomará como valor de rendimiento eléctrico de las bombas un 97%, valor típico de los motores eléctricos.

Pese a que el rendimiento energético es solo uno de los factores a tener en cuenta a la hora de la selección de un equipo del sistema, en este caso será determinante ya que por lo general los fabricantes no están dispuestos a facilitar una información exhaustiva de sus productos a particulares o estudiantes.

### 7.1 Captación

Está considerado un consumo secundario junto con el consumo por suministro, aun así, es importante analizar el consumo energético de esta etapa a la hora de conocer el consumo global de la planta.

El proceso de captación de agua de mar se realizará mediante dos bombas UPA 200B-80/13 del fabricante KSB cuyo rendimiento hidráulico es del 79,5% con un rendimiento eléctrico del 97%.

El caudal que pasa por cada una de estas bombas es de 25,7 l/s y la energía a aportar por la bomba es de 50,72 m, podemos ver más detalles sobre el punto de operación de la bomba en de ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS.

Por esta bomba el fluido que pasará es directamente agua de mar, por lo que su densidad se considera de 1025 kg/m<sup>3</sup>.

Con estos datos se calcula la energía hidráulica necesaria en la etapa de captación (21), a la que se le aplicarán los rendimientos hidráulicos (22) y eléctricos (23).

$$Ph = Q * E * \gamma(21)$$

$$P_m = P_h / \eta_h (22)$$

$$P_e = P_m / \eta_e (23)$$

Q: Caudal en m<sup>3</sup>/s.

E: Energía en m.

$\gamma$ : Peso específico en kN/m<sup>3</sup>.

Ph: Potencia hidráulica

Pm: Potencia mecánica.

Pe: Potencia eléctrica.

$$P_h = 0.0257 * 50.72 * 1.025 * 9.81 = 13.12 \text{ kW}$$

$$P_m = \frac{13.12}{0.795} = 16.50 \text{ kW}$$

$$P_e = \frac{16.50}{0.97} = 17.01 \text{ kW}$$

La potencia eléctrica consumida por cada bomba de captación es de 17,01 kW, por lo que al haber dos funcionando simultáneamente, el proceso de captación tendrá un consumo de 34,02 kW.

## 7.2 Núcleo de desalación

Como ya se ha comentado en apartados anteriores representa el principal consumo energético de la planta, principalmente por la presencia de la bomba de alta presión.

### 7.2.1 Bomba booster

El salto de presión que debe hacer el fluido a atravesar la bomba boosters es mucho menor al que debe hacer la bomba de alta presión.

Como bomba booster se ha elegido una bomba 100x80FS S2GC5 del fabricante EBARA, con un rendimiento hidráulico del 82,3% y nuevamente bajo la suposición del rendimiento eléctrico de 97%.

El caudal que circula por la bomba booster es de 27,9 l/s y ésta debe aportar una energía de 17,90 m. Para más detalles sobre el punto de operación de la bomba remitirse al ANEXO III.CÁLCULOS HIDRÁULICOS.

El fluido que pasa por la bomba boosters se considerará agua de mar. Aunque tiene un pequeño porcentaje de salmuera debido a las fugas en el intercambiador de presión que haría aumentar su salinidad, y por lo tanto, su densidad, se considerará como agua de mar ya que ese pequeño porcentaje apenas hace variar sus propiedades, teniendo a efectos de cálculo una densidad de 1025 kg/m<sup>3</sup>.

Se pasa a calcular el consumo energético de la bomba booster.

$$Ph = 0.0279 * 17.90 * 1.025 * 9.81 = 5.02kW$$

$$Pm = \frac{5.02}{0.823} = 6.10kW$$

$$Pe = \frac{6.10}{0.97} = 6.21 kW$$

El proceso de elevar la presión del agua que pasa por el intercambiador consume una potencia eléctrica de 6,21 kW, como vemos una potencia muy inferior incluso que la requerida para la captación.



## 7.2.2 Bomba de alta presión

La bomba de alta presión es el principal elemento consumidor de energía en la planta de desalación ya que debe elevar la presión del agua desde la presión de entrada al núcleo de desalación, sobre 1 bar, a la presión de operación de la membrana, la cual puede superar los 70 bares.

La bomba 3x4x7 A del fabricante Energy Recovery es la elegida para este cometido. Su rendimiento hidráulico es del 75,8% y un rendimiento eléctrico del 97%.

Por la bomba de alta presión pasa un caudal de 23,5 l/s donde la energía que debe aportar la bomba para llegar a la presión de cálculo de diseño (71,1 bar) es de 697,09 m. El punto de operación de la bomba se puede comprobar en el ANEXO III.CÁLCULOS HIDRÁULICOS

El fluido que pasará por esta bomba es directamente agua de mar, por lo que su densidad se considera de 1025 kg/m<sup>3</sup>.

Con estos datos se calcula la energía eléctrica consumida en la bomba de alta presión de la misma forma que en los casos anteriores.

$$Ph = 0.0235 * 697.90 * 1.025 * 9.81 = 164.72kW$$

$$Pm = \frac{164.72}{0.758} = 217.31kW$$

$$Pe = \frac{217.31}{0.97} = 224.03 kW$$

Este consumo eléctrico es el principal de toda la planta superando con creces a la potencia de la bomba booster y las dos de captación. Su consumo es de 224,03 kW representando aproximadamente un 83% de la potencia total de la desaladora.

### 7.3 Suministro

Se finaliza con el sistema de suministro, otro consumo secundario como se comentó en el apartado de captación. El sistema de suministro se limitará solo a llevar el agua producto a unos depósitos reguladores, el transporte del agua desde estos depósitos hasta su punto de consumo tendrá un coste energético que no está dentro del alcance de este proyecto.

El proceso de suministro de agua de producto se realizará mediante la bomba 3D 65-125/7,5 del fabricante EBARA con un rendimiento hidráulico del 79,5% y un rendimiento mecánico-eléctrico del 97%.

El caudal que pasa por la bomba de suministro es de 23,1 l/s y la energía que se aporta al fluido es de 18,85 m, podemos ver más detalles sobre el punto de operación de la bomba en de ANEXO III. CÁLCULOS HIDRÁULICOS.

Por esta bomba el fluido que pasará el agua producto, ésta agua se considerará como agua pura debido a su bajo contenido en sales, por lo que su densidad se considera de 997 kg/m<sup>3</sup>.

A continuación, con los datos expuestos se calcula el consumo eléctrico de la etapa de suministro.

$$P_h = 0.0215 * 18.85 * 0.997 * 9.81 = 4.27kW$$

$$P_m = \frac{4.27}{0.856} = 4.98kW$$

$$P_e = \frac{4.98}{0.97} = 5.15kW$$

La bomba de suministro consumirá una potencia de 5,15 kW un consumo bastante bajo debido al poco recorrido y diferencia de altura desde la planta de desalación hasta los depósitos reguladores.