



---

Universidad  
de La Laguna

Escuela Superior de  
Ingeniería y Tecnología  
Sección de Ingeniería Industrial

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA E.S.I.T.**

## **Trabajo Fin de Grado**

ESTUDIO DE UNA PLANTA DE DESALACIÓN  
ALIMENTADA POR ENERGÍA EÓLICA PARA EL  
SUMINISTRO DE AGUA DE RIEGO PARA LA  
RECUPERACIÓN DEL ENTORNO HIDROLÓGICO DEL  
PARQUE NACIONAL DE DOÑANA

**Titulación:** Grado en Ingeniería Mecánica

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Alumno: Alberto Hernández González



*A mi familia*



# **ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA E.S.I.T.**

**TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica**

## **ÍNDICE GENERAL**

### **Trabajo Fin de Grado**

#### **TÍTULO**

**ESTUDIO DE UNA PLANTA DE DESALACIÓN ALIMENTADA POR ENERGÍA EÓLICA  
PARA EL SUMINISTRO DE AGUA DE RIEGO PARA LA RECUPERACIÓN DEL  
ENTORNO HIDROLÓGICO DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA**

#### **AUTOR**

*Alberto Hernández González*

#### **TUTOR**

*Vicente José Romero Ternero*



**MEMORIA**

<b>1. Objeto</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Alcance</b> .....	<b>5</b>
<b>3. Justificación del proyecto</b> .....	<b>6</b>
<b>4. Antecedentes</b> .....	<b>9</b>
<b>4.1. Ósmosis inversa</b> .....	<b>9</b>
<b>4.2. El problema del agua en Andalucía</b> .....	<b>12</b>
<b>4.3. Desalación de agua en Andalucía</b> .....	<b>14</b>
<b>4.4. Energía eólica</b> .....	<b>15</b>
<b>4.4.1. Energías renovables</b> .....	<b>15</b>
<b>4.4.2. Procedencia del viento</b> .....	<b>16</b>
<b>4.4.3. Ventajas y desventajas de la energía eólica</b> .....	<b>17</b>
<b>4.4.4. Aerogeneradores</b> .....	<b>17</b>
<b>4.4.5. Medidas preventivas y correctoras para aves y murciélagos</b> .....	<b>22</b>
<b>4.4.6. Offshore</b> .....	<b>24</b>
<b>4.4.7. Medidas preventivas y correctoras para cetáceos</b> .....	<b>28</b>
<b>4.5. Energía eólica en Andalucía</b> .....	<b>30</b>
<b>4.6. Antecedentes de desalación-eólica</b> .....	<b>32</b>
<b>5. Normas y referencias</b> .....	<b>32</b>
<b>6. Definiciones y abreviaturas</b> .....	<b>35</b>
<b>7. Requisitos del diseño</b> .....	<b>35</b>
<b>7.1. Datos del peticionario</b> .....	<b>35</b>
<b>7.2. El agua a tratar</b> .....	<b>35</b>
<b>7.2.1. Composición del agua a tratar</b> .....	<b>35</b>
<b>7.2.2. Temperatura del agua a tratar</b> .....	<b>37</b>
<b>7.3. El agua producto</b> .....	<b>38</b>
<b>7.3.1. Uso del agua producto</b> .....	<b>38</b>
<b>7.3.2. Composición del agua producto</b> .....	<b>40</b>
<b>7.4. Capacidad de la instalación</b> .....	<b>42</b>
<b>8. Situación y emplazamiento</b> .....	<b>43</b>
<b>8.1. Localización planta desalación</b> .....	<b>43</b>
<b>8.2. Localización aerogeneradores</b> .....	<b>46</b>
<b>9. Análisis de soluciones</b> .....	<b>49</b>
<b>9.1. Pretratamientos físicos</b> .....	<b>49</b>
<b>9.1.1. Selección del filtro de cartucho (filtración fina)</b> .....	<b>49</b>

<b>9.2. Pretratamientos químicos</b> .....	<b>50</b>
<b>9.2.1. Pretratamiento usado</b> .....	<b>51</b>
<b>9.3. Núcleo de desalación</b> .....	<b>51</b>
<b>9.3.1. Capacidad de la instalación</b> .....	<b>51</b>
<b>9.3.2. Diseño del núcleo de desalación</b> .....	<b>51</b>
<b>9.3.3. Recuperación de energía</b> .....	<b>63</b>
<b>9.3.4. Bomba <i>Booster</i></b> .....	<b>67</b>
<b>9.3.5. Bomba de alta presión</b> .....	<b>68</b>
<b>9.3.6. Salmuera</b> .....	<b>71</b>
<b>9.4. Sistema de captación</b> .....	<b>72</b>
<b>9.4.1. Características de la zona de captación</b> .....	<b>72</b>
<b>9.4.2. Elección del sistema de captación</b> .....	<b>73</b>
<b>9.4.3. Bombas de captación</b> .....	<b>80</b>
<b>9.5. Post-tratamientos</b> .....	<b>84</b>
<b>9.5.1. Post-tratamiento usado</b> .....	<b>84</b>
<b>9.6. Sistema de distribución</b> .....	<b>84</b>
<b>9.6.1. Depósito de almacenamiento</b> .....	<b>84</b>
<b>9.6.2. Localización del depósito de almacenamiento</b> .....	<b>85</b>
<b>9.6.3. Bomba de distribución</b> .....	<b>87</b>
<b>9.6.4. Dimensionado de la bomba de distribución</b> .....	<b>87</b>
<b>9.7. Consumo específico de la planta</b> .....	<b>89</b>
<b>9.8. Energía eólica</b> .....	<b>90</b>
<b>9.8.1. Cálculo del recurso eólico</b> .....	<b>90</b>
<b>9.8.2. Cálculos para la selección del aerogenerador</b> .....	<b>94</b>
<b>9.8.3. Elección del aerogenerador</b> .....	<b>99</b>
<b>10. Alternativas para el aprovechamiento de la instalación eólica</b> .....	<b>101</b>
<b>11. Solución adoptada</b> .....	<b>102</b>
<b>11.1. Desalación</b> .....	<b>102</b>
<b>11.2. Eólica</b> .....	<b>106</b>
<b>11.3. Medidas preventivas medioambientales</b> .....	<b>107</b>
<b>12. Conclusiones</b> .....	<b>108</b>

**ANEXO I**

<b>1. Descripción.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Sistema de captación .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. Tipos de sistema de captación .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. Tipos de bombas de captación .....</b>	<b>8</b>
<b>3. Pretratamiento físico .....</b>	<b>8</b>
<b>3.1. Filtro de cartucho.....</b>	<b>8</b>
<b>4. Pretratamientos químicos.....</b>	<b>9</b>
<b>4.1. Desinfección .....</b>	<b>9</b>
<b>4.2. Ajuste de pH .....</b>	<b>10</b>
<b>4.3. Decloración .....</b>	<b>10</b>
<b>4.4. Inhibición.....</b>	<b>10</b>
<b>5. Núcleo de desalación.....</b>	<b>10</b>
<b>5.1. Teoría de membranas de ósmosis Inversa .....</b>	<b>10</b>
<b>5.1.1. Configuraciones.....</b>	<b>10</b>
<b>5.1.2. Rechazo de sales .....</b>	<b>11</b>
<b>5.1.3. Conversión o recobro.....</b>	<b>12</b>
<b>5.1.4. Presión.....</b>	<b>13</b>
<b>5.1.5. Superficie de membranas .....</b>	<b>13</b>
<b>5.1.6. Número de membranas .....</b>	<b>14</b>
<b>5.1.7. Número de etapas.....</b>	<b>14</b>
<b>5.2. Recuperador de energía.....</b>	<b>15</b>
<b>5.2.1. Tipos de recuperadores de energía.....</b>	<b>15</b>
<b>5.3. Bomba <i>Booster</i>.....</b>	<b>19</b>
<b>5.4. Bombas de alta presión.....</b>	<b>19</b>
<b>5.4.1. Tipos de bombas de alta presión.....</b>	<b>19</b>
<b>6. Post-tratamientos .....</b>	<b>20</b>
<b>6.1. Tipos de post-tratamientos.....</b>	<b>20</b>

**ANEXO II**

<b>1. Cálculo de la potencia generada por aerogenerador .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Descripción .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Recurso eólico.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Curvas de potencia .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4. Producción de energía .....</b>	<b>11</b>

**ANEXO III**

<b>1. Cálculo de pérdidas de carga.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Pérdidas en la conducción de captación .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Pérdidas en el pretratamiento físico .....</b>	<b>14</b>
<b>1.3. Pérdidas en la conducción de distribución.....</b>	<b>15</b>
<b>1.4. Pérdidas en la conducción de salmuera .....</b>	<b>18</b>
<b>2. Cálculo de la altura útil de las bombas .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1. Altura útil de la bomba de captación.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2. Altura útil de la bomba de distribución.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3. Altura útil de la bomba de salmuera .....</b>	<b>26</b>



# **ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA E.S.I.T.**

**TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica**

## **MEMORIA**

### **Trabajo Fin de Grado**

#### **TÍTULO**

**ESTUDIO DE UNA PLANTA DE DESALACIÓN ALIMENTADA POR ENERGÍA EÓLICA  
PARA EL SUMINISTRO DE AGUA DE RIEGO PARA LA RECUPERACIÓN DEL  
ENTORNO HIDROLÓGICO DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA**

#### **AUTOR**

*Alberto Hernández González*

#### **TUTOR**

*Vicente José Romero Ternero*



## ÍNDICE

1. Objeto.....	4
2. Alcance .....	5
3. Justificación del proyecto .....	6
4. Antecedentes .....	9
4.1. Ósmosis inversa .....	9
4.2. El problema del agua en Andalucía .....	12
4.3. Desalación de agua en Andalucía .....	14
4.4. Energía eólica .....	15
4.4.1. Energías renovables .....	15
4.4.2. Procedencia del viento .....	16
4.4.3. Ventajas y desventajas de la energía eólica .....	17
4.4.4. Aerogeneradores .....	17
4.4.5. Medidas preventivas y correctoras para aves y murciélagos .....	22
4.4.6. <i>Offshore</i> .....	24
4.4.7. Medidas preventivas y correctoras para cetáceos.....	28
4.5. Energía eólica en Andalucía.....	30
4.6. Antecedentes de desalación-eólica.....	32
5. Normas y referencias .....	32
6. Definiciones y abreviaturas .....	35
7. Requisitos del diseño.....	35
7.1. Datos del peticionario .....	35
7.2. El agua a tratar .....	35
7.2.1. Composición del agua a tratar .....	35
7.2.2. Temperatura del agua a tratar .....	37
7.3. El agua producto .....	38
7.3.1. Uso del agua producto .....	38
7.3.2. Composición del agua producto.....	40
7.4. Capacidad de la instalación .....	42
8. Situación y emplazamiento.....	43
8.1. Localización planta desalación .....	43
8.2. Localización aerogeneradores.....	46
9. Análisis de soluciones.....	49
9.1. Pretratamientos físicos .....	49
9.1.1. Selección del filtro de cartucho (filtración fina) .....	49

<b>9.2. Pretratamientos químicos .....</b>	<b>50</b>
<b>9.2.1. Pretratamiento usado .....</b>	<b>51</b>
<b>9.3. Núcleo de desalación .....</b>	<b>51</b>
<b>9.3.1. Capacidad de la instalación .....</b>	<b>51</b>
<b>9.3.2. Diseño del núcleo de desalación.....</b>	<b>51</b>
<b>9.3.3. Recuperación de energía .....</b>	<b>63</b>
<b>9.3.4. Bomba <i>Booster</i> .....</b>	<b>67</b>
<b>9.3.5. Bomba de alta presión.....</b>	<b>68</b>
<b>9.3.6. Salmuera.....</b>	<b>71</b>
<b>9.4. Sistema de captación .....</b>	<b>72</b>
<b>9.4.1. Características de la zona de captación.....</b>	<b>72</b>
<b>9.4.2. Elección del sistema de captación.....</b>	<b>73</b>
<b>9.4.3. Bombas de captación .....</b>	<b>80</b>
<b>9.5. Post-tratamientos.....</b>	<b>84</b>
<b>9.5.1. Post-tratamiento usado .....</b>	<b>84</b>
<b>9.6. Sistema de distribución .....</b>	<b>84</b>
<b>9.6.1. Depósito de almacenamiento .....</b>	<b>84</b>
<b>9.6.2. Localización del depósito de almacenamiento .....</b>	<b>85</b>
<b>9.6.3. Bomba de distribución .....</b>	<b>87</b>
<b>9.6.4. Dimensionado de la bomba de distribución .....</b>	<b>87</b>
<b>9.7. Consumo específico de la planta .....</b>	<b>89</b>
<b>9.8. Energía eólica .....</b>	<b>90</b>
<b>9.8.1. Cálculo del recurso eólico .....</b>	<b>90</b>
<b>9.8.2. Cálculos para la selección del aerogenerador .....</b>	<b>94</b>
<b>9.8.3. Elección del aerogenerador.....</b>	<b>99</b>
<b>10. Alternativas para el aprovechamiento de la instalación eólica.....</b>	<b>101</b>
<b>11. Solución adoptada .....</b>	<b>102</b>
<b>11.1. Desalación.....</b>	<b>102</b>
<b>11.2. Eólica .....</b>	<b>106</b>
<b>11.3. Medidas preventivas medioambientales .....</b>	<b>107</b>
<b>12. Conclusiones.....</b>	<b>108</b>

## 1. Objeto

En primer lugar, es propósito de este trabajo la demostración por parte del alumno de que se han adquirido las competencias de la asignatura y de la titulación en Ingeniería Mecánica.

En segundo lugar es objeto de este proyecto la realización del estudio de una planta de desalación que suministre agua para abastecer a las zonas agrícolas cercanas al Parque Nacional de Doñana que están afectando a sus acuíferos y con ello recuperar ciertos hábitats naturales debidos a la sobreexplotación de esos pozos de extracción de su alrededor. La energía necesaria para realizar el proceso de ósmosis de la desaladora se obtendrá de forma limpia y sostenible, con una instalación eólica en alta mar. Es una prioridad que cause el menor impacto medioambiental posible y tenga la máxima protección hacia la fauna y flora marina, así como terrestre y aérea. Para ello se trabajará en conjunto con documentos y normas de algunas prestigiosas asociaciones medioambientales. De modo que se procurará instalar en los aerogeneradores una serie de medidas de seguridad ambientales que permitirán no interferir en la vida de las aves migratorias que vuelan por los alrededores ni en las vidas de los animales marinos.

Palabras clave: Energía eólica, offshore, desalación, Doñana.

### ***Abstract***

*In this project it is studied how to provide water to agricultural areas, near Doñana National Park, to recover the lost habitats from the drought caused by the overexploitation of natural wells around. The water will be obtained from the sea, using the reverse osmosis process in a specific plant of desalination. The energy required for this osmosis process is provided by an offshore wind farm.*

*The making of this study includes the design and selection of the pumps and all the equipment. In the desalination part, all the devices from the water inlet to the outlet of the installation will be studied. And the wind part will describe the selection of the situation, the mark and the number of wind turbines that will be used.*

*In this project, the environmental impact is considered as well. For that the student asked different environmental associations, and used some documents that have*

*the necessary information to be considered when someone approaches a similar project.*

*Keywords: wind energy, offshore, desalination, Doñana.*

## **2. Alcance**

Se realizará un estudio para una planta de desalación de mar por el proceso de ósmosis inversa con una capacidad de 5000 m<sup>3</sup>/día, alimentada por energía eólica. Que servirá para abastecer los campos del alrededor del Parque Nacional de Doñana.

En este proyecto se estudiará el lugar más óptimo donde localizar la planta de desalación en los entornos del parque al igual que la localización de los aerogeneradores de la instalación eólica. Con respecto a la parte de desalación, se llevará a cabo el estudio y cálculo de los componentes mecánicos de toda la planta de desalación desde la captación hasta la distribución del agua producto y abordará ligeramente sobre los tratamientos físicos-químicos del agua. Y se llevará a cabo el estudio eólico para la elección de los aerogeneradores que alimentarán el sistema.

Las partes en las que se ha dividido el proyecto para la realización del dimensionamiento de los componentes mecánicos del sistema de desalación y el de eólica son los siguientes:

### Desalación

- Dimensionado del sistema de captación
- Selección y cálculo de los pretratamientos físicos-químicos
- Dimensionado del núcleo de desalación
- Selección y cálculo de los post-tratamientos
- Dimensionado del sistema de distribución
- Consumo específico de la planta

### Eólica

- Localización
- Cálculo del recurso eólico
- Selección del aerogenerador

Quedan excluidos del proyecto los siguientes conceptos:

- Elaboración del estudio de seguridad y salud
- Instalaciones eléctricas, saneamiento, climatización, contraincendios, automatización y otras, de todo el sistema
- Dimensionado de líneas de conexión eléctrica entre la instalación eólica y la instalación desaladora
- La obra civil de todo el proyecto (pozos, cimentación de aerogeneradores, depósitos, etc.)
- Dimensionado de los elementos de control como las válvulas.
- Estudios geotécnicos

### **3. Justificación del proyecto**

Doñana es un valioso espacio natural, perteneciente a la Comunidad Autónoma de Andalucía, de una extensión de 50.000 hectáreas y que ha sido declarado Parque Nacional. Tiene un indudable interés biológico y se alternan diferentes paisajes con una amplia variedad de especies vegetales y animales. Es, además, un importante lugar de invernada para las aves migratorias.

Es el espacio protegido más extenso de España y el humedal más destacado de Europa. Se extiende por parte de Huelva, Sevilla y Cádiz.

Un Parque Nacional es un espacio natural, poco alterado por la actividad humana que por sus valores naturales, su flora, su fauna o geología, merece una conservación y una atención especial y se declara de interés general por ser representativo del patrimonio natural español. En Canarias, por ejemplo, existen 4 Parques Nacionales (Teide, en Tenerife; Garajonay, en la Gomera; La Caldera de Taburiente, en la Palma y Timanfaya, en Lanzarote).

Este territorio, que recibe el nombre de Doñana es un paraíso para los amantes de la ornitología, ya que se pueden encontrar miles de aves acuáticas, ánsares y anátidas del norte de Europa, además de cigüeñas, garzas y golondrinas, dependiendo de la estación del año y que vienen en busca de alimento y de un clima más suave.

Actualmente, Doñana sufre un problema de escasez de agua, debido a la sobreexplotación de sus principales acuíferos, que está afectando al hábitat de gran cantidad de aves y otros animales y vegetales. A ello se une la sequía o la falta de lluvias.

Aparte de estos problemas, podemos remarcar la amenaza existente en la reapertura de la mina de Aznalcóllar, muy cercana al parque y que es probable que pueda llevar aparejado un riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

Hace 50 años se consagró como uno de los primeros espacios naturales a declarar como zona protegida, sobre todo por su riqueza en aves. Anualmente muchísimas personas, desde ornitólogos hasta turistas visitan el parque. Esto significa que Doñana no es sólo importante por ser un espacio importantísimo de protección de la vida animal y vegetal, sino que también en un importante punto de atracción turística y de dinamización de la economía local.

La tensión a la que se ve expuesta este espacio natural es elevada ya que se halla, en cierto modo, rodeada por grandes ciudades como Sevilla, Cádiz, Huelva, relativamente próximas a su entorno. A esa demanda urbana de agua se une la demanda para usos industriales. Por otro lado, en sus alrededores, se ubican grandes municipios limítrofes como Almonte, que presentan un alto consumo de agua, un recurso realmente valioso para propia supervivencia de las especies que habitan este espacio natural.

A pocos metros de los límites de Doñana se desarrollan, además, extensas explotaciones agrícolas con invernaderos donde se cultivan fundamentalmente fresas y otros productos. Hay una gran zona de regadío intensivo que se reparte entre el norte y el noroeste del parque, siendo esta agricultura la que más agua demanda. Hasta el año 2006, el control de los recursos hídricos de la zona era competencia del Estado. Ahora la competencia es de la Junta de Andalucía, que asume la responsabilidad de su estado de conservación.

Según la WWF Spain (*World Wide Fund for Nature*), casi 6.000 hectáreas, de la zona, se destinan al cultivo del fresón y al parecer, el 50% del agua empleada, según esta fuente, se extrae de pozos no autorizados. Esto está suponiendo una presión creciente sobre los acuíferos principales que han reducido sus niveles de forma alarmante, agravado con la sequía de estos últimos años.

Para comenzar a subsanar el problema que se tiene con respecto a la escasez de agua y a la sequía en esta región, la Junta de Andalucía está llevando a cabo una serie de medidas correctoras. La que más afecta a este proyecto es la del programa A.G.U.A. (Actuaciones para la Gestión y Utilización del Agua) ya que su eje principal consiste en impulsar la desalación.

Si se toma como referencia la demanda general de este elemento, en Andalucía, se observa que es muy elevada, dependiendo de la zona en la que se estudie, según su población y economía. La demanda actual es de 6.170  $hm^3$  anualmente, siendo mayoritariamente para usos agrícolas. En la siguiente tabla obtenida de la página web de la Junta de Andalucía se especifica la demanda de agua según su uso y distrito hidrográfico.

Demanda de agua ( $Hm^3$ )	Total	Guadalquivir	D.H. Tinto -Odiel- Piedras	D.H.Guad- Barbate	D.H. Med.	Guadiana	Segura
Uso agrícola	5.009	3.506	149	320	982	10	42
Uso urbano	971	446	56	121	338	5	5
Uso industrial	153	68	46	15	23	1	0
Otros usos	37	0	2	6	29	0	0
<b>Demanda total</b>	<b>6.170</b>	<b>4.020</b>	<b>253</b>	<b>462</b>	<b>1.372</b>	<b>16</b>	<b>47</b>

Imagen 1. Demanda total en Andalucía

Podemos observar que la mayor parte se demanda en uso agrícola. Pero para corroborarlo tenemos la siguiente imagen, más clara, de una gráfica que recoge el reparto porcentual de la demanda de agua por usos.

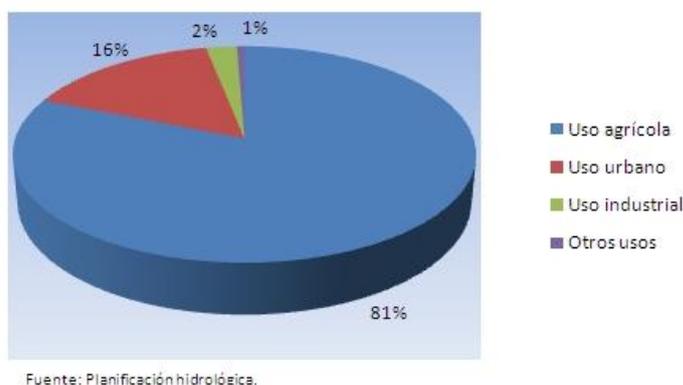


Imagen 2. Porcentajes según usos del agua

Según la gráfica anterior queda comprobado que el uso agrícola es el que más agua requiere, llegando al 81% de la demanda total. Es por ello que este proyecto, como ya se comentará más adelante, se centrará en la demanda agrícola.

#### **4. Antecedentes**

##### **4.1. Ósmosis inversa**

El agua es un factor imprescindible para la vida y el desarrollo de todas las especies animales, vegetales y para el ser humano. La mayor o menor disponibilidad de este recurso determinará, en cierto modo, el nivel de desarrollo que podrá tener una población y su calidad de vida. Hace unas décadas, los países más ricos eran aquellos con mayor disponibilidad de recursos hídricos. En la actualidad no es así, ya que las nuevas tecnologías han ocupado una posición muy relevante en la obtención de agua para el abastecimiento de los distintos países.

Actualmente los principales usos que le damos al agua dulce son para el consumo humano y para la agricultura. Según señala el Consejo Consultivo del Agua, A.C. de México, a nivel global, las precipitaciones proporcionan cerca del 90% del agua utilizada para los cultivos. A pesar de que sólo representa el 10% del agua utilizada en la agricultura, el riego requiere el 70% de toda el agua dulce destinada al consumo humano. El 20% está destinado a la industria para tareas de refrigeración, disolventes, etc. y el 10% restante es para consumo doméstico.

Para conocer cuál es la situación en la que encontramos se debe comentar y justificar las condiciones hídricas actuales. En nuestro planeta, el 97% del agua disponible se ubica en los mares como agua salada. El 3% restante es agua dulce que puede ser utilizada por la población. Pero sólo un 13% de esa pequeña parte de agua dulce es la disponible para intentar abastecer a toda la población.

Tras tomar conciencia de este problema con respecto a los recursos hídricos y que ha ido empeorando en estos últimos años, se han ido desarrollando distintos tipos de soluciones y tecnologías que procuran aprovechar el gran potencial del agua del mar para intentar satisfacer la demanda de la población.

Una de las tecnologías más importantes y que más se ha desarrollado en cuando a la desalinización del agua de mar para producir agua dulce apta para consumo humano y para riego es la ósmosis inversa.

La ósmosis inversa (OI), es un proceso que lo que busca es la desalinización del agua del mar. Para ello y como su nombre indica, realiza la ósmosis pero en el sentido opuesto. La ósmosis es un fenómeno natural por el cual, dos concentraciones de distintas salinidades, intentan llegar al equilibrio igualando sus concentraciones. El ejemplo más claro es aquel en el que tenemos dos recipientes unidos por una membrana semipermeable como podemos ver en la imagen siguiente. En uno de los recipientes tenemos agua con un alto contenido en sales, solución concentrada, mientras que en el otro encontramos agua con bajo contenido en sales, solución diluida. Ambas soluciones se hallan a un mismo nivel. Según el fenómeno de ósmosis, habrá un movimiento desde la solución más diluida hacia la concentrada que ejercerá una fuerza. Esta es a la que se conoce como presión osmótica y será la que determine el desnivel que exista entre los líquidos de ambos recipientes.

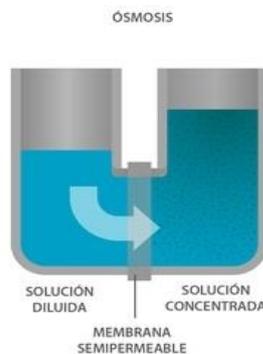


Imagen 3. Ósmosis

Si ahora invertimos el proceso y le aplicamos a la solución concentrada una fuerza superior a la presión osmótica, lo que se estará consiguiendo es un mayor volumen de solución diluida y por lo tanto, una mayor concentración de sales en el otro recipiente. Esta desalinización es el conocido proceso de ósmosis inversa.

Sin embargo, en la práctica no es necesario vencer esa presión osmótica sino sólo superar la diferencia de presión osmótica entre las soluciones de alimentación y producto.

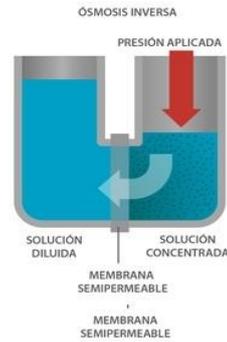


Imagen 4. Ósmosis Inversa

Pero para realizar este proceso de ósmosis inversa no sólo se requieren membranas. Se necesita una instalación con distintas etapas. Para nuestro proyecto vamos a establecer 5 etapas:

- Captación del agua de mar
- Pretratamiento físico-químico
- Proceso de ósmosis inversa
- Post-tratamiento
- Almacenamiento y distribución

En la siguiente vemos un diagrama que describe los procesos y tratamientos por los que pasa el agua por la instalación, desde su toma hasta su distribución.

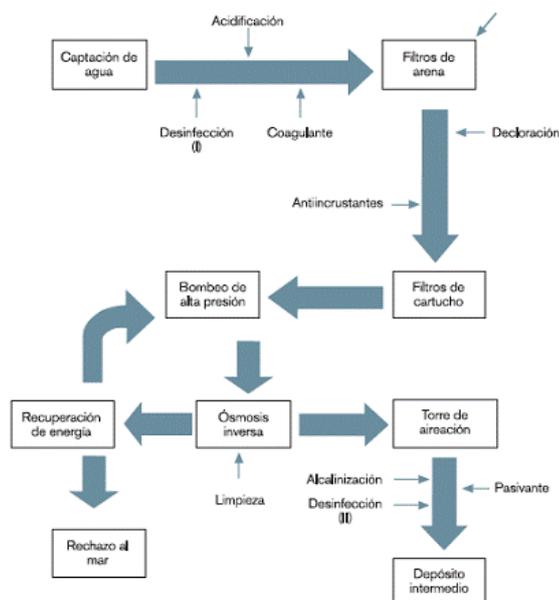


Imagen 5. Diagrama de los procesos de la instalación de ósmosis inversa

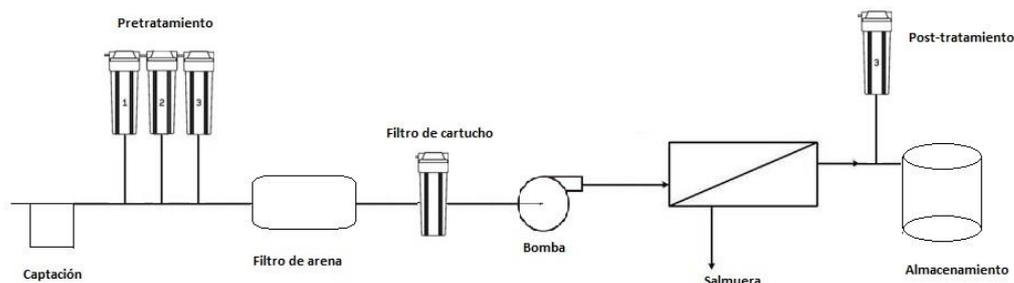


Imagen 6. Esquema de instalación de ósmosis inversa

## 4.2. El problema del agua en Andalucía

El agua es, tal vez, el recurso natural más importante para la vida. Y es el más escaso en algunos lugares. En términos generales podemos considerar constante la cantidad de agua disponible, pero la demanda de la misma está en continuo aumento. Esto lleva a las poblaciones a consumir sus recursos hídricos naturales, que cuando son reducidos, llevan a la escasez.

Este es un problema notorio en territorios como el andaluz, donde la irregularidad de las precipitaciones, el uso masivo del agua para la agricultura y el despilfarro están llevando a esta comunidad autónoma a la escasez de este elemento. Para evitar este problema se están explotando la mayoría de los recursos hídricos con los que cuenta este territorio. La sequía no sólo suele darse en los meses donde las temperaturas son muy elevadas, y la población (por la llegada de turistas) aumenta, es decir, en los meses de primavera-verano, sino que está presente durante todo el año.

En las siguientes imágenes se representan la intensidad del déficit pluviométrico en el mes más lluvioso y en el de menos precipitaciones, en los que los valores de pluviosidad de la zona son inferiores a los promedios registrados en la serie histórica 1971-2000.



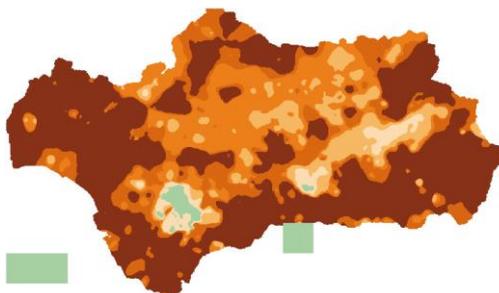


Imagen 7. Agosto. Imágenes obtenidas de la Junta de Andalucía

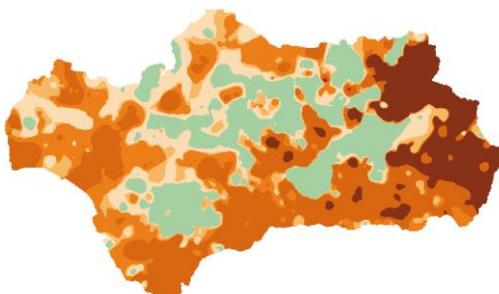


Imagen 8. Noviembre. Imágenes obtenidas de la Junta de Andalucía

Depender de estos recursos hídricos no es problemático siempre y cuando se tenga un control sobre ellos y se permita su restauración natural. El problema y el error se producen cuando no se da tiempo a su recuperación, conllevando así a que las características del agua no lleguen a superar los mínimos de calidad y cantidad establecidos o requeridos.

En los últimos años, la sequía está afectando a Andalucía con carácter crónico y produce que los recursos hídricos cada vez empeoren y sean más escasos. Pero este no es el único inconveniente que provoca la sequía. También lleva a la erosión, la desertificación y al deterioro de los terrenos naturales, afectando, con ello, gravemente a la fauna y la flora del territorio.

Por lo tanto, el estudio de las soluciones a adoptar para la recuperación de los terrenos naturales, así como de los recursos hídricos y de la calidad del agua, debe ser primordial, antes de que todo empeore y sea más difícil y costoso invertir esos procesos.

Como solución se ha comenzado a usar la desalación para obtener agua del mar. Esto permitirá conseguir grandes cantidades de agua y dejar de depender de los pozos, ríos y otros recursos naturales ya explotados.

### 4.3. Desalación de agua en Andalucía

Debido a la importancia de la obtención de agua para su uso agrícola, humano y otros usos la Junta de Andalucía ha realizado, junto con el Gobierno de España, una serie de convenios para la realización de una serie de desaladoras a lo largo de las costas andaluzas.

Actualmente, hay nueve desaladoras principales con una capacidad de desalación de  $161 \text{ hm}^3$  y que a corto plazo se espera que sean de  $241 \text{ hm}^3$ .

Plantas	Capacidad de desalación ( $\text{hm}^3/\text{año}$ )
Levante Almeriense	20
Cuevas de Almanzora	9
Carboneras	42
Rambla Morales	22
Almería	18
Campo de Dalías	30
Málaga	50
Costa del Sol	30
Marbella	20
<b>TOTAL EN FUNCIONAMIENTO</b>	<b>161</b>
<b>TOTAL A CORTO PLAZO</b>	<b>241</b>

Tabla 1. Capacidad de desalación Andalucía

Con los datos del apartado señalados en la justificación del proyecto, conocemos que la demanda total de agua en Andalucía es de  $6.170 \frac{\text{hm}^3}{\text{año}}$ . Con un simple cálculo conocemos que la desalación en Andalucía aporta (con la capacidad de  $241 \text{ hm}^3$ ), aproximadamente, el 4% del agua total demandada.

Este es un valor muy pequeño aún. Pero esta tecnología está continuamente creciendo y mejorando. En la actualidad, recibe un impulso decisivo y se le está dando verdadera importancia en España. Se trata de ampliar las plantas ya instaladas y construir nuevas, para así llegar a que la necesidad del ser humano con respecto al agua no sea motivo por el cual se destruyan acuíferos naturales, así como hábitats de especies protegidas, o se continúe con la sobreexplotación mediante pozos, etc.

## **4.4. Energía eólica**

### **4.4.1. Energías renovables**

Actualmente se está dando especial importancia a las energías renovables, aquellas que aprovechan la naturaleza como fuente de energía, de manera que son sostenibles e inagotables. Cada vez se avanza más en esta dirección, dadas las altas recompensas y beneficios que proporciona, entre las que cabe indicar, por ejemplo, el ahorro económico que generan a medio y largo plazo, o la nula contaminación que produce, tan imprescindible para lograr, por consiguiente, un planeta más “sano”. Sin embargo y como inconveniente, a corto plazo, está el elevado precio de sus instalaciones.

Cuando se habla de energías renovables hacemos referencia a distintas modalidades o tipos, entre las que destacan las siguientes:

- Eólica
- Geotérmica
- Hidroeléctrica
- Mareomotriz
- Solar
- Undimotriz u olamotriz
- Biomasa
- Biocarburantes

Los siguientes apartados se ocuparán de la energía eólica, en la cual se centra el proyecto.

La energía eólica es uno de los métodos de aprovechamiento de energía renovable más antiguo, existiendo, al menos en España, desde el siglo XV. Su fin era, fundamentalmente, moler el grano de los cereales y con ello facilitar su consumo humano. En Canarias aún quedan ejemplos de antiguos molinos de viento. Anteriormente, al uso del viento, los aborígenes guanches utilizaban las piedras de molienda de manera manual y posteriormente procedían al tueste de la harina, creando con ello el gofio, un alimento nutritivo y sano, que actualmente aún se consume y de hecho, se intenta potenciar.



Imagen 9. Molino de gofio “La Molineta” a la entrada de La Laguna (Tenerife) 1866.

[Imagen obtenida de laotralaguna.wordpress.com](http://laotralaguna.wordpress.com)

La energía eólica es aquella que aprovecha la energía cinética del viento para producir energía eléctrica. Y como se verá a continuación, es una energía procedente del sol. Sin él, no existiría.

#### 4.4.2. Procedencia del viento

Esta energía cinética se produce por la circulación del viento a lo largo del planeta debido a la diferencia de temperaturas entre las zonas del ecuador con las zonas más alejadas del mismo. En el ecuador, la temperatura del aire aumenta y debido a que el aire caliente es más ligero que el frío, este se eleva hasta llegar a la troposfera (aproximadamente 10 km). En este punto el aire caliente se divide y se extiende hacia el norte y hacia el sur. Al llegar a los 3500 km de trayecto, el aire se encuentra a 30° de latitud y comienza a descender al llegar a zonas de altas presiones. En este punto, se dirigirá de nuevo hacia el ecuador.

Cabe destacar un fenómeno que se produce también por esa diferencia de temperaturas del aire y es el de la brisa marina. Esto sucede por el gradiente térmico entre el agua del mar y la tierra. Por el día, la brisa soplará del mar a la tierra y por la noche, al contrario.

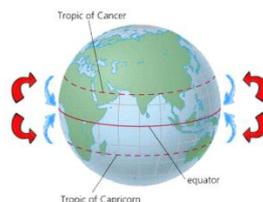


Imagen 10. Dirección del viento

### 4.4.3. Ventajas y desventajas de la energía eólica

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Al ser una energía aprovechada de la naturaleza no contamina y es inagotable	Se requieren equipos muy grandes y costosos, incidiendo así directamente en el impacto visual
Evita la consumición de combustibles fósiles, ayudando así a la recuperación de la capa de ozono por la reducción de la contaminación	Riesgo de impacto con aves por las hélices
No produce ningún contaminante, ni residuos que puedan contaminar los suelos, acuíferos, etc.	Ruido de los aerogeneradores
Cada kw/h generado por la energía eólica evita: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,60 kg de dióxido de carbono</li> <li>• 1,33 kg de dióxido de azufre</li> <li>• 1,67 kg de óxido de nitrógeno</li> </ul>	Es una energía muy variable, que depende de las condiciones climatológicas del lugar. Haciendo ello que no haya una producción continua de energía
Es una tecnología emergente que irá mejorando y consiguiendo aerogeneradores mucho más baratos y potentes	

Tabla 2. Ventajas y desventajas de la energía eólica

### 4.4.4. Aerogeneradores

Estos son los encargados de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica y esta a su vez en energía eléctrica. A continuación se describen las distintas partes de un aerogenerador:

#### 4.4.4.1. Partes aerogenerador

Podemos dividir el aerogenerador en tres partes principales:

- Palas o hélices

Son los objetos que están en contacto directo con el viento y son las encargadas de captar su energía. Para ello, estas hélices tienen formas complejas de manera que aprovechen lo mejor posible esta energía. El principio aerodinámico por el cual las hélices giran es el mismo al que hace que los aviones vuelen: La sustentación.

A la hora de seleccionar las hélices debemos tener en cuenta que mantenga una relación resistencia-peso adecuada. Ya que estarán sometidas a grandes esfuerzos

provocados por las velocidades de giro y las vibraciones provocadas por el giro al rotar el aerogenerador para orientarse al viento.

Las hélices deben estar perfectamente equilibradas de tal manera que el centro de gravedad quede exactamente en el centro de rotación del rotor, donde irá alojado el eje. Por lo tanto es muy importante que el peso y su distribución a lo largo de la hélice sean iguales.

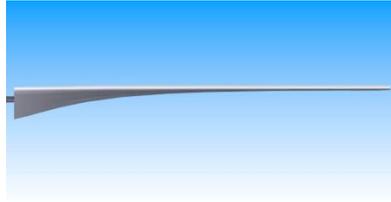


Imagen 11. Pala de aerogenerador vista desde abajo

- Buje

Es la parte encargada de sostener las hélices. El buje está unido al eje principal y tendrá que soportar el peso y los esfuerzos que generen las hélices.



Imagen 12. Buje aerogenerador

- Góndola

Es el lugar donde se encontrarán todos los equipos eléctricos y mecánicos del aerogenerador. Tiene una carcasa para protegerlos de los efectos atmosféricos y dentro se encontrará principalmente: soporte principal, caja de cambios, generador, sistema de control, motor orientador, alternador, etc.

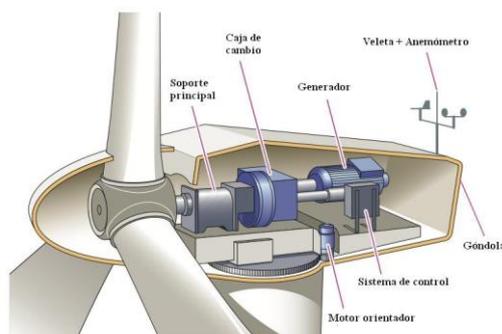


Imagen 13. Góndola

- Torre

Es la estructura del aerogenerador, gracias a la ella obtenemos la altura necesaria para aprovechar el viento.



Imagen 14. Torre aerogenerador

#### ***4.4.4.2. Aerogeneradores y medio ambiente***

El motivo principal del aprovechamiento del recurso eólico para la producción de energía eléctrica es la reducción de la contaminación producida por el consumo de combustibles fósiles y derivados. Por ello, debe ser un requisito indispensable en todas las centrales eólicas el tener en cuenta los posibles problemas medioambientales que se produzcan.

Principalmente existen tres tipos de consecuencias negativas medioambientales relacionadas con los aerogeneradores, utilizados en este tipo de energía, y que deben ser estudiados en el proyecto: el impacto con aves, el impacto visual y la contaminación acústica.

El giro de las hélices a una cierta velocidad produce ruido que dependiendo de la cercanía que se tenga al aerogenerador puede ser mayor o menor. Este no es el mayor problema ya que, generalmente, los parques se instalan en zonas aisladas o a gran distancia de la población, reduciendo bastante esta posible molestia.

Otro problema es la localización de los aerogeneradores. Estos se colocarán siempre intentando aprovechar al máximo el recurso eólico, que suele ser en cumbres de montañas o cerca del mar. Es por ello que el impacto visual es elevado. Una posible solución que se da, al respecto, es los diseños con formas más suaves y colocar los aerogeneradores de maneras uniformes y agradables desde el punto de vista estético. Un ejemplo de esta uniformidad a la hora de colocarlos se ve reflejada en el parque eólico Kappel en Dinamarca y el parque eólico marino (*Offshore*) de Copenhague, también en Dinamarca y que además, es uno de los mayores del mundo.



Imagen 15. Parques eólicos cuidando el impacto visual

Por último y puede que el más importante de los problemas, sea el de la mortalidad de las aves por el impacto con las aspas de los equipos provocando, por lo tanto, la disminución de ciertas especies de alto valor. La fauna más afectada son las aves migratorias y los murciélagos. Los datos de la Sociedad Española de Ornitología (SEO *BirdLife*) permiten conocer la cantidad de muertes provocadas para dar una idea de la magnitud del problema:

- Águila real: Con casi 70 parejas nidificantes de águila real, se viene registrado, en estos últimos años, la muerte de 30-40 ejemplares cada año, siendo el 42% de las muertes provocadas por aerogeneradores.
- Buitre: Los buitres leonados y negros son las especies más afectadas por los parques eólicos por su capacidad de movimiento y el aprovechamiento del viento para sus desplazamientos. Los buitres tienen una gran carga alar, lo que hace que en ausencia de corrientes de aire, estos no tengan gran maniobrabilidad, aumentando el riesgo de colisión. Hasta la fecha se han registrado alrededor de 645 muertes de buitre leonado en España, llegando en algunos casos a la estimación de casi 8 buitres por aerogenerador y año. El 63,1% de los buitres muertos son debidos a los parques eólicos.

- Otros: Se han documentado la muerte de 1.209 aves pertenecientes a 88 especies diferentes y 45 murciélagos de 5 especies diferentes.

En este proyecto se debe tener especial cuidado con el impacto con las aves ya que el parque eólico se encuentra ubicado, precisamente, en una zona de gran potencial de viento. Precisamente, por ello, supone una zona de gran importancia migratoria para estos animales. Las aves pasan por el estrecho de Gibraltar para llegar al Parque Natural y Nacional de Doñana.

En la siguiente imagen, reproducida por la BBC y obtenida de “SEO *Birdlife*” se representa cuáles son las rutas seguidas por unas 50 mil millones de aves, que suponen alrededor del 19% de las 10.000 especies de aves del mundo.

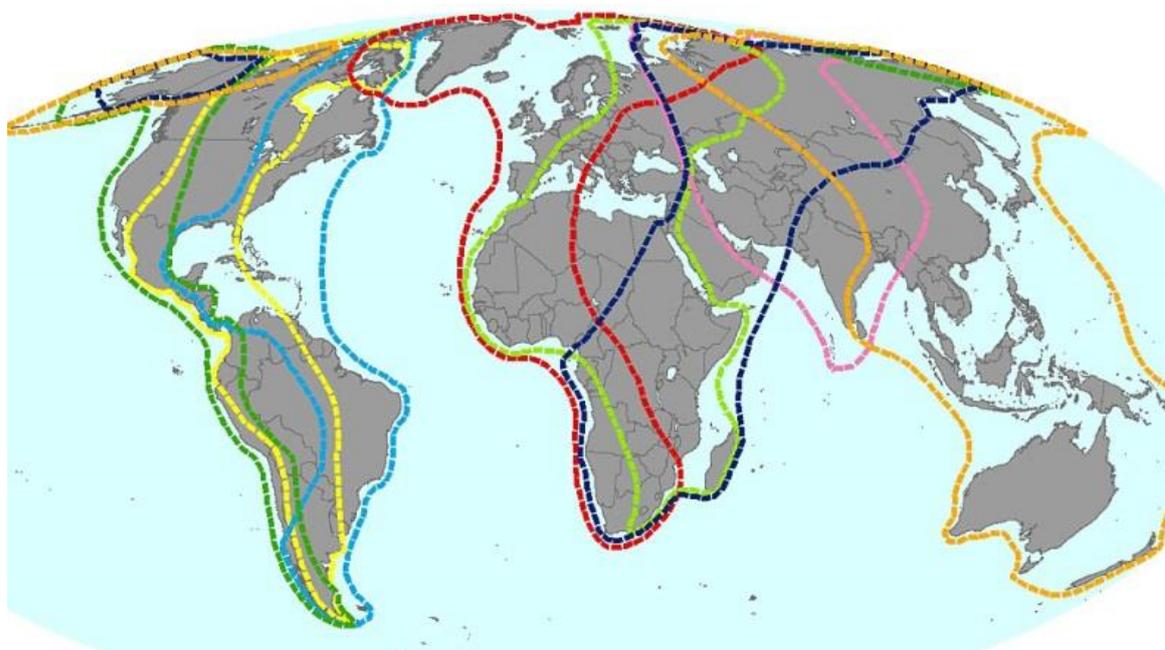


Imagen 16. Rutas migratorias (Birdlife)

En la siguiente imagen se describe la trayectoria de una importante especie de aves, en un estudio realizado por SEO *Birdlife*, en el que se aplicaron transmisores a 92 ejemplares de milano negro. El seguimiento se realizó durante 364 viajes migratorios. Tener en cuenta esas rutas es fundamental para elegir la localización de la instalación eólica. Debe garantizarse la máxima protección a la Naturaleza, que se halla alejada y que no afecta al tránsito de aves y que genera el menor impacto posible.

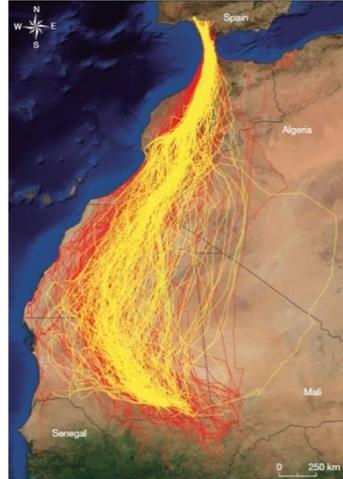


Imagen 17. Ruta migratoria del milano negro (SEO Birdlife)

Precisamente, hay que ser cuidadoso también con el impacto social. Este tema preocupa a grandes grupos defensores de los animales y hay un debate abierta sobre esta cuestión. Por un lado, se está contribuyendo a la protección de la Naturaleza, reduciendo la contaminación al generar electricidad por medio del viento. Por otro lado, se está afectando a la fauna. Esta polémica es fructífera y ha llevado a la búsqueda de soluciones para reducir e incluso llegar a eliminar este problema.

Es por ello que para nuestro proyecto se tendrán en cuenta las modificaciones propias descritas en el documento “Directrices para la evaluación del impacto de los parques eólicos en aves y murciélagos” obtenido gracias a la colaboración directa con SEO *BirdLife* y las gestiones del alumno. Se abordará este documento en el siguiente apartado.

#### 4.4.5. Medidas preventivas y correctoras para aves y murciélagos

Uno de los problemas medioambientales que está ligado a los aerogeneradores es el impacto y obstrucción de vías de paso para las aves comunes y migratorias. Para solucionar este problema, las asociaciones de Ornitología del mundo se han puesto manos a la obra para elaborar guías que deben ser tenidas en cuenta por el proyectista previamente a la construcción del parque.

Gracias a las orientaciones facilitadas por SEO *BirdLife* se tendrán en cuenta una serie de medidas preventivas y correctoras en nuestro parque, que evitarán en gran medida estos impactos. Estas son las siguientes:

- Aumentar la visibilidad del aerogenerador y de sus aspas pintándolas con colores distintos o con UV

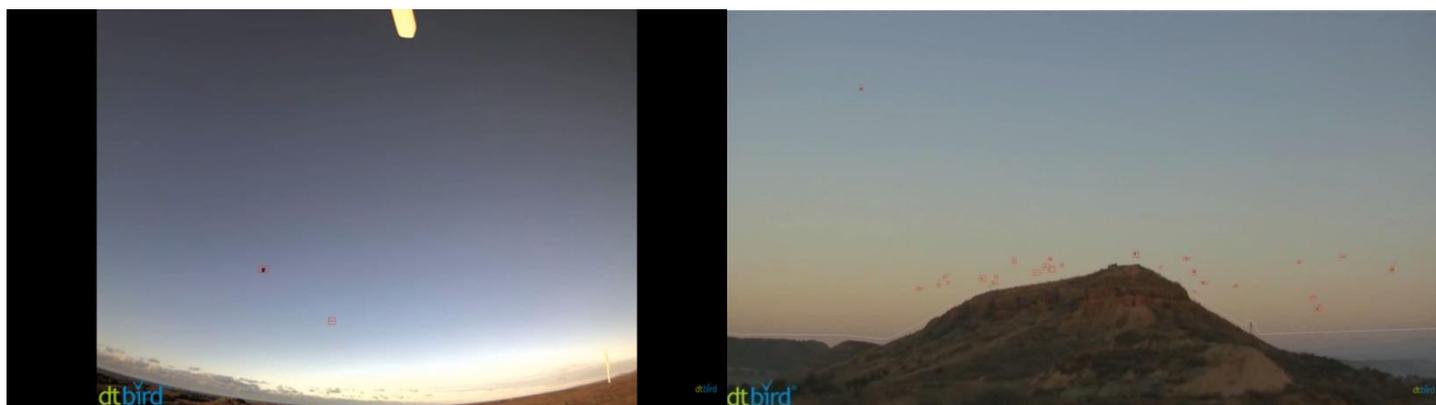


Imagen 18. Posible diseño para aumentar la visibilidad

- Usar aerogeneradores que funcionen a velocidades menores (este tipo de aerogenerador es más usado en el ámbito marino)
- Cese de actividad de las turbinas cuando existan condiciones meteorológicas adversas o cuando haya un paso migratorio importante
- El uso de flashes de luz intermitente en vez de luz continua de advertencia aeronáutica, que reduce el número de aves atraídas
- Sistemas de detección remota. SEO BirdLife da a conocer el *DTBird* (*Bird Detection and Dissuasion*) que es un sistema de detección de aves en vuelo que permite realizar la disuasión de aves en riesgo de colisión o la parada automática de aerogeneradores. Las aves se detectan por medio de técnicas de visión militar.

*DTBird* tiene un diseño modular dividido en 4 módulos.

1. Módulo de detección. Lleva a cabo la detección de cualquier tipo de ave desde la salida hasta la puesta del sol, en un rango de distancias desde unos pocos metros hasta 1,5 km. Puede funcionar en condiciones ambientales adversas y realiza la grabación en vídeo de cada vuelo.



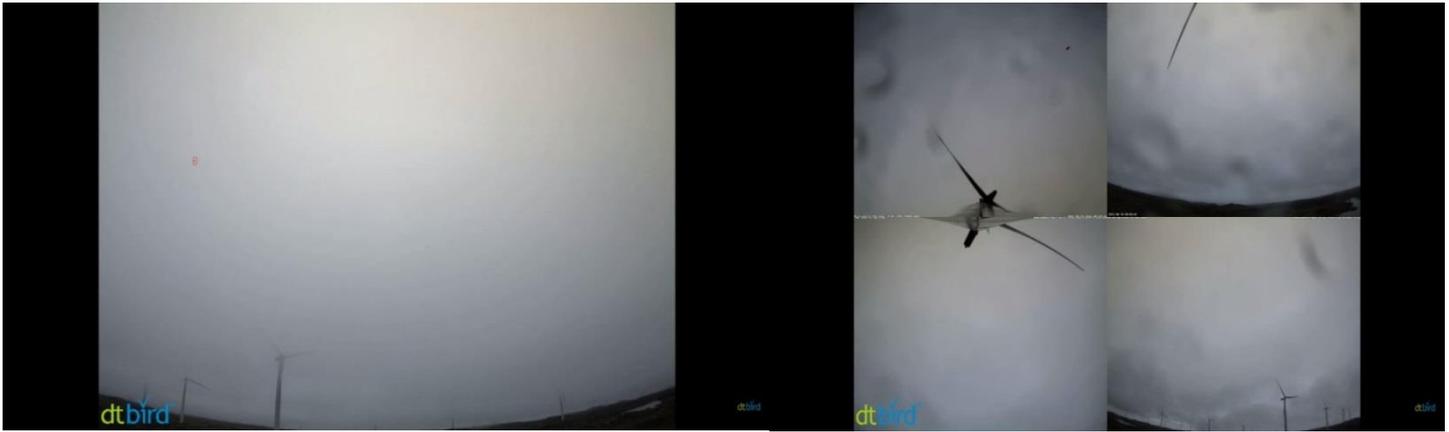


Imagen 19. Imágenes del sistema DTBird

2. Módulo de disuasión. *DTBird*, una vez detectada el ave, emite señales de aviso a las aves con riesgo medio de colisión y señales de disuasión a las de alto riesgo de colisión, permitiendo reducir al mínimo el número de paradas del aerogenerador. Aparte, las señales se adaptan a las especies objetivo y a los requerimientos legales específicos.
3. Módulo de control de parada. Se lleva a cabo la parada selectiva del rotor del aerogenerador en cuestión, en casos de riesgo muy alto de colisión.
4. Módulo de control de colisiones. Lleva a cabo el aviso por email del potencial de colisión de cada ave a la vez que realiza la grabación e identificación del ave.

#### 4.4.6. *Offshore*

Hay veces que por motivos medioambientales, económicos, carencia de espacio o cualquier otro tipo de problemas, se imposibilita la instalación del parque eólico en tierra. Estos problemas han hecho que se cree una tecnología mejorada que actualmente está en auge en Europa y en otros continentes. Esta modificación consiste en instalar los aerogeneradores en alta mar, a ese tipo de parque marino se le llama *Offshore*.

Debido a la importancia migratoria que tiene la localización donde se encuentra nuestro proyecto, se ha optado por reducir el impacto con las aves al mínimo. Para ello no solo se llevarán a cabo las medidas preventivas y correctoras anteriormente comentadas, sino que se procederá a instalar los aerogeneradores en el mar. Permitiendo así el flujo normalizado de aves por sus rutas corrientes. El camino seguido por la mayoría de estas aves va desde el estrecho de Gibraltar hasta llegar a Doñana por las costas de la Península

Ibérica para luego continuar por el norte de Europa. Nuestra instalación estará en la zona oeste del Parque Nacional, alejada a una distancia prudente en el mar.

El desarrollo de parques *Offshore* ha supuesto un gran avance en la tecnología de la energía eólica. Europa ha puesto gran interés en su investigación y por ello cuenta con el mayor número de parques *Offshore* del mundo. Según la “*World Wind Energy Association*” (WWEA), Reino Unido encabeza la lista de los países con mayor capacidad de energía *Offshore* con casi 3700 MW, seguida por Dinamarca y Alemania.

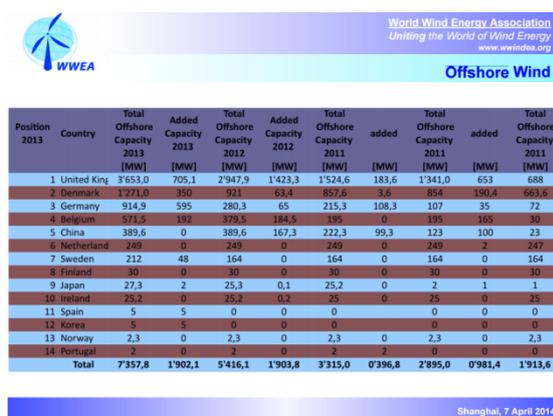


Imagen 20. Lista de países según potencia Offshore instalada

La instalación de los aerogeneradores en alta mar ha tenido tanta repercusión porque lleva consigo grandes beneficios y al igual que toda tecnología, inconvenientes:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
A una cierta distancia de tierra, deja de ser visible, eliminando así el impacto visual	Se requieren equipos muy grandes y costosos, más que los terrestres y mucho más difíciles de construir y montar
Sin contaminación acústica por no llegar el sonido a tierra, reduciendo así las restricciones impuestas en cuanto a nivel de ruido, permitiendo así usar el aerogenerador a su máxima capacidad	Riesgo de impacto con cetáceos
Mayores velocidades de viento por la baja rugosidad superficial del agua y por la carencia de obstáculos. Y por lo tanto mayor potencia por aerogenerador	Difícil mantenimiento de los aerogeneradores y limitaciones de acceso
Gran área para instalar aerogeneradores	Necesidad de instalar nuevas infraestructuras eléctricas no existentes
Es una tecnología emergente que irá mejorando, consiguiendo equipos menos costosos y menos costos de inversión inicial por el aprovechamiento de las instalaciones anteriores de los primeros parques	Mayor separación entre aerogeneradores por la mayor propagación de las turbulencias por la baja rugosidad del mar

Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de la energía eólica Offshore

#### 4.4.4.1. Aerogeneradores Offshore y medio ambiente

Al igual que se comentaba en los apartados anteriores, los aerogeneradores *Offshore* también tienen un impacto medioambiental elevado con respecto a las aves. En general, es mucho menor por estar en el mar. Depende de la zona en la que se encuentre el parque eólico (no será lo mismo instalarlo en un punto sin circulación de aves, que colocarlo en medio de una ruta migratoria). Pero en este caso, el problema medioambiental se centra en otro tipo de seres vivos: La fauna y flora marina.

Las costas españolas cuentan con una diversidad biológica marina muy destacada, gracias a las diferentes condiciones oceanográficas y la gran variedad de hábitat costeros. Estas costas cuentan con una gran cantidad de seres vivos en constante circulación, desde los más pequeños seres vivos hasta los grandes cetáceos, además de una gran flora marina.

Es por ello que es un requisito indispensable el estudio del impacto medioambiental en cualquier construcción, proyecto o cambio que se realice en el ámbito marino.

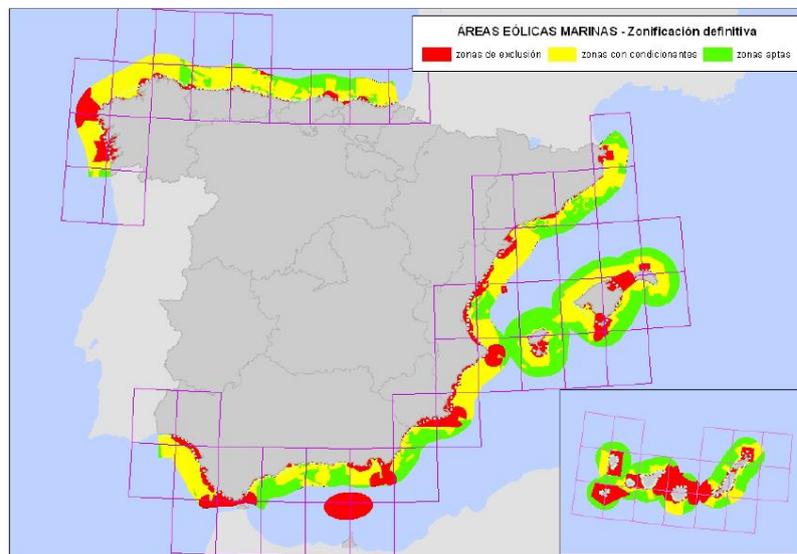


Imagen 21. Áreas eólicas marinas

En la imagen anterior se observa que la zona donde se implantarán los aerogeneradores está considerada “Zona con limitaciones”. Estas son aquellas en las que el desarrollo de parques eólicos marinos está condicionado por algún factor.

La imagen pertenece a un informe realizado por la EEA (Agencia Europea de Medio Ambiente), en el que se puede ver las zonas aptas para la instalación de la energía eólica marina en España, en el que sólo las zonas verdes y amarillas son donde se podrían comenzar las tramitaciones para la creación de parques eólicos marinos.

Por medio de los datos recogidos por el OBIS (Sistema de Información de la Biogeografía Oceánica, “*Ocean Biogeographic Information System*”), hay disponibles una serie de mapas que muestran las zonas donde se han visto cualquier tipo de animal marino y ave marina (especialmente, aquellos que están en peligro de extinción), y que se muestran a continuación.

Los siguientes mapas se centrarán, precisamente, en los cetáceos, peces cartilagosos o condriictios y las especies en peligro de extinción.

En este primer mapa se muestran las cantidades vistas de especies en peligro de extinción según la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). Vemos que por el sur de España se han avistado más de una de esas especies.

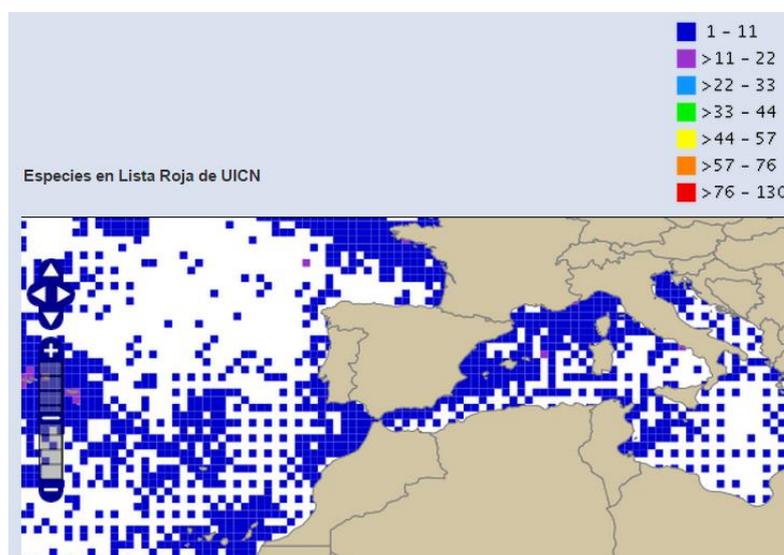


Imagen 22. Especies en lista roja de UICN

Esta segunda imagen muestra el resultado de la búsqueda de cetáceos en la base de datos del OBIS. Vemos como la zona en la que se quiere implantar los aerogeneradores es visitada comúnmente por estas especies. Para mayor precisión se ampliará el mapa.

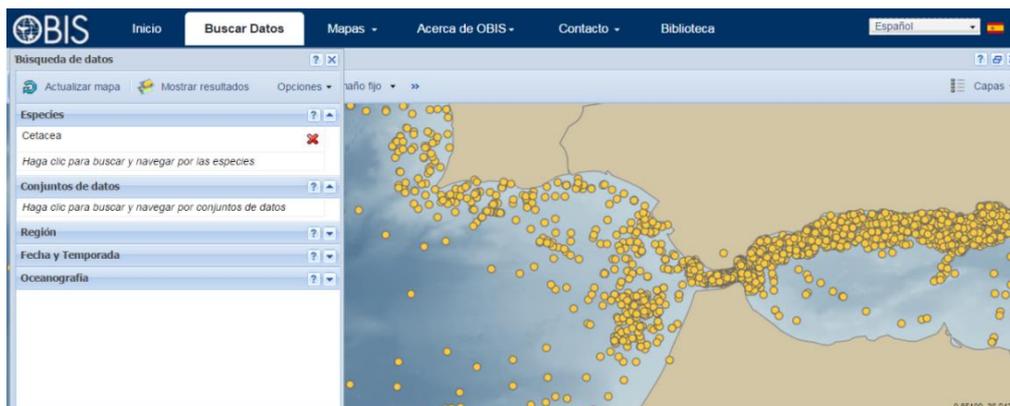


Imagen 23. Cetáceos



Imagen 24. Cetáceos

Tras estudiar los mapas y los datos obtenidos, el resultado es el que se esperaba. España es un país con gran diversidad marina. Alrededor de todas sus costas se dan gran cantidad de avistamientos de cetáceos y de otros animales. El objetivo principal de estudiar el paso de estos animales es el de reducir el impacto de los aerogeneradores. Las medidas preventivas tomadas se estudian en el siguiente apartado.

#### 4.4.7. Medidas preventivas y correctoras para cetáceos

Una vez vista la importancia del medio marino en las costas españolas, se va a proceder a estudiar las medidas que se implantarán en el proyecto para reducir al mínimo el impacto ambiental.

Las investigaciones ambientales de proyectos de energías renovables marinas son las más costosas por la variabilidad y la dificultad de entender el impacto de cualquier tipo de proyecto a especies que están en continuo movimiento, sobre las cuales la información es a veces limitada.

Los trabajos de investigación se están llevando a cabo por la industria de la energía renovable marina, junto a científicos colaboradores. Estas investigaciones iniciales crean modelos predictivos sobre riesgos de colisión, gracias a estudios realizados en el lugar de desarrollo particular. En el caso que tras este estudio se conceda autorización del Estado, se llevan a cabo estudios más detallados para determinar cuáles serán los impactos reales en esa zona.

El IEO ha cedido un documento procedente del Grupo de Trabajo del ICES (*International Council for the Exploration of The Sea*) sobre la Ecología de los Mamíferos Marinos donde se revisa la metodología para evaluar y monitorizar el impacto de los arogeneradores y las energías renovables marinas sobre los mamíferos marinos. El documento se titula “*Report of the Working Group on Marine Mammal Ecology (WGMME)*”. Y de este se obtiene la siguiente información.

El documento comenta una manera de prevenir los impactos con los animales marinos. Esta consiste en la monitorización/vigilancia de la zona en la que se realizará la construcción. La monitorización consiste en recopilar datos para informar y orientar la labor predictiva y así poder facilitar la decisión de las autoridades competentes con respecto al consentimiento de las actividades previstas. Los niveles de investigación y las herramientas utilizadas varían de acuerdo a los objetivos de la investigación.

En el documento también da instrucciones de cómo realizar la monitorización, así como la medición de un cambio ambiental atribuible a una actividad.

De un informe realizado por la UK *Crown Estate*, obtenemos la imagen siguiente en la que se muestra como debe ser el seguimiento y las etapas de la evaluación ambiental en un proyecto de energía renovable en alta mar. En primer lugar, está la caracterización del lugar. A continuación, la licencia para desarrollar la monitorización, le sigue la pre-construcción junto con el comienzo de la monitorización y por último, la monitorización tras la construcción.

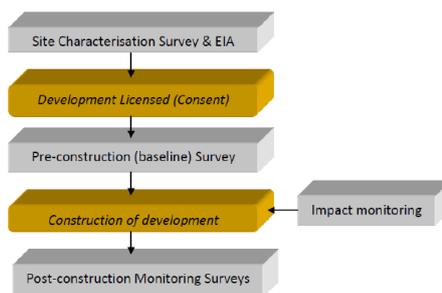


Imagen 25. Informe UK Crown Estate

Por lo tanto, para nuestro proyecto la monitorización se considerará una medida preventiva esencial que se deberá realizar antes de instalar los aerogeneradores, para conocer cuál será la localización menos perjudicial para estos animales dentro de las costas de Punta Umbría.

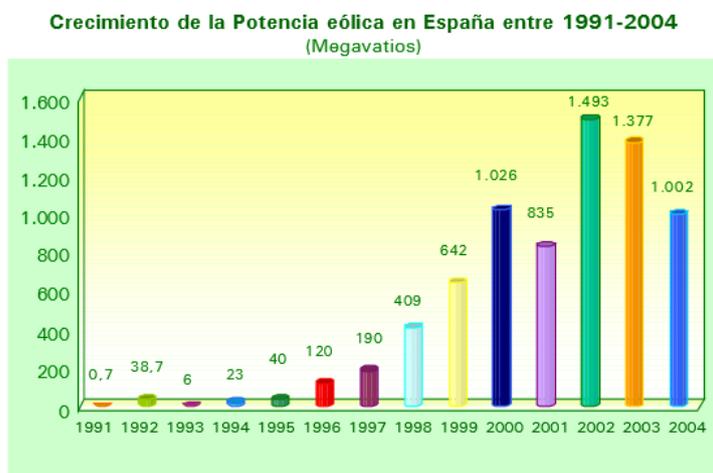
#### 4.5. Energía eólica en Andalucía

La dependencia energética de los combustibles fósiles y la preocupación por la degradación del medioambiente han hecho que se potencie el desarrollo y la investigación de las energías renovables. En concreto, el campo de la energía eólica ha tenido un gran impulso en Andalucía y en el resto de España, por ser un recurso disponible y relativamente barato dentro del mundo de las energías renovables.

Desde la crisis energética de 1973 y el encarecimiento del petróleo a partir de esa fecha, se impulsó el aprovechamiento de nuevas fuentes de energías competitivas y partiendo de medios naturales, renovables y no contaminantes.

Unos años más tarde, se puso en marcha el programa de investigación y desarrollo que buscaba aprovechar el viento para producir energía. Este programa se encuentra formulado dentro del Manual de Energía Eólica, elaborado por el Ministerio de Industria y Energía. Posteriormente, a esos inicios, se comenzaron a realizar máquinas experimentales de baja potencia. La primera máquina experimental fue una turbina tripala de eje horizontal de 100 kW, con una velocidad de giro de 48 revoluciones por minuto. Este prototipo se instaló en Tarifa (Cádiz).

Este proyecto inicial supuso el arranque de una época de desarrollo en la energía eólica, en la que pronto se comenzaron a diseñar nuevas máquinas de mayor potencia (150, 300 y 1250 kW), haciendo así que la producción de la energía eólica en España fuera creciendo exponencialmente.



Fuente: APPA.

Imagen 26. Crecimiento de la Potencia eólica en España (Junta de Andalucía)

La imagen anterior sólo llega hasta 2004, pero lo que se buscaba con esta imagen es ver el crecimiento desde su comienzo hasta una etapa relativamente cercana a la actualidad.

Actualmente, en Andalucía (2015) hay instalados 3.322,48 MW, en un total de 147 parques eólicos y que dan suficiente energía como para abastecer 1.590.000 viviendas.

Situación de la energía eólica en Andalucía

Potencia instalada	Eólica (MW)
ALMERIA	511,29
CADIZ	1.307,18
CORDOBA	
GRANADA	399,81
HUELVA	383,80
JAEN	15,19
MALAGA	569,71
SEVILLA	135,50
ANDALUCIA	3.322,48

(información actualizada a fecha 31 de marzo de 2015)

Imagen 27. Situación de la energía eólica en Andalucía

#### **4.6. Antecedentes de desalación-eólica**

La alternativa de satisfacer las elevadas necesidades de consumo de electricidad de las plantas de desalación, por medio del aprovechamiento de la energía eólica, es una idea que está cada vez ganando más apoyos en distintos puntos del planeta. Aunque se conocen pocos estudios realizados al respecto, combinando la desalación y la eólica, actualmente se están haciendo grandes progresos con esta mezcla.

Un ejemplo de esta combinación viene de la mano de la empresa de ingeniería de procesos española Mtorres. Esta entidad ha diseñado un proyecto innovador híbrido de una desalinizadora eólica en las costas de Murcia, consiguiendo así una reducción de casi el 30% del coste eléctrico en la desalación.

Son varias las diferencias de esta instalación con cualquier otra similar. Primero, el movimiento de las aspas no sólo se usa para la generación de energía eléctrica sino que también se emplea para generar el movimiento hidráulico que se usará para la desalación. Segundo, la planta de desalación no está separada del parque eólico, sino que están unidos y encima del agua del mar. Es una plataforma flotante que se podrá mover allí donde la calidad del agua es la más óptima para realizar el proceso de ósmosis o allí donde la necesidad de desalinización es mayor.

En definitiva, este es sólo el principio de una etapa de cambio en el mundo de la creación de híbridos entre energías renovables y proyectos con gran demanda de energía. En pocos años las energías renovables habrán avanzado tanto que el precio de sus equipos disminuirá considerablemente. Es previsible que al igual se modifiquen, también, sus tamaños y rendimientos. En el caso de la eólica, lo ideal sería lograr una reducción del precio de los aerogeneradores por su comercialización y su estandarización industrial.

#### **5. Normas y referencias**

A continuación se enumeran las distintas normas, referencias bibliográficas y programas que se han tenido en cuenta a la hora de realizar este proyecto.

### Normativa aplicada

- Reglamento y normas de presentación de los trabajos de fin de grado de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil e Industrial de la Universidad de La Laguna
- Ley 2/1989, de 18 de julio, por la que se aprueba el inventario de espacios naturales protegidos de Andalucía y se establecen medidas adicionales para su protección
- Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial
- BOE. Ley 2/2007, de 27 de marzo, de fomento de las energías renovables y eficiencia energética de Andalucía.
- Guía técnica de Energía Eólica – Junta de Andalucía
- Plan General de Ordenación Urbana de Huelva. Ayuntamiento de Huelva.

### Bibliografía

- Medina San Juan, José Antonio – *Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis inversa. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2000*
- World Wide Fund for Nature (WWF) – [www.wwf.es](http://www.wwf.es)
- Junta de Andalucía – [www.juntadeandalucia.es](http://www.juntadeandalucia.es)
- Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado – [www.boe.es](http://www.boe.es)
- Lenntech: Tratamiento y purificación del agua – [www.lenntech.es](http://www.lenntech.es)
- IEO (Instituto Español de Oceanografía), 2013. Visor de información Marina del IEO – [www.ideo-base.ieo.es](http://www.ideo-base.ieo.es)
- Estudio de Geología y Geotecnia, titulado “Permeabilidad de suelos” de la Universidad Nacional del Rosario, realizado por las ingenieras Silvia Angelone, María Teresa Garibay y Marina Cauhapé Casaux
- Derrotero de las costas de España y de Portugal desde el cabo Trafalgar hasta el puerto de la Coruña por el capitán de fragata honorario D. Pedro Riudavets y Tudury. (1867)
- Puertos del estado. Información climática de nivel del mar mareógrafo de Huelva (Mazagón) área del medio físico y tecnología de las infraestructuras. Febrero 2005.

- Flowtite
- SEO BIRDLIFE
- CETIDMED – [www.cetidmed.com](http://www.cetidmed.com)
- DTBIRD – [www.dtbird.com](http://www.dtbird.com)
- World Wind Energy Association (WWEA),
- British Broadcasting Corporation (BBC)
- The International Council for the Exploration of the Sea (ICES)-Working Group on Marine Mammal Ecology (WGMME)
- Boletín Oficial del Estado (BOE)

Programas de cálculo y herramientas usadas:

- Software de dimensionado de membranas y núcleo de desalación *WINFLOWS* de la compañía *General Electrics*
- Software *online* de selección de bombas *KSBEasyselect*, del fabricante KSB
- Software *online* de selección de bombas *Aquabold Selector*, del fabricante *Energy Recovery Inc.*
- Software *online* de selección de bombas *GRUNDFOSWebcap*, del fabricante *Grundfos*.
- Software para selección del recuperador de energía *PowermodelSelector* (Excel), del fabricante *Energy Recovery Inc.*
- Microsoft Office Word
- Microsoft Office Excel
- Software Google Earth
- Sistema de información OBIS. *Ocean Biogeographic Information System*
- *Web Map Services* de la Junta de Andalucía

## 6. Definiciones y abreviaturas

Este apartado tiene por función la de nombrar las abreviaturas que se han usado a lo largo del proyecto, para su completa comprensión.

- SEO *BirdLife*: Sociedad Española de Ornitología
- WWEA: *World Wind Energy Association*
- EEA: *Environmental European Agency*
- OBIS: *Ocean Biogeographic Information System*. Sistema de Información de la Biogeografía Oceánica
- UICN: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
- ICES: *International Council for the Exploration of The Sea*
- WGMME: *Working Group on Marine Mammal Ecology*
- SUO: Suelo Urbanizable Ordenado
- WMS: *Web Map Service*

## 7. Requisitos del diseño

### 7.1. Datos del peticionario

La Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil e Industrial de la Universidad de La Laguna ha especificado al alumno que se debe realizar un estudio de una planta desaladora de agua de mar alimentada por energía eólica con motivo de la realización del proyecto de final de grado.

A la elección del alumno está la selección del tipo de tecnología de desalación y el aprovechamiento de la energía eólica a emplear.

### 7.2. El agua a tratar

#### 7.2.1. Composición del agua a tratar

Antes de comenzar con los cálculos es imprescindible conocer la composición química tanto de nuestra agua captada, como de nuestra agua producto (además de la física). Se usarán distintas fuentes para describir el agua que se captará del mar. Los datos referentes al análisis iónico del agua del mar en Canarias son similares a los valores de nuestra planta ya que se trata del Océano Atlántico. Esta aproximación de valores al océano es muy general y puede ser poco fiable, pero debido a que no hay una gran

variación de sales concretas y de salinidad total en el agua de mar será la aproximación más cercana que podamos hacer, al menos de momento. En una fase posterior, previa a su realización, se procuraría realizar análisis específicos en la zona.

Para conocer realmente la composición química y física del agua a tratar, deberíamos realizar una serie de estudios en la zona de captación y con ella diseñar las membranas.

El análisis iónico es imprescindible y como se comentó antes, se usarán los datos generalizados del Océano Atlántico. Este análisis determinará los tipos de membrana que se podrá usar y los niveles de rechazo máximo según la salinidad del agua. La salinidad es un parámetro que mide la concentración de sal común (NaCl) sobre el volumen de agua total. La unidad de medida suele ser en ppm, indicando los miligramos de sal en un litro de agua. Hay muchas tablas que indican la salinidad dependiendo del mar y del océano, como la siguiente:

Mar/Océano	Salinidad (ppm)
Mar Báltico	28000
Mar del Norte	34000
Océano Pacífico	33600
Océano Atlántico	35000
Mar Mediterráneo	36000
Mar Rojo	44000
Golfo Pérsico	43000-50000
Mar Muerto	50000-80000

Tabla 4. WMS Propiedades físicas del suelo

Además de los iones hay otros parámetros que deben ser tenidos en cuenta.

- pH: Es otro dato importante en el agua captada. Este muestra el nivel de acidez de nuestra agua.
- Alcalinidad: capacidad del agua para neutralizar un ácido
- Dureza

Para caracterizar el agua de nuestra instalación se usarán los valores del agua de mar con captación por pozo que proporciona el programa de las membranas. Por otro lado, el valor del pH se obtendrá del Estudio de Caracterización del Mar Territorial Andaluz, con un valor de pH=8,1. La composición del agua según el programa es la siguiente:

**Feed Water Analysis**

Select Water Source: Sea Wellwater

Select Water Type: User Defined

Ion	mg/l	meq/l	ppm as CaCO3
Calcium (Ca)	408.00	20.3603	1018.90
Magnesium (Mg)	1298.00	106.8093	5345.11
Sodium (Na)	10768.00	468.3776	23439.25
Potassium (K)	396.00	10.1284	506.86
Ammonia - N (NH4)	0.00	0.0000	0.00
Barium (Ba)	0.00	0.0000	0.00
Strontium (Sr)	0.00	0.0000	0.00
Iron (Fe)	0.00	0.0000	0.00
Manganese (Mn)	0.00	0.0000	0.00
<b>Total Cations</b>	<b>12870.00</b>	<b>605.6756</b>	<b>30310.12</b>
Sulfate (SO4)	2702.00	56.2542	2815.15
Chloride (Cl)	19363.90	546.1849	27333.01
Fluoride (F)	0.00	0.0000	0.00
Nitrate (NO3)	0.00	0.0000	0.00
Bromide (Br)	67.00	0.8385	41.96
Phosphate (PO4)	0.00	0.0000	0.00
Boron (B)	0.00	0.0000	0.00
Silica (SiO2)	5.00	0.0016	0.08
Hydrogen Sulfide (H2S)	0.00	0.0000	0.00
Bicarbonate (HCO3)	140.72	2.3062	115.41
Carbon Dioxide (CO2)	0.76	0.0000	0.00
Carbonate (CO3)	2.67	0.0889	4.45
<b>Total Anions</b>	<b>22281.28</b>	<b>605.6755</b>	<b>30310.12</b>

Imagen 28. Composición agua captada

### 7.2.2. Temperatura del agua a tratar

La influencia de la temperatura en el funcionamiento de las membranas es importante desde tres puntos de vista.

- 1) La solubilidad de algunas sales aumenta con la temperatura, por ello a temperaturas elevadas, se reducen riesgos de precipitación
- 2) Influye en la viscosidad del agua y dilata los materiales de las membranas. Pudiendo así reducir la cantidad de rechazo
- 3) El aumento de la temperatura favorece la actividad biológica de microorganismos que provocan un ensuciamiento de las membranas, reduciendo su vida útil y aumentando el número de limpiezas al año

Por ello la temperatura del agua captada es un dato realmente importante a la hora de determinar las condiciones de trabajo de las membranas. El agua que se captará no estará siempre a una misma temperatura, pero podemos conocer el rango de valores en los que se mueve observando los valores máximos y mínimos que se han registrado a lo largo de los últimos años. Para ello se usará el servicio web que ofrece Puertos del Estado, en el que se estudiarán los datos de las temperaturas máximas y mínimas observadas en la boya más cercana. Dicha boya está situada en el golfo de Cádiz y muestra los siguientes resultados tomados en un intervalo desde el año 2002 hasta el 2015, en una gráfica:

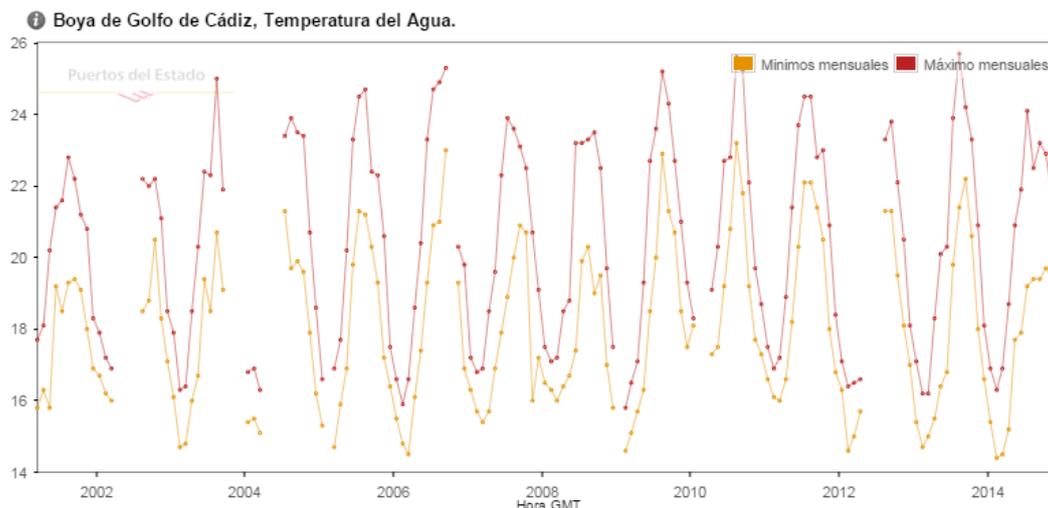


Imagen 29. Temperaturas máximas y mínimas. Gráficos de Puertos del Estado

Tras estudiar los datos anteriores, el rango de temperaturas con el que se trabajará es de los 16-23°C. Siendo la temperatura media usada a lo largo del trabajo de 20°C.

### 7.3. El agua producto

#### 7.3.1. Uso del agua producto

El agua tratada que salga de nuestra instalación se destinará, fundamentalmente, al abastecimiento de los terrenos agrícolas cercanos. Como se explicó en el apartado de justificación del proyecto, se hará así para reducir la dependencia de los recursos hídricos naturales de la zona. Esta dependencia estaba dejando al Parque Nacional en unas condiciones hidrológicas precarias, conllevando esto a una disminución considerable de la fauna y flora que tanto debemos proteger.

Para conocer la demanda agraria de la zona de actuación, se hará uso del documento “Usos y Demandas del Agua” en la demarcación hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras, que es la cuenca hidrográfica que está relacionada con la localización de nuestra instalación. En el apéndice 3.4 encontramos las unidades de demanda agraria.

Dentro de este documento, se encuentra la demanda agraria separada por zonas. Cada zona estará diferenciada por tipos de cultivos y demanda de agua. Para nuestra instalación, la zona de explotación a la que se le dará el agua producto es la zona Andévalo-Chanza-Piedras.



Imagen 30. Zona hidrográfica Andévalo-Chanza-Piedras

En la imagen se muestra la demanda agraria con un color azul celeste. Esta zona tiene una superficie actual de 7.950 hectáreas. Se prevé que aumentará anualmente. En el documento se especifica el valor que se estima tener en 2027.

Superficie asignada (ha)	2015	2027
	7.940,94	8.624,35

Tabla 5. Superficie zona Andévalo-Chanza-Piedras. Datos del documento “Usos y Demanda del Agua”

Hasta ahora el origen del agua usada para riego ha sido tanto superficial como subterráneo. Y el volumen total de demanda actual está sobre los 34 hectómetros cúbicos ( $hm^3$ ). Al igual que con la superficie, el documento da una estimación de la demanda en el 2027.

Demanda	Horizonte	Dot. Bruta superficial media $m^3/ha.año$	Demanda bruta ( $hm^3$ )	Dotación neta media $m^3/ha.año$
	2015	4.249,62	33,750	3.912,60
	2027	4.249,62	36,650	3.912,60

Tabla 6. Demanda zona Andévalo-Chanza-Piedras. Datos del documento “Usos y Demanda del Agua”

Nuestra planta es de  $5000 \frac{m^3}{día}$ , es decir, dará un total de  $1,825 \frac{hm^3}{año}$ . Esto cubrirá el 5,41% de la demanda total en 2015 y el 5% en 2027. Es relativamente poca cantidad de agua cubierta, pero como este es un proyecto inicial dispuesto a modificaciones en cuanto al aumento de agua total producida. Es decir, a pesar de comenzar con  $5000 \frac{m^3}{día}$ , se espera que en unos años se pueda modificar hasta llegar a niveles cercanos al total de la demanda agraria de la zona, y en el mejor de los casos, no solo en esta zona hidrográfica de Andévalo-Chanza-Piedras.

### 7.3.2. Composición del agua producto

Usar agua salada proveniente del mar para el uso agrícola tiene una serie de riesgos por el tipo de composición química que esta tiene. Se podrá salinizar, a medio y largo plazo, el suelo y con ello disminuir la calidad del terreno y por lo tanto, reducir su producción. Aparte, se pueden ocasionar otros problemas relacionados con la toxicidad para las plantas.

Necesitamos por lo tanto conocer cuál debe ser la composición química del agua que se enviará tras su tratamiento. Para ello y conocido que se usará para consumo agrícola, se procederá a tener en cuenta los reglamentos necesarios que establecen la calidad del agua.

Tras consultar diversos artículos sobre este tema, localizamos un documento titulado “Calidad de agua para riego”, elaborado por la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía. Proporciona, precisamente, los datos necesarios de la calidad del agua para riego en una simple tabla. Otros valores importantes, aparte de los ya comentados anteriormente de salinidad, etc., aparecen en la siguiente tabla.

PARÁMETRO DE CALIDAD DEL AGUA	SÍMBOLO	UNIDADES	INTERVALO NORMAL EN EL AGUA DE RIEGO
<b>SALINIDAD</b>			
Contenido en sales			
Conductividad eléctrica	CE <sub>w</sub>	dS/m	0 - 3
Sólidos Disueltos Totales	SDT	mg/l	0 - 2.000
Cationes y aniones			
Calcio	Ca <sup>2+</sup>	meq/l	0 - 20
Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	meq/l	0 - 5
Sodio	Na <sup>+</sup>	meq/l	0 - 40
Carbonato	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	meq/l	0 - 0,1
Bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	meq/l	0 - 10
Cloro	Cl <sup>-</sup>	meq/l	0 - 30
Sulfato	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	meq/l	0 - 20
<b>NUTRIENTES</b>			
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	0 - 10
Amonio	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	0 - 5
Fosfatos	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/l	0 - 2
Potasio (*)	K <sup>+</sup>	mg/l	0 - 2
<b>OTROS ANÁLISIS</b>			
pH (*)	pH		6 - 8,5
Boro	B	mg/l	0 - 2
Acidez	pH	1 - 14	6,0 - 8,5
Relación de Adsorción de Sodio	RAS	meq/l	0 - 15

Tabla 7. Valores considerados como normales en los análisis del agua de riego

Estos valores tendrán gran importancia a la hora de trabajar con las membranas y de elegir los pre y post- tratamientos y con ello, adecuar la calidad de agua producto con lo establecido como agua apta para consumo agrícola por parte de la Junta de Andalucía.

Cabe destacar que se debe tener especial cuidado con las unidades. Ya que los cationes y aniones están en meq/l (miliequivalentes/litro), que es el resultado de dividir la concentración en mg/L por el peso equivalente. A continuación, se expone el ejemplo del cambio de 7 mg/L de Calcio para comprobar si está dentro del rango de 0-20 meq/L.

- Peso equivalente calcio = 20
- Concentración = 7 mg/L

$$\frac{7}{20} = 0,35 \text{ meq/L}$$

Por otro lado, tenemos una tabla de conversión de meq/L a ppm o a mg/L. Comprobamos si sirve.

De	A	Multiplicar por	De	A	Multiplicar por
Meq/l N-NO3 o N-NH4	ppm N	14	ppm N-NO3 o N-NH4	Meq/l N	0.07143
Meq/l H2PO4	ppm P	31	ppm P (Fósforo)	Meq/l H2PO4	0.03226
Meq/l K (Potasio)	ppm K	39	ppm K (Potasio)	Meq/l K	0.0256
Meq/l Ca (Calcio)	ppm Ca	20	ppm Ca (Calcio)	Meq/l Ca	0.05
Meq/l Mg (Magnesio)	ppm Mg	12	ppm Mg (Magnesio)	Meq/l Mg	0.0833
Meq/l SO4 (Sulfato)	ppm SO4	48	ppm SO4 (Sulfato)	Meq/l SO4	0.02083
Meq/l Na (Sodio)	ppm Na	23	ppm Na (Sodio)	Meq/l Na	0.04348
Meq/l Cl (Cloruro)	ppm Cl	35.5	ppm Cl (Cloruro)	Meq/l Cl	0.02817

Tabla 8. Tabla de conversión

Con el mismo ejemplo de antes, es decir, 7mg/L (ppm) de calcio. Según la tabla para pasarlo a meq/L se debe multiplicar por 0,05.

$$7 * 0,05 = 0,35 \text{ meq/L}$$

Es correcto, por ello a la hora de calcular, se usará la tabla anterior.

#### 7.4. Capacidad de la instalación

Este proyecto nace con la idea de iniciar la recuperación hidrológica de las fuentes naturales del Parque Nacional de Doñana. En un principio, se comenzará con una pequeña cantidad de agua producida, que se suministrará directamente a los campos de cultivo y que se sabe requieren gran cantidad de volumen de agua. El aporte inicial es pequeño comparado con el total del agua demandada, pero la idea es que en un futuro se amplíe la instalación hasta tal nivel que se pueda abastecer al completo dicha demanda.

Por lo tanto, nuestra instalación inicial intenta proporcionar un caudal de agua diaria relativamente suficiente, pero que a la vez no sea extremadamente grande para que los cálculos y los equipos no se hagan demasiado complejos y crezcan de una manera desproporcionada muy rápido. Se procurará ir desplegando y desarrollando progresivamente el proyecto, intentando la máxima sostenibilidad económica y ambiental del mismo.

Puesto que esto es un proyecto final de grado y el tiempo están limitados, se ha considerado un buen caudal de captación el comprendido entre 2000-5000  $\frac{m^3}{día}$ . En nuestra instalación se cogerá el máximo posible, ya que la demanda agrícola en la zona es muy grande. Nuestra planta producirá 5000  $\frac{m^3}{día}$ .

## 8. Situación y emplazamiento

### 8.1. Localización planta desalación

Para elegir el punto donde se instalará el proyecto se tendrán en cuenta una serie de condiciones:

- Cercanía al Parque Nacional de Doñana sin afectar las zonas protegidas, las rutas migratorias de las aves ni la fauna marina
- Localización en zona ventosa para el máximo aprovechamiento de los aerogeneradores
- Cercanía al mar para la disponibilidad del recurso hídrico
- Situación en terreno urbanizable o de uso industrial y energético
- Cercanía a polígonos industriales

La planta desaladora se instalará cerca de las zonas de explotación agrícolas contiguas al Parque Nacional de Doñana, ya que, como se ha explicado en apartados anteriores, el agua se destinará para el riego de los cultivos de los alrededores.

En un principio, se elimina la posibilidad de hacer la instalación al este del Parque porque la localización ahí de los aerogeneradores que van vinculados a la planta afectará negativamente al paso de las aves migratorias. Por lo tanto se ha elegido el oeste, en Huelva.

No se puede elegir la zona de La Rábida porque está demasiado alejada del mar y se debería realizar una instalación complementaria que pase por la Isla de Saltes, que es una zona protegida. Por lo tanto, al oeste del Parque y cerca del mar se encuentra Punta Umbría.



Imagen 31. Punta Umbría

Tras la selección del lugar, se procedió a la localización de una parcela con terreno urbanizable. Para ello se hizo uso del plano de ordenación de Punta Umbría desde la página web de la Junta de Andalucía. Este plano se muestra a continuación.



Imagen 32. Plano ordenación Punta Umbría

Las parcelas marcadas en gris con las letras “SUO” indican “Suelo urbanizable ordenado”. Por lo tanto se elegirá una de estas parcelas. Las áreas urbanizables superiores están justo al lado del polígono industrial de Punta Umbría, por lo tanto se elegirá alguna de esas. En concreto se ha seleccionado la parcela que está a la derecha de las tres superiores.



Imagen 33. Parcela

Se comprobó, obviamente, que dicha localización correspondía a una zona ventosa. Para ello se miró el mapa eólico de España a 80 metros de altura (altura próxima a la mayoría de aerogeneradores) del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, donde se ve reflejado que Huelva está cerca de uno de los puntos más ventosos de España.



Imagen 34. Mapa eólico de España

Al ver el mapa queda claro que cuando más cerca de Cádiz, en concreto del Estrecho de Gibraltar, mucha más velocidad del viento. Como ya antes se había comentado que el este de Doñana es impensable, lo mejor sería entrar mar adentro, donde las velocidades del viento son mayores.

Este punto anterior será decisivo más adelante.

Finalmente, dadas las condiciones estudiadas en este apartado, la localización de la parcela será en Punta Umbría. Las siguientes imágenes muestran imágenes reales de la misma.



Imagen 35. Parcela

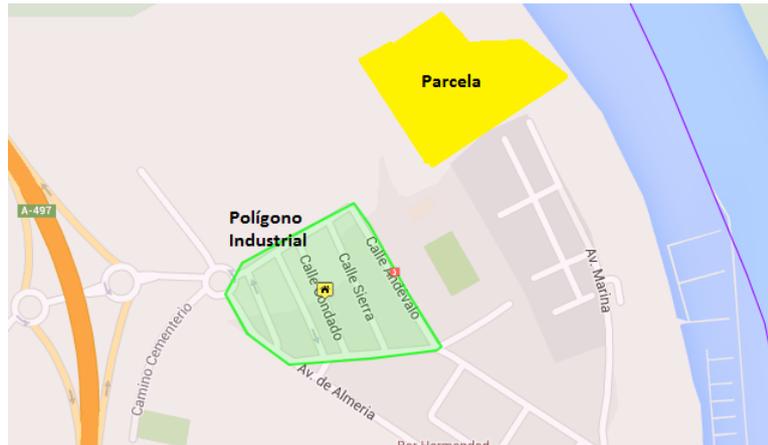


Imagen 36. Parcela



Imagen 37. Parcela

## 8.2. Localización aerogeneradores

Una vez estudiadas las condiciones medioambientales en el apartado de Aerogeneradores y medio ambiente, se ha decidido construir los aerogeneradores a 25 km de la planta de desalación, y a unos 10 km del punto más cercano a la costa. En las imágenes siguientes podemos ver dicho punto.

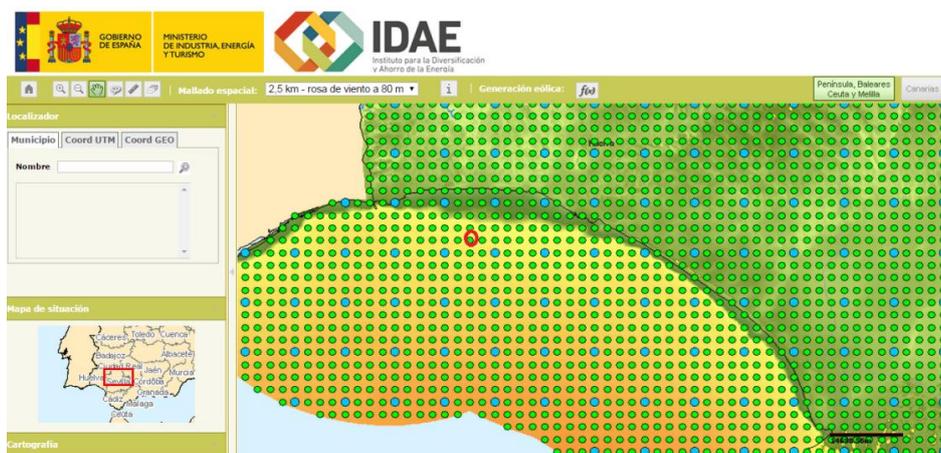


Imagen 38. Punto de instalación del aerogenerador

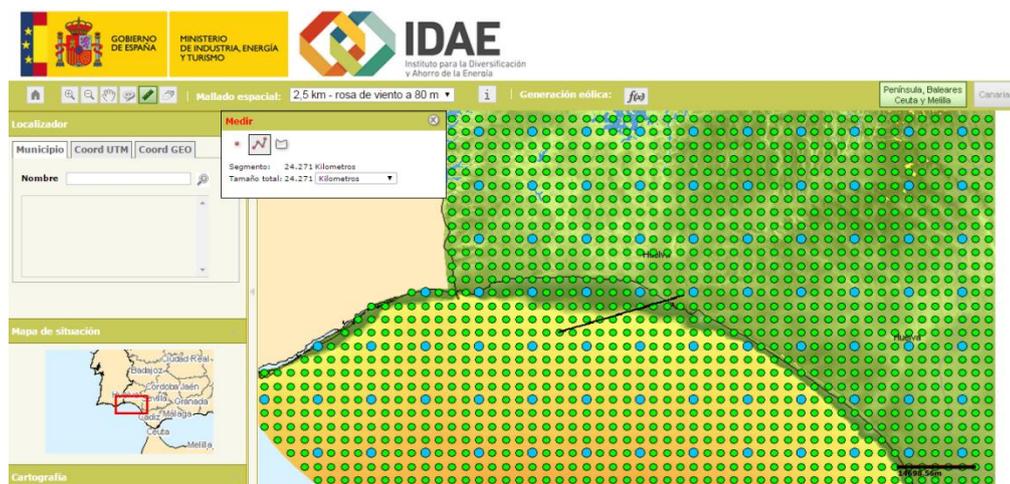


Imagen 39. Distancia al punto de instalación del aerogenerador

Este punto ha sido seleccionado por distintos motivos:

- a) Distancia prudente a la costa para evitar contaminación acústica y visual



Imagen 40. Contaminación visual según distancia del punto de instalación del aerogenerador

- b) Alta velocidades de viento en dicho punto
- c) Suelo fangoso, por lo que facilita la excavación para el posterior montaje de la estructura del aerogenerador. Con ello reduce la contaminación de la fauna y flora del lugar

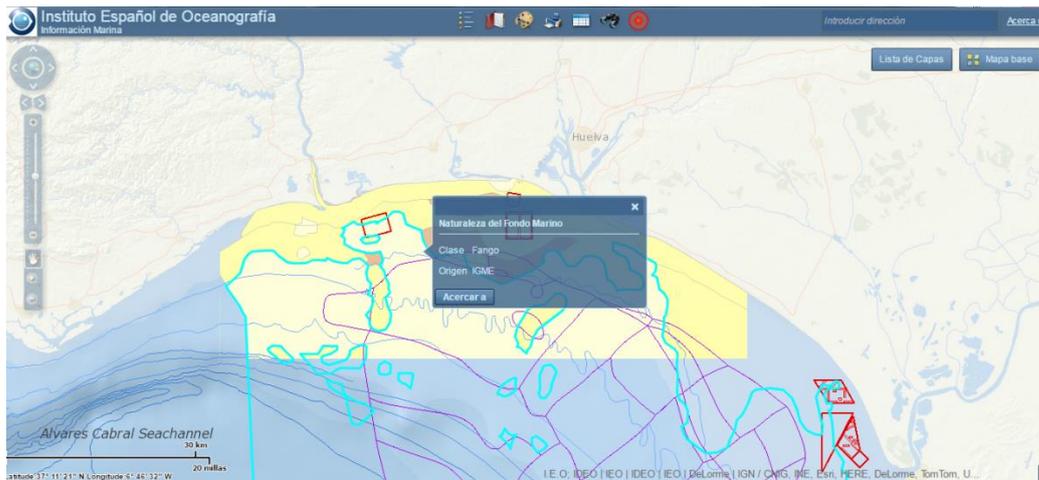


Imagen 41. Tipo de fondo marino en el punto de instalación del aerogenerador

- d) Distancia alejada del Parque Nacional de Doñana, reduciendo así el impacto con aves
- e) Profundidad prudente para no necesitar una base demasiado grande donde colocar el aerogenerador. En este caso se tendrá una profundidad de 25 metros

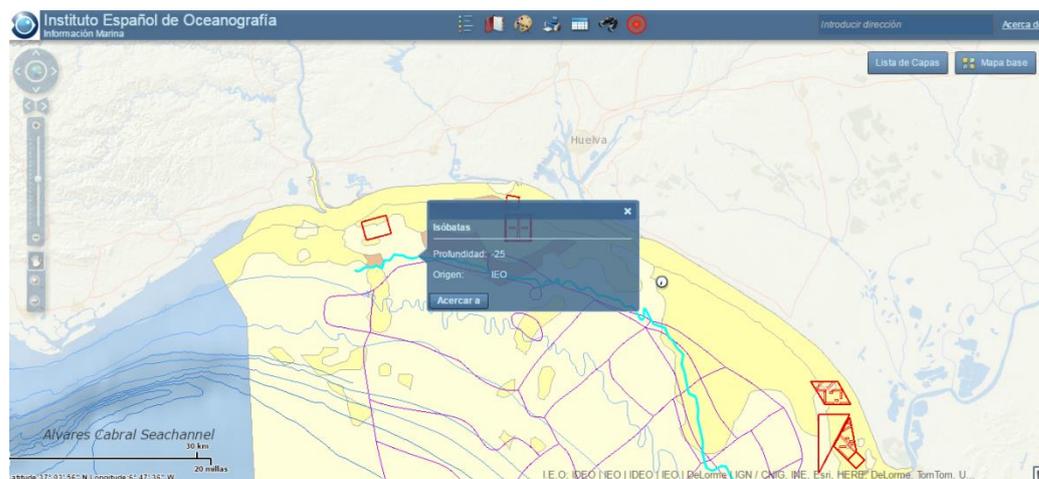


Imagen 42. Profundidad en el punto de instalación del aerogenerador

- f) No interfiere en ningún tipo de arrecife artificial (cuadrados rojos en la imagen) ni natural y tampoco afecta a caladeros (áreas comprendidas entre las líneas violetas de la imagen). Aparte, a la larga la base del aerogenerador comenzará a formar parte de un arrecife artificial por la adaptación de la fauna y la flora de este nuevo objeto.

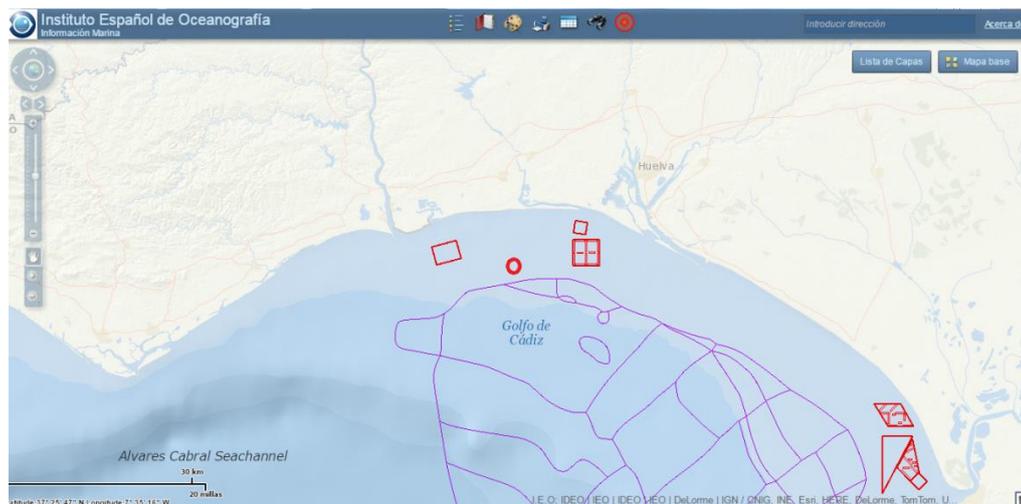


Imagen 43. Arrecifes y caladeros cercanos al punto de instalación del aerogenerador

## 9. Análisis de soluciones

En el siguiente apartado se realizarán todos los cálculos para dimensionar todo el sistema de desalación y la instalación eólica. Se estudiarán detalladamente todos los aspectos técnicos de cada parte hasta llegar a las conclusiones más óptimas.

### 9.1. Pretratamientos físicos

En este apartado se abordará la selección del pretratamiento más adecuado para modificar las características del agua de alimentación antes de la entrada a las membranas de ósmosis.

La teoría de los filtros de cartucho la encontramos en el Anexo I.

#### 9.1.1. Selección del filtro de cartucho (filtración fina)

Como ya se comentó en el Anexo I, los fabricantes de membrana especifican que se debe hacer una filtración mínima de 5  $\mu\text{m}$ . Pero más adelante muchos requieren otra de 1  $\mu\text{m}$ . Por ello se ha decidido instalar un único filtro de 1  $\mu\text{m}$ . Para la selección del mismo se ha usado el mismo fabricante que las membranas y gracias al programa *Winflows* se han obtenido todos los catálogos de los filtros.

Para la selección, en primer lugar se han eliminado todos aquellos cuya filtración fuera mayor a 1  $\mu\text{m}$ . En segundo lugar, se eligió un filtro cuyo número de cartuchos no fuera excesivamente grande. Y por último, se tuvo en cuenta que las pérdidas de carga no supusieran una gran disminución de la presión del agua.

El filtro elegido es el SWRO ZS. 01-50. Se necesitarán 17 filtros y su variación de presión es de 0,75bar. Está formado por fibras de polipropileno. Las dimensiones del cartucho se especifican en su ficha técnica que se puede encontrar fácilmente en internet.

Dimensiones	
Diámetro nominal exterior	Diámetro nominal interior
2,50" (6,4cm)	1" (2,5cm)

Tabla 9. Dimensiones del filtro de cartucho

Estos datos están proporcionados por el fabricante y han sido obtenidos por medio del programa informático *Winflows* del que se ha hecho una captura de pantalla para ver la imagen siguiente:

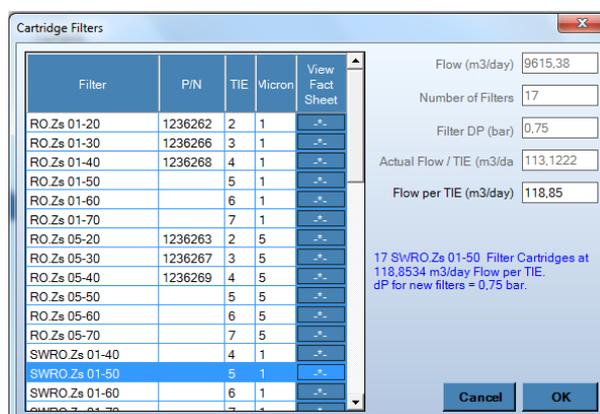


Imagen 44. Filtro de cartucho

## 9.2. Pretratamientos químicos

El agua que captamos del mar contiene una composición química no apropiada para enviar directamente hasta las membranas. Estas requieren unas condiciones de trabajo establecidas por el fabricante. Para adecuar el agua de mar, se llevan a cabo una serie de tratamientos que permitirán cambiar su composición química hasta los niveles necesarios. Aunque no sólo hay que mirar que las condiciones cumplan con las peticiones de las membranas, sino que también hay que conocer la calidad del agua producto necesario mirando la reglamentación necesaria. En este apartado se seleccionará el tratamiento necesario para adecuar el agua producto a nuestros requerimientos.

Los distintos tipos de pretratamientos químicos más usados los podemos ver en el Anexo I.

### 9.2.1. Pretratamiento usado

En nuestra instalación el pretratamiento que se usará es la dosificación de ácido sulfúrico antes del filtro en el pretratamiento físico. Con ello buscamos una acidificación del agua de mar desde un pH de 8,1 hasta 5,3. Para ello la cantidad suministrada es de 16,41 ppm.

Este pretratamiento se requiere, a pesar de que el agua producto deba estar en un rango entre los 6-8,5 de pH, ya que con un pH tan elevado el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) precipitará en las membranas.

Más adelante se usarán post-tratamientos para volver a ajustar el pH hasta el rango necesario para el riego.

Pretratamiento químico	Cantidad (ppm)
Ácido sulfúrico H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (reducción del pH)	16,41

Tabla 10. Pretratamiento químico

Chemical = H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Dosage = 16,41 ppm

Imagen 45. Dosado del pretratamiento químico en el programa Winflows

## 9.3. Núcleo de desalación

### 9.3.1. Capacidad de la instalación

Antes de comenzar el dimensionado de la instalación se debe decidir la producción de agua que esta tendrá. Según este dato se adaptarán el resto de elementos, membranas, bombas, pozos, etc. También junto con el valor de la conversión permitirá conocer el caudal de agua total que entrará a la instalación.

En este proyecto, la producción de agua se ha establecido desde un principio en  $5000 \frac{m^3}{día}$ . Con esta capacidad se permitirá obtener los resultados que se expondrán en los apartados siguientes.

### 9.3.2. Diseño del núcleo de desalación

El corazón de nuestra instalación se encuentra en las membranas del núcleo de desalación. Estas se encargarán de la separación de las sales para producir el agua producto. Las membranas y los materiales que las componen son seleccionadas según las características del agua a tratar.

A continuación, se llevará a cabo el diseño de todos los aspectos estudiados en el Anexo I para el núcleo de desalación. Para ello, se hará uso del programa informático que proporciona *General Electrics*. El nombre es *WINFLOWS* y permitirá variar datos a nuestro antojo para finalmente obtener el resultado más productivo y económico posible.

#### **9.3.2.1. Programa de diseño. WINFLOWS.**

Este será el programa que usemos. Si vamos a la página oficial de *General Electrics* podemos encontrar la siguiente descripción:

“El programa de diseño y simulación de sistemas de ósmosis inversa, *Winflows*, brinda una simulación avanzada a un nivel completamente nuevo. El programa es intuitivo y hace fácil y sencillo el diseño de sistemas complejos. Además, *Winflows* incorpora pretratamientos químicos y la cantidad de dosificación necesaria de los mismos”.

#### **9.3.2.2. Datos preliminares**

A continuación se irá obteniendo la configuración de nuestra instalación paso a paso, partiendo desde cero. En primer lugar encontramos con que necesitamos producir  $5000 \frac{m^3}{día}$ . Además conocemos que se tendrá una captación de agua de mar por pozo. Estos serán los datos de partida.

En primer lugar, se especificará la cantidad de agua producto que requerimos, dependiendo de la conversión que haya se cambiará el caudal de agua de alimentación necesaria automáticamente.

En segundo lugar, se irá a la pestaña “*Feed*” en donde se especificarán los datos del agua de alimentación. El mismo programa pone automáticamente estos valores de agua de mar para pozo, pero además se especifica que se tiene un pH de 8,1 y una temperatura de trabajo de 20°C.

The screenshot shows the 'Water Type' software interface. It is divided into several sections:

- Feed Water Analysis:** Includes dropdowns for 'Select Water Source' (Sea Wellwater) and 'Select Water Type' (User Defined). Below is a table of ion concentrations.
- Parameters:** A list of water quality parameters with their values.
- Saturation Data (Feed Water):** A list of saturation percentages for various ions.
- Buttons:** Multiple Feed, Design Guidelines, Add Sodium, Add Chloride, Clear Values, Balance, Export, Import, Cancel, and OK.

Ion	mg/l	meq/l	ppm as CaCO3
Calcium (Ca)	408.00	20.3603	1018.90
Magnesium (Mg)	1298.00	106.8093	5345.11
Sodium (Na)	10768.00	468.3776	23439.25
Potassium (K)	396.00	10.1284	506.86
Ammonia - N (NH4)	0.00	0.0000	0.00
Barium (Ba)	0.00	0.0000	0.00
Strontium (Sr)	0.00	0.0000	0.00
Iron (Fe)	0.00	0.0000	0.00
Manganese (Mn)	0.00	0.0000	0.00
<b>Total Cations</b>	<b>12870.00</b>	<b>605.6756</b>	<b>30310.12</b>
Sulfate (SO4)	2702.00	56.2542	2815.15
Chloride (Cl)	19363.90	546.1849	27333.01
Fluoride (F)	0.00	0.0000	0.00
Nitrate (NO3)	0.00	0.0000	0.00
Bromide (Br)	67.00	0.8385	41.96
Phosphate (PO4)	0.00	0.0000	0.00
Boron (B)	0.00	0.0000	0.00
Silica (SiO2)	5.00	0.0016	0.08
Hydrogen Sulfide (H2S)	0.00	0.0000	0.00
Bicarbonate (HCO3)	140.72	2.3062	115.41
Carbon Dioxide (CO2)	0.76	0.0000	0.00
Carbonate (CO3)	2.67	0.0889	4.45
<b>Total Anions</b>	<b>22281.28</b>	<b>605.6755</b>	<b>30310.12</b>

Parameter	Value
Total Alkalinity (ppm CaCO3)	120.00
TDS (mg/l)	35151.28
pH	8.10
Temperature (C)	20.00
SDI	4.00
Recovery (%)	70

Saturation Data (Feed Water)	Value
BaSO4	0.00 %
CaF2	0.00 %
CaSO4	21.94 %
SiO2	3.92 %
SrSO4	0.00 %
Struvite	0.000 %
LSI	0.63
Stiff-Davis Index	0.18
Osmotic Pressure	362.38 psi
Conductivity at 25C	51660 µS/cm
Density	1022.8 kg/m3

Imagen 46. Características agua alimentación

### 9.3.2.3. Selección de la membrana

Nos encontramos con que el programa por defecto da un 75% de recuperación. Por lo tanto, para producir  $5000 \frac{m^3}{\text{día}}$  se necesitarán  $6666,67 \frac{m^3}{\text{día}}$ . Este dato cambiará a continuación.

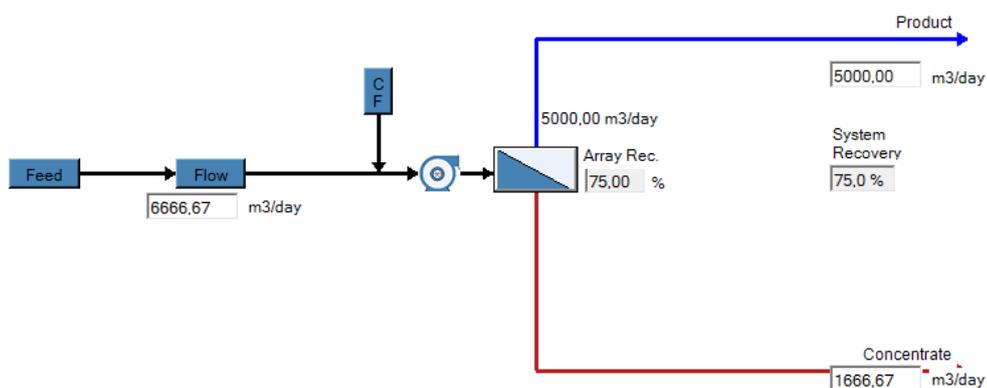


Imagen 47. Programa de diseño

Se comenzará el diseño con la selección de las membranas, para ello se elegirá aquella que dé un área mayor por membrana y que por lo tanto aproveche más el espacio. Para seleccionar la membrana se mirará el número de posibilidades que da el programa.

Tras mirar las distintas membranas, sus áreas y el flujo nominal. La decisión tomada es la de usar los elementos del tipo AE-440.

Membrana tipo	Área ( $m^2$ )	Flujo nominal ( $\frac{m^3}{día}$ )
AE-440	40,87	37,47

Tabla 11. Membrana elegida

Esta membrana pertenece a la serie AE-HR, que son membranas de baja energía y alto rechazo. A continuación se adjunta una imagen de la descripción de las mismas en su catálogo.

GE Power & Water  
Water & Process Technologies

Fact Sheet

## AE HR Series

### High Rejection Low Energy Seawater RO Elements

The AE HR series of proprietary thin film reverse osmosis membrane elements are characterized by an excellent sodium chloride rejection. AE HR series is selected when high quality permeate is demanded from seawater that is relatively high in TDS.

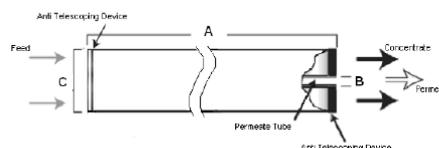


Imagen 48. Hoja de datos de la membrana elegida

#### 9.3.2.4. Número de membranas

A continuación debemos obtener el número de membranas, para ello y como se comentó anteriormente, se puede llegar a un valor aproximado por medio del área de membrana y del flujo de funcionamiento típico ( $\frac{l}{m^2 \cdot h} = LMH$ ). En el catálogo del producto se especifican los siguientes datos:

Membrana tipo	Área ( $m^2$ )	Flujo de funcionamiento (LMH)
AE-440	40,87	12-19

Tabla 12. Membrana elegida

Para el cálculo se usará el valor medio del flujo de funcionamiento, en este caso

15. En planta se necesita un flujo de  $5000 \frac{m^3}{día}$ , es decir,  $208333,33 \frac{l}{h}$ .

Necesitaré un área de:

$$\frac{208333,33 \frac{l}{h}}{15 \text{ LMH}} = 13888,89 \text{ m}^2$$

Y por lo tanto una cantidad de membranas:

$$\frac{13888,89 \text{ m}^2}{40,87 \text{ m}^2} = 339,83 \text{ membranas}$$

### 9.3.2.5. Tubos de presión

En un principio, la diferencia fundamental entre los dos tubos de presión con los que encontramos es el número de membranas que abarcan cada uno y que luego determinará el número de tubos a usar. Con tubos de 7 (7 membranas por tubos) se usará un total de 49 tubos, mientras que con tubos de 6 se usarán 57.

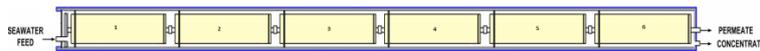


Imagen 49. Tubo de presión de 6 membranas



Imagen 50. Tubo de presión de 7 membranas

Estos datos son representativos y no tienen por qué ser, necesariamente, los usados. A continuación, mediante la iteración entre el número de tubos de 6 y 7 membranas se irán cambiando la conversión hasta llegar al punto máximo y con ese punto obtener la mejor configuración.

### 9.3.2.6. Conversión y número de etapas

Este apartado se hará en conjunto, puesto que, en primer lugar, se estudiará el sistema con una etapa y luego con doble etapa. En ambos casos se irá variando el número de tubos de presión y la conversión hasta llegar a unos valores de máximo aprovechamiento. Es decir, mínimo número de membranas y máxima conversión.

El proceso será el siguiente: en primer lugar se estudiará el sistema para una etapa y por último con dos etapas. En cada uno se evaluará el número de membranas necesarias para el mayor y el menor valor de conversión. Y a su vez se estudiará este paso anterior para tubos de 7 membranas y tubos de 6. A continuación, se adjuntarán una serie de tablas con los datos obtenidos de la manera más clara posible.

- 1 Etapa, tubos de 6 membranas (estudio 1)

Número de tubos	Membrana por tubo	Conversión (%)	Error
100	6	50	-Valor de conversión alto -Flujo de agua en más de un elemento es cero
30	6	50	-Flujo de permeado superior al recomendado
42	6	49	-Ninguno

Tabla 13. Estudio 1, núcleo

Para llevar a cabo este primer estudio, se establecerá un primer valor de conversión alto, de 50% y se usará un número elevado de tubos de presión para intentar que funcione. En este primer caso, el programa indica que hay demasiados tubos de presión y que en gran parte de ellos no llega fluido a desalar, además que el valor de conversión es demasiado alto para los primeros elementos.

En el segundo caso hemos reducido el número de tubos de presión pero el programa indica que el valor del permeado es demasiado elevado.

A continuación, se procede a la reducción de la conversión hasta un 49% y tras cambiar varias veces el número de tubos de presión, porque el programa especifica que el flujo del permeado es demasiado elevado. Se ha llegado al punto en el que se permite una conversión del 49%, usando 42 tubos de presión de 6 membranas por tubo.

	Feed	Product	Concentrate
<b>Alkalinity, ppm CaCO<sub>3</sub></b>	120,00	13,35	201,32
<b>TDS, mg/l</b>	35151,28	161,51	68671,95
<b>pH</b>	8,10	7,00	6,92
<b>LSI</b>	0,63	-2,46	-0,11
<b>Stiff-Davis Index</b>	0,18	-2,93	-0,64

Imagen 51. Propiedades químicas de los flujos para el estudio 1

- 1 Etapa, tubos de 7 membranas (estudio 2)

Número de tubos	Membrana por tubo	Conversión (%)	Error
60	7	50	-No hay fluido en algunos elementos
30	7	53	-Flujo de permeado superior al recomendado
36	7	53	-Ninguno

Tabla 14. Estudio 2, núcleo

Para este segundo estudio, volvemos a establecer un primer valor de conversión alto, de 50% y un número no tan elevado de tubos de presión como antes, ya que se tendrán 7 membranas por tubo, por lo tanto elegimos 60 tubos. En este primer caso del segundo estudio, el programa indica que hay demasiados tubos de presión y que en gran parte de ellos no llega fluido a desalar. Pero no especifica nada sobre que el valor de conversión sea demasiado alto, así que se aumentará.

En el segundo caso, hemos reducido el número de tubos de presión hasta 30 y aumentado la conversión a 53%, pero el programa indica que el valor del permeado es demasiado elevado para ese número de membranas. Por ello se aumentará el número de tubos de presión manteniendo la conversión

A continuación, se ha reducido el número de tubos hasta 36 tras una serie de pruebas y se ha llegado al punto en el que se permite una conversión del 53%, usando esos 36 tubos de presión de 7 membranas por tubo.

	Feed	Product	Concentrate
<b>Alkalinity, ppm CaCO<sub>3</sub></b>	120,00	13,41	218,30
<b>TDS, mg/l</b>	35151,28	172,52	74486,69
<b>pH</b>	8,10	7,00	6,92
<b>LSI</b>	0,63	-2,46	-0,04
<b>Stiff-Davis Index</b>	0,18	-2,93	-0,56

Imagen 52. Propiedades químicas de los flujos para el estudio 2

- 2 Etapas, tubos de 6 membranas (estudio 3)

En primer lugar, se establece un valor de conversión del 55%. Se usarán 30 tubos en la primera etapa y la mitad en la segunda. En este primer caso no da ningún tipo de problemas. Por ello se intentará aumentar la conversión al 56%.

Para mayores valores de conversión del 55% el programa especifica que hay saturación de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>). Por ello se seleccionará una conversión del 55% y se ajustará al mínimo el número de tubos de presión.

Finalmente, el diseño escogido para 2 etapas y tubos de 6 membranas es de un 55% de conversión, 27 tubos en la primera etapa y 15 tubos en la segunda etapa.

Número de tubos (1 etapa)	Número de tubos (2 etapa)	Membrana por tubo	Conversión (%)	Error
30	16	6	55	-Ninguno
		6	>55	-Precipitación CaCO <sub>3</sub>
27	15	6	55	-Ninguno

Tabla 15. Estudio 3, núcleo

	Feed	Product	Concentrate
Alkalinity, ppm CaCO <sub>3</sub>	120,00	13,44	227,92
TDS, mg/l	35151,28	178,10	77783,65
pH	8,10	7,00	6,93
LSI	0,63	-2,46	0,00
Stiff-Davis Index	0,18	-2,92	-0,51

Imagen 53. Propiedades químicas de los flujos para el estudio 3

- 2 Etapas, tubos de 7 membranas (estudio 4)

Para este cuarto estudio, valores superiores al 55% de recobro da precipitación del CaCO<sub>3</sub>. Por ello se limitará al 55% como antes. Usando los valores anteriores de 27 tubos en la primera etapa y 15 en la segunda tampoco da errores. Por ello se disminuirá la cantidad de tubos.

Finalmente y tras varios cambios, los valores mínimos de números de tubos son, en la primera etapa 24 tubos y en la segunda etapa 12. Conversión del 55%.

Número de tubos (1 etapa)	Número de tubos (2 etapa)	Membrana por tubo	Conversión (%)	Error
		7	>55	-Precipitación CaCO <sub>3</sub>
27	15	7	55	-Ninguno
24	12	7	55	-Ninguno

Tabla 16. Estudio 4, núcleo

	Feed	Product	Concentrate
Alkalinity, ppm CaCO <sub>3</sub>	120,00	13,44	227,93
TDS, mg/l	35151,28	178,47	77784,34
pH	8,10	7,00	6,93
LSI	0,63	-2,46	0,00
Stiff-Davis Index	0,18	-2,92	-0,51

Imagen 54. Propiedades químicas de los flujos para el estudio 4

A modo de resumen podemos encontrar la siguiente tabla:

Estudio	Número de tubos (1 etapa)	Número de tubos (2 etapa)	Membrana por tubo	Conversión (%)	Total tubos
1	42	0	6	49	42
2	36	0	7	53	36
3	27	15	6	55	42
4	24	12	7	55	36

Tabla 17. Estudios núcleo

Aparte de los datos del número de membranas y la conversión, es necesario conocer el consumo específico de cada sistema para poder hacer la elección final. Los valores son los siguientes:

Estudio	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )
1	4,18
2	4,12
3	4,13
4	4,17

Tabla 18. Estudio consumo específico núcleo

- **Conclusión**

Para concluir observamos que el menor número de membranas se da para aquellos tubos de presión que usan 7 membranas por tubo, siendo el valor total de 36, tanto para el caso de 1 etapa como para el de 2 etapas. Por ello, se descartan las configuraciones de 6 membranas por tubos por tener un elevado número de membranas.

Analizando pues, las configuraciones de tubos de 7, vemos que la que tiene mayor conversión es la de 2 etapas. Pero por otro lado tiene un consumo específico más elevado que la de una etapa. Por lo que, debido a este aumento del consumo y porque el valor de TDS es menor para la configuración de 1 etapa finalmente se elegirán 36 tubos de 7 membranas con una conversión del 53%, en una etapa y con un consumo específico de  $4,12 \frac{kWh}{m^3}$ .

Además, comprobamos que el agua producto cumple perfectamente con los requisitos de calidad de agua para riego.

Ions, mg/l		Product	Concentrate
Calcium		0.44	896.10
Magnesium		1.11	2755.71
Sodium		55.01	22809.42
Potassium		2.93	837.81
Ammonia - N (NH4)		0.00	0.00
Barium		0.00	0.00
Strontium		0.00	0.00
Iron		0.00	0.00
Manganese		0.00	0.00
Sulfate		1.76	5795.40
Chloride		99.44	41028.43
Fluoride		0.00	0.00
Nitrate		0.00	0.00
Bromide		0.48	141.77
Phosphate		0.00	0.00
Boron		0.00	0.00
Silica		0.03	10.59
Hydrogen Sulfide		0.00	0.00
Bicarbonate		1.56	235.20
Carbon Dioxide		23.70	23.61
Carbonate		0.00	0.21
TDS, mg/l		152.77	74480.63
Flow	m3/day	4998.19	4441.59
Temperature	C	20.00	20.00
Pressure	bar	0.00	60.75
Osm. Pressure	bar	0.14	55.41
pH		5.03	6.63
Conductivity at 25C	µS/cm	321.00	97550.00
<b>Saturation Data</b>			
BaSO4	%	0.00	0.00
CaF2	%	0.00	0.00
CaSO4	%	0.00	55.66
SiO2	%	0.01	7.74
SiSO4	%	0.00	0.00
Struvite	%	0.00	0.00
LSI		-6.14	-0.36
S&DI		-7.00	-0.91

Imagen 55. Calidad del agua producto

### 9.3.2.7. Variación de parámetros según la temperatura

Según se estudió al principio, las temperaturas de trabajo variarán en un rango desde los 16 hasta los 23°C. Si la temperatura de trabajo se mantuviese estable, aumentaría la productividad, pero a su vez aumentaría el consumo de energía al tener que instalar la maquinaria apropiada para enfriar/calentar el agua según los requisitos.

Cuando hay un aumento de temperaturas, la viscosidad del agua se reduce y hace que pase con mayor facilidad por las membranas, reduciendo así el rechazo de sales, tanto por la dilatación de las membranas como por el aumento de la solubilidad de las sales.

Refrigerando el agua, se aumentará la presión, la conversión y por lo tanto, mejorará el agua producida.

Lo comentado antes se puede ver reflejado en la gráfica siguiente obtenida del libro “Desalación de aguas salobres y de mar” Medina San Juan (2000).

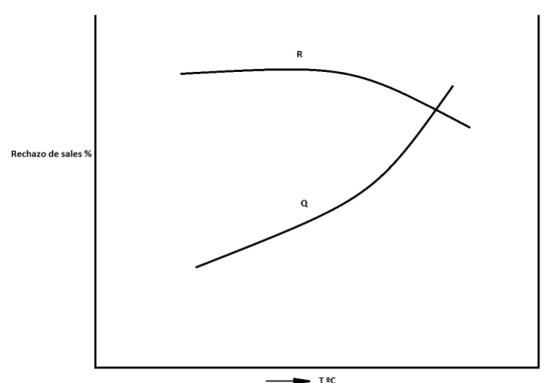


Imagen 56. Gráfica de la influencia de la temperatura

Ahora se variarán las temperaturas en el programa informático para ver qué consecuencias tiene. Se usará la mínima y la máxima para representar los intervalos más desfavorables.

Temperatura	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	TDS	Errores
16°C	2,32	1023,8	141,48	
23°C	2,11	1022,0	200,91	-Precipitación CaCO <sub>3</sub> -Conversión elevada

Tabla 19. Variación de los parámetros por la influencia de la temperatura

Como ya se esperaba. Cuando la temperatura es elevada, habrá un mayor número de TDS en el producto debido a ese aumento del paso de sales por las membranas. Además de una disminución de la densidad y del consumo específico al necesitar menor presión para hacer pasar el agua por las membranas. Por otra parte el programa da un error, especifica que habrá precipitación del CaCO<sub>3</sub> (carbonato de calcio). Y que el valor de conversión es elevado.

Por otro lado, cuando la temperatura disminuye, el rechazo de sales es mayor y por lo tanto el valor del TDS disminuye en el producto. Aumenta la densidad y por lo tanto hay un incremento del consumo específico.

En la instalación se trabajará a una temperatura media de 20°C y los cálculos se realizarán suponiéndola constante. Sin embargo, se debe tener constancia de que estas temperaturas pueden cambiar a lo largo de los meses. Por ello se tendrá en consideración con los errores que especifica el programa cuando la temperatura aumenta a los 23°C, así que se reducirá el valor de la conversión al 52%.

### 9.3.2.8. Conclusión

Tras estudiar todos los parámetros necesarios a tener en cuenta para el dimensionado de las membranas del núcleo de desalación se ha llegado a la conclusión que el mejor diseño en cuanto a cantidad de membranas, consumo y calidad de agua es, el de instalar 36 tubos de presión de 7 membranas con una conversión del 52% y un consumo específico de  $4,13 \frac{kWh}{m^3}$  (mayor al  $4,12 \frac{kWh}{m^3}$  calculado anteriormente debido a la reducción del valor de la conversión). Este diseño también cumple con las especificaciones químicas necesarias en cuanto a calidad del agua producto para consumo agrícola, menos con el pH, que para ajustarlo se usarán los pretratamientos de los que se hablarán más adelante.

Debido al valor de la conversión, para producir  $5000 \frac{m^3}{día}$ , es necesario captar un total de  $9615,38 \frac{m^3}{día}$ . Los datos finales se encuentran en tablas a continuación:

Número de tubos	Membrana por tubo	Conversión (%)	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )
36	7	52	4,13

Tabla 20. Estudio 1, núcleo

	Feed	Product	Concentrate
Alkalinity, ppm CaCO <sub>3</sub>	120,00	0,88	213,83
TDS, mg/l	35151,28	149,48	72955,71
pH	8,10	5,24	6,92
LSI	0,63	-6,39	-0,06
Stiff-Davis Index	0,18	-6,83	-0,58

Imagen 57. Propiedades químicas de los flujos finales

Ions, mg/l		Product	Concentrate
Calcium		0.44	848.23
Magnesium		1.09	2698.87
Sodium		53.88	22340.93
Potassium		2.88	820.63
Ammonia - N (NH4)		0.00	0.00
Barium		0.00	0.00
Strontium		0.00	0.00
Iron		0.00	0.00
Manganese		0.00	0.00
Sulfate		1.72	5652.18
Chloride		87.55	40185.38
Fluoride		0.00	0.00
Nitrate		0.00	0.00
Bromide		0.47	138.87
Phosphate		0.00	0.00
Boron		0.00	0.00
Silica		0.03	10.37
Hydrogen Sulfide		0.00	0.00
Bicarbonate		1.44	259.80
Carbon Dioxide		13.41	13.43
Carbonate		0.00	0.45
TDS, mg/l		149.48	72955.71
Flow	m3/day	4998.68	4622.42
Temperature	C	20.00	20.00
Pressure	bar	0.00	59.80
Osm. Pressure	bar	0.13	54.15
pH		5.24	6.92
Conductivity at 25C	μS/cm	313.00	95942.00
<b>Saturation Data</b>			
BaSO4	%	0.00	0.00
CaF2	%	0.00	0.00
CaSO4	%	0.00	54.24
SiO2	%	0.01	8.13
SrSO4	%	0.00	0.00
Struvite	%	0.00	0.00
LSI		-6.39	-0.06
S&DI		-6.83	-0.58

Imagen 58. Calidad del agua producto final sin tratamientos físico-químicos

### 9.3.3. Recuperación de energía

Es cada vez más común en instalaciones con grandes consumos energéticos el uso de equipos de recuperación de energía, en las que incluso un pequeño porcentaje de ahorro de potencia, corresponden a grandes cantidades de ahorro de inversión.

Las instalaciones de ósmosis inversa tienen grandes consumos, sobre todo en la bomba de alta presión. Es por ello que llevan años investigando como reducir este consumo y a la vez aprovechar la presión que se desperdicia en la salmuera.

#### 9.3.3.1. Selección del recuperador de energía

Tras estudiar los últimos y más avanzados recuperadores de energía que hay actualmente en el mercado en el Anexo I, la decisión adoptada en nuestra instalación es la de usar el intercambiador de presión, por varios motivos:

- Alta eficiencia, de hasta el 98% según el fabricante ERI (*Energy Recovery Inc.*).
- Reducción del caudal que pasa por la bomba de alta presión y por lo tanto, ahorro en consumo eléctrico.
- Los intercambiadores son de pequeñas dimensiones comparados a las turbinas Pelton, por ejemplo.

En la siguiente imagen se muestran los intercambiadores de presión de una planta desaladora de agua en el sur de Tenerife (Islas Canarias).



Imagen 59. Intercambiadores de presión

### 9.3.3.2. Dimensionado del recuperador de energía

Para elegir el intercambiador de presión se usarán dos medios. En primer lugar, nuestro programa informático (*Winflows*) permite calcular el intercambiador necesario, proporcionándonos los rendimientos, consumos y modelo del mismo. Esta es la manera más directa. Por otro lado, también dimensionará el intercambiador por medio de la herramienta informática que cede en la página web la empresa *Energy Recovery Inc.*

Se usará la presión prevista para los 5 años de funcionamiento para sobredimensionar ligeramente el intercambiador. Los datos usados para el cálculo son los siguientes:

<b>PRESIÓN AGUA ALIMENTACIÓN A LA ENTRADA DE LAS MEMBRANAS (bar)</b>	
1 Año	5 Años
62,79	68,01

Tabla 21. Presiones necesarias según los años de funcionamiento

<b>Recobro (%)</b>	<b>Flujo permeado (m3/h)</b>	<b>Presión agua alimentación baja presión (bar)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Presión producto (bar)</b>	<b>Presión concentrado a la entrada del intercambiador (bar)</b>
52	208,33	2,76	20	0	66,9

Tabla 22. Características técnicas para el cálculo del intercambiador de presión

Según el fabricante ERI, se facilitará una serie de modelos de intercambiadores de presión según el documento Excel que proporciona. En este documento se obtendrán los valores más importantes del intercambiador que serán los que determinen cuál elegir. En la siguiente tabla se comparan los que mejor resultados dan.

<b>Modelo</b>	<b>Eficiencia (%)</b>	<b>Consumo específico (kWh/m3)</b>	<b>Unidades</b>
<b>PX-Q300</b>	96,54	2,42	3
<b>PX-Q260</b>	97,25	2,42	4
<b>PX-260</b>	96,87	2,43	4

Tabla 23. Selección del intercambiador de presión Energy Recovery Inc.

Observando las características técnicas de cada uno de ellos, consideramos que la mejor selección es la del modelo PX-Q260, por tener la mayor eficiencia de entre los tres modelos, conllevando una reducción considerable del consumo de la instalación, además de suponer un reducido uso del espacio dado que sólo hay que albergar un pequeño número de unidades. El aspecto del intercambiador es el siguiente:



Imagen 60. PX-Q Series (ERI)

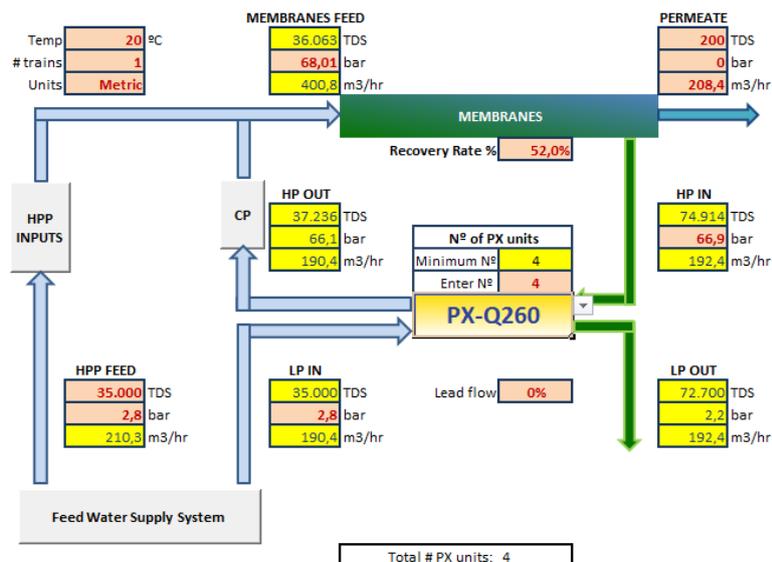


Imagen 61. Excel elección ERI

Por otro lado, el programa *Winflows* especifica, usando los datos de la instalación en cuanto a presiones y caudales, (como con *Energy Recovery*) que el intercambiador tendrá las siguientes características.

Modelo	Eficiencia (%)	Consumo específico (kWh/m3)	Unidades
EX-140S	94,20	2,57	9

Tabla 24. Selección del intercambiador de presión General Electrics

Por lo tanto, se encuentran dos alternativas a la hora de seleccionar el intercambiador de presión. Cada una de un fabricante distinto y con unas características técnicas diferentes.

Modelo	Eficiencia (%)	Consumo específico (kWh/m3)	Unidades
PX-Q260	97,25	2,42	4
EX-140S	94,20	2,57	9

Tabla 25. Comparación de intercambiadores de presión

Nuestra selección final será la de 4 unidades del modelo PX-Q260 del fabricante *Energy Recovery Inc.*, por su alta eficiencia, bajo consumo y poco espacio requerido.

Al instalar el intercambiador de presión los caudales de entrada a la bomba de alta presión serán distintos, quedando ahora de la siguiente manera:

Equipo	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	% del total
Intercambiador de presión	184,04	46
Bomba de alta presión	216,61	54

Tabla 26. Caudales

### 9.3.4. Bomba *Booster*

Son bombas ubicadas tras la salida del agua de alta presión del intercambiador de presión que va directa al agua de alimentación, antes de entrar al módulo de membranas. Tenemos una pequeña introducción a estas bombas en el Anexo I.

#### 9.3.4.1. Dimensionado de bomba *Booster*

Este equipo bombeará un caudal de  $4416,74 \frac{m^3}{día}$ , es decir,  $184,04 \frac{m^3}{h}$ . Y funcionará, el primer año, con una altura de 18,97 m y 19,38 m al quinto año (datos obtenidos del programa informático *WINFLOWS*). Para seleccionar la bomba se usará la altura al quinto año y un caudal de  $195 \frac{m^3}{h}$  para sobredimensionarla.

Las características con las que funciona son las que se ven en la tabla siguiente.

ALTURA BOMBA <i>BOOSTER</i> (m)	
1 Año	5 Año
18,97	19,38

Tabla 27. Presiones necesarias según los años de funcionamiento

Pero las características técnicas de funcionamiento de la bomba, que se usará para su dimensionado, son:

BOMBA <i>BOOSTER</i> DE CIRCULACIÓN	
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Altura (m)
195	19,38

Tabla 28. Características técnicas para el dimensionado de la bomba *Booster* de circulación

- KSB



En primer lugar, el fabricante KSB permite elegir la bomba según sus características técnicas por medio del “*KSB EasySelect*”.

La bomba seleccionada es la MCPK150-125-250 CC.

Modelo	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Altura (m)	Rendimiento (%)	Consumo (kW)
MCPK150-125-250 CC	194,95	19,37	78,5	13,45

Tabla 29. Bomba de circulación KSB

- GRUNDFOS



Este segundo fabricante proporciona el programa “GRUNDFOSWebcap”. Con los datos de caudal y altura mencionados antes se obtiene la bomba NB 80-160/152 A-F-A-BAQE.

Modelo	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Altura (m)	Rendimiento (%)	Consumo (kW)
NB 80-160/152 A-F-A-BAQE	196	19,6	75,8	13,8

Tabla 30. Bomba de circulación GrundFos

Finalmente, la bomba de circulación elegida será la proporcionada por el fabricante KSB, la MCPK150-125-250 CC., con un rendimiento del 78,5% y un consumo de 13,45 kW. Al igual que todos los equipos, se tendrá una de repuesto que se instalará en caso de avería. Y que se irá cambiando cada vez que se haga una revisión de la bomba que esté en funcionamiento, para garantizar así el mismo número de horas de ambas.

### 9.3.5. Bomba de alta presión

Estas bombas serán las encargadas de elevar la presión del agua hasta la necesaria para que sea posible realizar el proceso de ósmosis con nuestras membranas. En el Anexo I se especifican los distintos tipos de bombas de alta presión que podemos encontrar.

#### 9.3.5.1. Dimensionado de bomba de alta presión

Para la selección de la bomba se tendrán en cuenta las condiciones de trabajo para luego analizar sus curvas de funcionamiento y de rendimiento. Siendo un requisito indispensable el que el caudal de diseño deba quedar a la derecha del punto de máxima eficiencia. Esto es debido a que el caudal de diseño es el mayor caudal que impulse la bomba teóricamente, pero a la hora de la práctica, este caudal será menor y por lo tanto, más cercano al punto de rendimiento máximo.

Aparte, se busca dimensionar la instalación para intentar la mayor continuidad posible del caudal. Para ello se hará uso de un caudalímetro en el permeado que permitirá el control del caudal de alimentación, cerrando o abriendo una válvula de control que aumentará o disminuirá la presión y con ello se controlarán esas variaciones de caudal.

Nuestra bomba de alta presión operará con un caudal de  $216,61 \frac{m^3}{h}$  y según los cálculos realizados con el programa *Winflows*, la presión de descarga, antes de que el agua entre a las membranas, cambiará según avancen los años, siendo mucho mayor tras el paso del tiempo, debido al ensuciamiento que se produce en las membranas y que hacen que la presión osmótica aumente. En nuestro caso se ha hecho el estudio para el quinto año de funcionamiento, en el cual la presión debe ser de 68,014 bar (694 m). La variación de presiones a lo largo del tiempo se encuentra en la tabla siguiente en la que se puede ver un aumento considerable de la presión necesaria a lo largo de los años.

Que los equipos de la instalación tengan a lo largo de la vida útil una serie de paradas por averías es algo que no se puede evitar, sólo prevenir. Por ello, se llevarán a cabo periódicamente una serie de controles y reparaciones. Pero, además y para evitar que la instalación se pare un tiempo demasiado prolongado, en situaciones en las que las averías sean serias, se tendrá una bomba de las mismas características a la que se seleccione a continuación, de repuesto.

<b>ALTURA BOMBA DE ALTA PRESIÓN (m)</b>	
1 Año	5 Años
641	694

Tabla 31. Presiones necesarias según los años de funcionamiento

Por lo tanto, las características técnicas de funcionamiento de la bomba que se usará para su dimensionamiento son:

<b>BOMBA DE ALTA PRESIÓN</b>	
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Altura (m)
216,61	694

Tabla 32. Características técnicas para el dimensionado de la bomba de alta presión

Para dimensionar nuestra bomba se llevará a cabo el mismo procedimiento que en el de las bombas de captación. Se usarán las herramientas proporcionadas por los fabricantes principales de bombas, en las que se introducirán las características de

nuestras bombas. En este caso se aumentará el caudal de diseño a los  $225 \frac{m^3}{h}$ . Los resultados se describen a continuación.

- KSB



Este primer fabricante, por medio del programa informático “*Easyslect*” proporciona una bomba multietápica: la Multitec RO A 125.

Modelo	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Altura (m)	Rendimiento (%)	Consumo (kW)
<b>Multitec RO A 125</b>	225	694,00	76	575,95

Tabla 33. Bomba de alta presión KSB

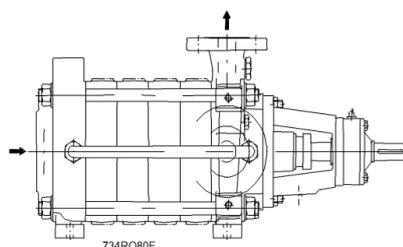


Imagen 62. Esquema bomba alta presión KSB

- Energy Recovery



Este segundo fabricante da bombas mucho más eficientes que el anterior y con un consumo mucho menor. Por medio del *software* que proporciona la página web “*AquaBold Selector*”, la bomba multietápica seleccionada es la AquaBold 4x6x9-B (la nuestra tendrá 15 etapas).

Modelo	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Altura (m)	Rendimiento (%)	Consumo (kW)
<b>AquaBold 4x6x9-B</b>	225	694,00	82,87	527

Tabla 34. Bomba de alta presión Energy Recovery

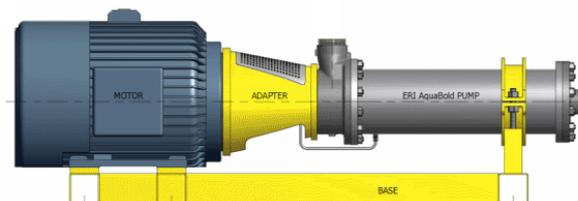


Imagen 63. Bomba alta presión Energy Recovery

Finalmente, tras conocer las opciones que dan dos de los fabricantes más importantes de bombas de alta presión, se elegirá la de *Energy Recovery*, por su alta eficiencia y poco consumo. Como ya se comentó antes, se instalarán dos de estas bombas. Una se usará de repuesto y en el caso de que en un futuro se amplíe la planta, será la bomba que se use para los módulos de desalación nuevos.

### 9.3.6. Salmuera

La salmuera es el caudal de agua rechazado por las membranas, y que contendrá todas las sales del agua de alimentación que hemos eliminado.

Normalmente las plantas que están instaladas cerca de mares con grandes corrientes utilizan tubos sumergidos para la eliminación de la salmuera. Cuando no hay grandes corrientes se usan emisarios submarinos que la dispersan y así se reduce la concentración de los componentes.

Para trasladar el agua hasta el punto más alejado de la tubería se suelen usar bombas de distribución, a no ser que la presión de la salmuera sea suficientemente alta como para no tener que instalar ninguna.

#### 9.3.6.1. Eliminación de la salmuera

En este proyecto se instalará un emisario submarino que lleve nuestra salmuera desde la planta hasta los fondos marinos para evitar, en la medida de lo posible, modificar el medio marino, a pesar de que en el atlántico norte las corrientes son buenas.

Según la imagen siguiente, la distancia entre la planta y un punto alejado del mar es de 2,31 km. Para asegurar los cálculos (debido a la diferencia de cota, a los distintos caminos a tomar por la existencia de carreteras y otros obstáculos), se tomarán 2,5 km de longitud. Además, se tendrá en cuenta, en los cálculos, que se instalarán dos tuberías, para tener una de repuesto, por si acaso una falle.



Imagen 64. Longitud emisario submarino

El siguiente punto será calcular la altura necesaria para la bomba para desplazar el caudal de  $192,4 \frac{m^3}{hora}$  de salmuera. Dichos cálculos los encontramos en el Anexo III.

Gracias al cálculo realizado se ha podido observar que la salmuera sale de la instalación con la suficiente energía como para llegar al final del recorrido sin necesidad de instalar una bomba. Esto supondrá un ahorro considerable a la hora de mantenimiento, de compra de la bomba y de electricidad.

#### 9.4. Sistema de captación

La instalación de desalación comienza en el punto de captación del agua de mar. Esta captación será la encargada de suministrar el caudal de alimentación necesaria para producir el agua producto requerida.

En el Anexo I se explican los distintos tipos de sistemas de captación que se pueden encontrar.

##### 9.4.1. Características de la zona de captación

Como ya se ha comentado anteriormente, la planta de desalación se instalará en una zona industrial con gran cercanía al mar y a unos kilómetros del puerto de Huelva. Es por ello que a la hora de la elección del tipo captación se debe tener en cuenta estas premisas:

- Zona industrial

Por el hecho de estar en esta zona industrial se pueden encontrar con posibles alteraciones de las temperaturas debido al uso del agua para la refrigeración de procesos en el polígono industrial. Y en algunos casos, alteración de la salinidad.

- Cercanía a zona de actividad portuaria

El gran puerto de Huelva aglutina una importante industria petro-química: gas, petróleo, fertilizantes, fundición de cobre, etc. La cercanía a esta entidad portuaria hace que el agua de mar de la zona elegida se vea afectada por contaminantes como los antes nombrados, más los aceites y los combustibles de los barcos, que modificarán la composición del agua y por lo tanto, encarecerá los pretratamientos químicos que se le realizarán en la instalación.

#### 9.4.2. Elección del sistema de captación

Tras haber estudiado las ventajas e inconvenientes de cada tipo de captación de agua, queda claro que la mejor es la toma de agua cerrada, siempre y cuando las condiciones de permeabilidad del terreno lo permitan. Es por ello que antes de elegir dicha toma, se estudiará el terreno.

En primer lugar y haciendo uso del WMS (*Web Map Service*) de las propiedades físicas del suelo en el marco de estudio de la Biomasa Forestal de Andalucía. Se determinará la composición del terreno donde se construirá la instalación y por lo tanto, donde se encontrarán los pozos de captación.



Imagen 65. WMS Propiedades físicas del suelo

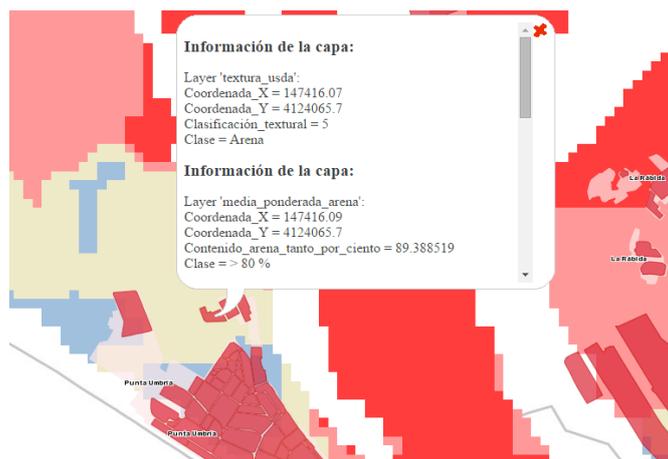


Imagen 66. WMS Propiedades físicas del suelo

Los datos obtenidos gracias a este servicio son los siguientes:

Composición	%
Arena	89,39
Limo	2,26
Arcilla	8,35
Tierra fina	99,97

Tabla 35. WMS Propiedades físicas del suelo

Como se puede observar, el suelo en la zona donde se encontrará la planta desaladora está compuesto por arena, limo y arcilla. Siendo los tres componentes tierra fina. Ahora lo que interesa es saber si este terreno tiene la suficiente permeabilidad como para dejar pasar el agua que abastecerá los pozos subterráneos. Para ello se usará la siguiente tabla obtenida de un estudio de Geología y Geotecnia, de Angelone, Garibay y Casaux (2006).

Drenaje	Valores de k en cm/seg			
	100	10	1	10 <sup>-1</sup>
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava	Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada	Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición
			Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición. <sup>4</sup>	
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.			
Determinación indirecta de k	Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados		Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.	Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.			Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia

Tabla 36. Valores de permeabilidad en distintos suelos

Según la tabla anterior, para arenas muy finas y mezclas de arena, limo y arcilla, que es donde se encontrará nuestro suelo, se puede considerar desde bueno hasta prácticamente impermeable. Es decir, que tenemos una gran incertidumbre con respecto a la capacidad de nuestro suelo de permitir el paso del agua.

Para más inri, en el anterior servicio web (WMS) de las propiedades físicas del suelo, se especifica que los porcentajes de limo, arcilla y arena son para una profundidad de 100 cm. Esto significa que a mayor profundidad cabe la posibilidad de encontrar roca, implicando ello a que el terreno tenga una permeabilidad casi nula o que sea prácticamente impermeable.

A la hora de la verdad, deberíamos realizar unos estudios geotécnicos de la zona en la que se implantarán los pozos y de algunos puntos entre dichos pozos y el mar. Pero como ya se comentó en el alcance del trabajo, no se llegará a ese nivel de profundidad en este proyecto.

Hasta ahora hemos visto que la mejor manera de captación de agua de mar es la toma en pozo. Nuestro terreno es una mezcla de arcilla, limo y arena y en algunas zonas roca casi impermeable. A falta de los necesarios estudios geotécnicos, vamos a utilizar sondeos verticales, que como comentamos anteriormente, sirve para terrenos con permeabilidad reducida, perforando en el terreno hasta llegar a zonas más permeables que permitan aumentar el caudal del pozo.

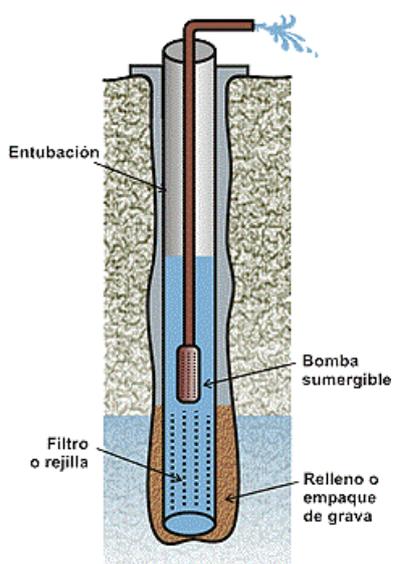


Imagen 67. Captación por sondeos verticales

### 9.4.2.1. Elección y dimensionado del pozo

Para el dimensionado del pozo debemos tener en cuenta que a lo largo de los años se tendrá una pérdida de caudal como ya se comentó anteriormente. Y que se elegirá más de un pozo para evitar que la instalación se pare en caso de que una de las bombas tenga una avería haciendo así que la instalación no dependa de una única bomba. Por ello se elegirán 3 pozos de captación, 2 que funcionarán continuamente y 1 que estará de repuesto para entrar en juego en el caso de que alguna bomba se averíe o que suceda algún tipo de problema, desprendimiento o cualquier otra causa que haga que se deba parar de sacar agua del pozo. Cada uno con una bomba vertical sumergida.

En nuestra instalación la tercera bomba no solo entrará en juego en averías sino que se pondrá en funcionamiento cada vez que alguna de las otras bombas necesite mantenimiento. Permitiendo así que las tres bombas lleguen a tener la misma cantidad de horas de funcionamiento al cabo de los años.

A continuación se procederá a realizar el cálculo del diámetro y profundidad de dichos pozos.

En primer lugar, mirando en la conversión elegida en el núcleo de desalación, conocemos que para producir un total de  $5000 \frac{m^3}{día}$ , se requiere captar  $9615,38 \frac{m^3}{día}$ . Esto implica que cada bomba de captación debe impulsar:

$$\frac{9615,38}{2} = 4807,69 \frac{m^3}{día} \text{ Por bomba}$$

$$4807,69 \frac{m^3}{día} * \frac{día}{24 h} = 200,32 \frac{m^3}{h}$$

Cada bomba debe impulsar  $200,32 \frac{m^3}{h}$ . Ahora necesitamos conocer que capacidad de captación tiene cada uno de nuestros pozos. Para ello se hará uso del documento de abastecimiento de aguas de Francisco Javier Pérez de la Cruz de la Universidad Politécnica de Cartagena. En el cual encontramos la siguiente información:

Capacidad de captación de un pozo:

$$Q = \mu \cdot S \cdot \varphi \cdot V$$

$Q$  = caudal afluyente al pozo ( $\frac{m^3}{s}$ )

$S$  = superficie geométrica de fluencia al pozo ( $m^2$ )

$V$  = velocidad de Thiem ( $\frac{m}{s}$ )

$\mathcal{Q} = 0,5$  coeficiente reductor de la velocidad de Thiem

$\mu = 0,3$  en terreno con materiales gruesos y finos

Siendo la velocidad de Thiem un factor variante según el diámetro del grano del material que rodea nuestro pozo. Que para este estudio se supondrá arena fina. Según la siguiente tabla, el diámetro está comprendido entre 0,25 y 0,125 mm.

Diametro			Sedimento		Roca
mm	micras	$\Phi$			
4.096		-12	GRAVA	BLOQUES	CONGLOMERADOS
256		-8			
64		-6			
4		-2		CANTOS	
2		-1	Arena muy gruesa		
1		0	Arena gruesa		
0,5	500	1	Arena media		
0,25	250	2	Arena fina		
0,125	125	3	Arena muy fina		
0,062	62	4	LUTITAS	Limo grueso	LIMOLITAS
0,031	31	5		Limo medio	
0,016	16	6		Limo fino	
0,008	8	7		Limo muy fino	
0,004	4	8		Arcilla	
				ARCILLITAS	

Tabla 37. Diámetro de grano

Nuestro tamaño de grano será de 0,25 mm. Por lo que nuestra velocidad de Thiem será:

Diámetro (mm)	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
Velocidad (m/s)	0.04	0.07	0.09	0.11	0.13	0.15	0.16	0.18

Tabla 38. Velocidad de Thiem

Por último, el caudal que necesita cada bomba es de  $200,32 \frac{m^3}{h}$ , pero como no se quiere llegar al punto en el que quede el pozo vacío (ya que la bomba siempre debe estar dentro del agua), se requerirán  $300 \frac{m^3}{h}$  ( $0,083 \frac{m^3}{s}$ ) por pozo. Con todos los datos y la ecuación de la capacidad de captación del pozo obtenemos la superficie.

$$Q = \mu * S * \mathcal{Q} * V$$

$$0,083 = 0,3 * S * 0,5 * 0,04$$

$$S = 13,83 \text{ m}^2$$

Para satisfacer que el pozo capte  $300 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  necesitamos que tenga un área por debajo del nivel del mar de  $13,83 \text{ m}^2$ . El siguiente paso una vez obtenida dicha área, será la determinación de la cota del agua. Este dato junto con la cota del suelo donde se instalará el pozo, permitirá conocer la profundidad que debe tener el pozo para llegar a esa cota del agua. Una vez conseguido lo anterior se procederá a seleccionar la mejor dimensión del pozo, variando profundidades que darán distintos diámetros del pozo.

Los pozos en general suelen variar su diámetro entre los 450-800mm. Y su profundidad dependerá del área necesaria. Para nuestra instalación al no tener cántara, no debemos tener cuidado con esta profundidad, ya que cuando el nivel de bajamar bajo la línea del terreno es mayor de 8 metros, el uso de cántara puede ser complicado y muy caro, como ya comentamos en la explicación anterior de las distintas maneras de captación de agua de mar. En este caso, se usarán pozos de pequeñas dimensiones, separados entre sí y provistos de bombas sumergibles.



Imagen 68. Altura terreno

El mapa de la imagen anterior representa las elevaciones del terreno de Andalucía a partir de un modelo digital del terreno. Cada punto del modelo proporciona el valor de la altitud a nivel de suelo a partir de valores de 0 metros, valor mínimo correspondiente a la cota del mar, hasta un valor máximo correspondiente a la altitud máxima del terreno de Andalucía. La cota de nuestro terreno es de 2,62 m.

La cota que debe marcar el nivel inferior de la captación viene determinada por la bajamar viva equinoccial, que sólo se produce unos días del año. Aparte, también hay que cuidar que existirá un desfase de cotas producido por la permeabilidad del terreno.

Según el documento del Mareográfico de Huelva y tras la corroboración con el derrotero de las costas de España y Portugal, Riudavets y Tudury (1867), la cota de marea de bajamar mínima viva equinoccial en Punta Umbría es de 2,80 metros.

Conocida la cota del terreno y la cota mínima del nivel del mar, podemos calcular que profundidad mínima debe tener nuestro pozo. Para no crear confusión, la siguiente imagen explicará la situación perfectamente:

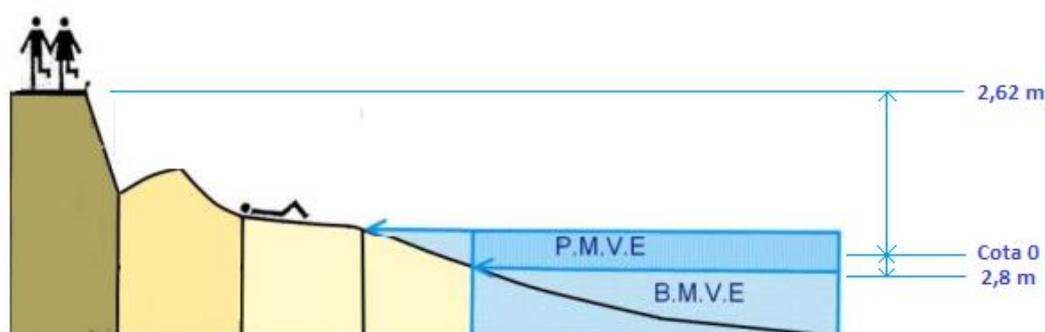


Imagen 69. Altura terreno

Por lo tanto el pozo tendrá una profundidad mínima de 5,42 m, aproximando, 5,5 m. Ahora que es conocida la profundidad mínima, se calculará la profundidad necesaria a partir de esos 5,5 m para que el pozo capte los  $300 \frac{m^3}{h}$ . Para ello se usará el área antes calculada. Se variará la profundidad del pozo para obtener distintos diámetros. Los cálculos quedan resumidos en la siguiente tabla:

Datos:

- Sección (área) =  $13,83 m^2$
- Pozo circular
- Profundidad = Profundidad a partir de los 5,5 metros a nivel de tierra

Profundidad (m)	Radio (m)	Diámetro (m)	Profundidad total (m)
1	2,20	4,40	6,5
1,5	1,47	2,93	7
2	1,10	2,20	7,5
2,5	0,88	1,76	8
3	0,73	1,47	8,5
3,5	0,63	1,26	9
4	0,55	1,10	9,5
4,5	0,49	0,98	10
5	0,44	0,88	10,5
5,5	0,40	0,80	11
6	0,37	0,73	11,5
6,5	0,34	0,68	12
7	0,31	0,63	12,5
7,5	0,29	0,59	13
8	0,28	0,55	13,5
8,5	0,26	0,52	14
9	0,24	0,49	14,5

Tabla 39. Dimensiones del pozo

Como podemos observar, algunos de los resultados de los diámetros son excesivamente grandes, por lo que se limitará a coger los diámetros entre los límites establecidos anteriormente entre 450-800 mm. Para este caso se seleccionará un pozo con una profundidad total de 14,5 (5,5+9) metros y se aproximará el diámetro de 0,49 a 0,50 metros. Aumentando así el área de contacto. Pero como comentamos anteriormente puede existir un desfase de cotas producido por la permeabilidad del terreno, por ello se añadirá 0,5 m a nuestro pozo quedando las dimensiones finales en:

Profundidad (m)	Diámetro (m)	Profundidad total (m)
14,5+0,5	0,50	15

Tabla 40. Dimensiones finales del pozo

Los dos pozos se recubrirán interiormente por una tubería plástica de PVC para evitar posibles derrumbamientos del terreno. Para permitir el paso del agua dicha tubería estará provista de unos orificios en la zona inferior que será la que esté en contacto a la “zona húmeda”, aparte servirá a modo de rejilla.

### 9.4.3. Bombas de captación

En este apartado se realizará la selección y dimensionado de la bomba de captación. Previamente se ha seleccionado la bomba de captación sumergible. Para ver los distintos tipos de bombas de captación se debe acudir al Anexo I.

### 9.4.3.1. Elección y dimensionado de la bomba de captación

Para el dimensionado de las bombas de captación sumergibles se necesitará definir las condiciones de trabajo a las que se debe adaptar y con estos datos obtener la bomba que mejor relación rendimiento-consumo ofrezca. La bomba necesitará cumplir los siguientes requisitos.

La presión a la entrada del núcleo de desalación se especifica en el programa que debe ser 2,76bar.



Imagen 70. Presión entrada núcleo desalación

Según la presión necesaria que debe tener a la entrada del núcleo y los cálculos abordados en el Anexo III. Según las pérdidas, y las condiciones de trabajo, la altura de la bomba debe ser de:

$$H_{bomba} = 51,56 \text{ m}$$

Por último el caudal necesario por bomba, como ya se ha dicho debe de ser de  $200,32 \frac{m^3}{h}$ .

Para la selección de la bomba, se estudiarán dos distintos fabricantes. Cada uno de ellos facilita una herramienta *online* y gratuita en la que, usando las condiciones de trabajo y el uso, se obtiene una selección de bombas que permite elegir la más adecuada.

- KSB



Este primer fabricante proporciona el programa “KSB*Easysselect*”. Con él se seleccionará “bombas de pozo” como aplicación, 20°C como temperatura de trabajo y con los datos de caudal y altura mencionados antes, se obtendrá la bomba sumergible de la familia UPA.

Dentro de las posibilidades que ofrece KSB se ha seleccionado aquella bomba con mayor rendimiento. Siendo la elegida la bomba UPA 300-65/2a. Sus características son las siguientes:

Modelo	Eficiencia (%)	Potencia (kW)
UPA 300-65/2 <sup>a</sup>	77,9	37,28

Tabla 41. Bomba GRUNDFOS

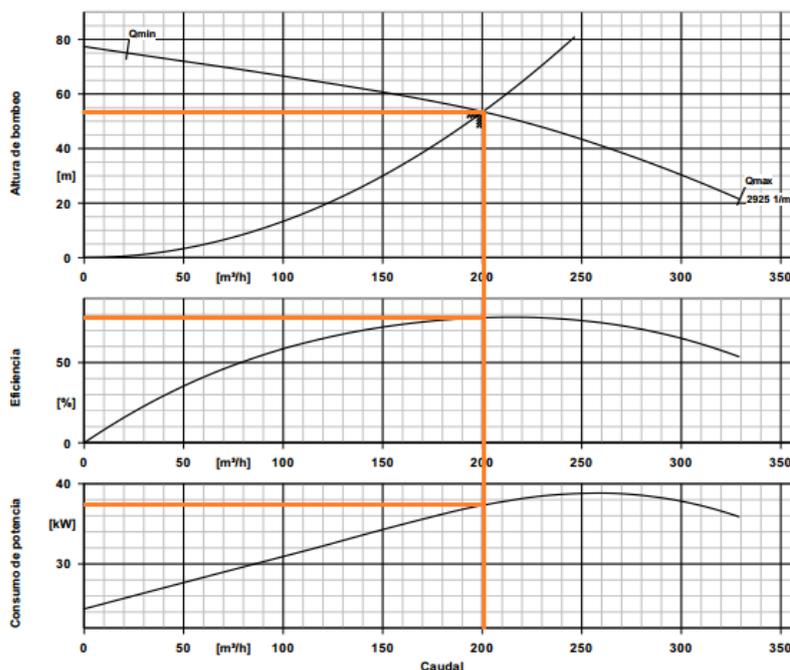


Imagen 71. Curvas bomba GRUNDFOS

- GRUNDFOS



Este segundo fabricante proporciona el programa “GRUNDFOSWebcap”. Con él se seleccionará “bombas de pozo” como aplicación, 20°C como temperatura de trabajo y con los datos de caudal y altura mencionados antes se selecciona la bomba sumergible SP 215-2.

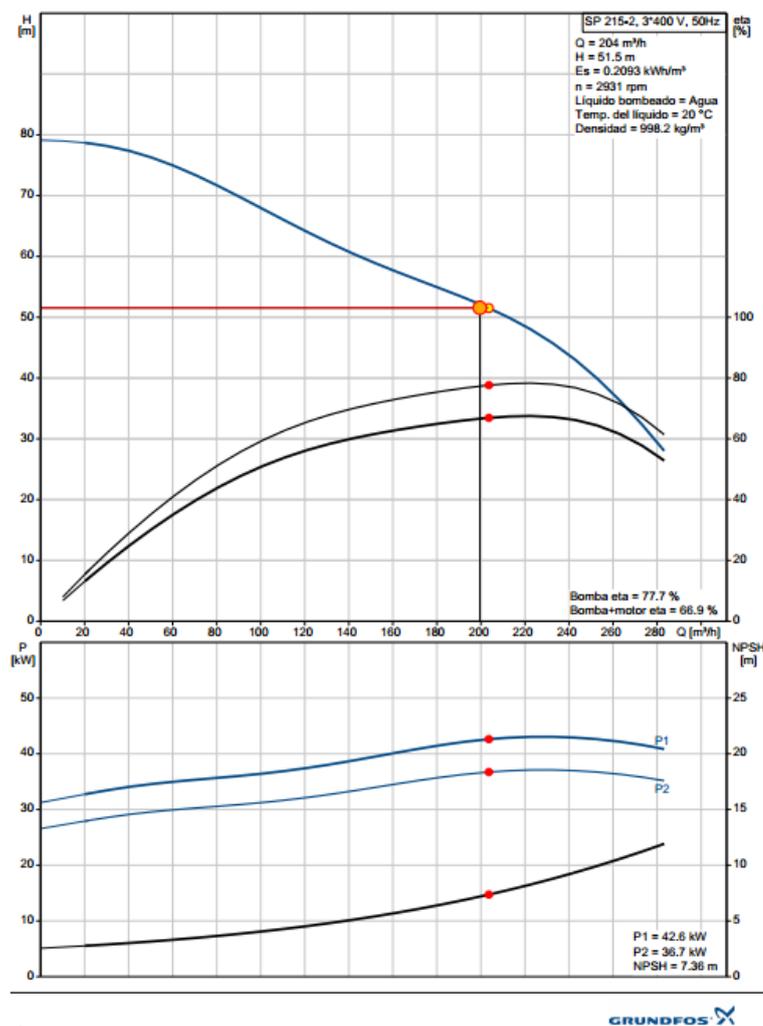


Imagen 72. Curvas bomba GRUNDFOS

Bomba	Rendimiento (%)	Potencia (kW)
SP 215-2	66,9	42,6

Tabla 42. Características bomba GRUNDFOS

Bomba	Consumo específico (kWh/m3)
SP 215-2	0,2096

Tabla 43. Características energéticas-económicas bomba GRUNDFOS

Finalmente la bomba elegida será la UPA 300-65/2a del fabricante KSB, por su alta eficiencia y su reducido consumo.

## 9.5. Post-tratamientos

Estos son los tratamientos químicos que se realizan al agua a la salida de los bastidores de ósmosis. Los más usados se explican en el Anexo I de este proyecto.

### 9.5.1. Post-tratamiento usado

En nuestra planta sólo se usará un post-tratamiento, en él se ajustará el pH hasta un valor que esté dentro del rango adecuado para el consumo de agua agrícola. En un principio tenemos que el agua producto sale con un pH de 5,3. Y viendo las características que debe tener el agua producto en los apartados iniciales, el pH debe estar entre el rango de 6-8,5. Por lo tanto, debemos neutralizar la acidez del agua. El pH final será 7.

Nuestro post-tratamiento será el de la dosificación de “Lime” o Cal. La adición de cal permite ajustar el pH y remineralizar el agua por el aporte de Calcio. Este post-tratamiento es muy usado en plantas de desalinización por aportar ese compuesto básico, el calcio.

Las cantidades dosificadas se especifican en el programa informático *Winflows* y se describen en la siguiente tabla e imagen:

Post-tratamiento químico	Cantidad (ppm)
Cal Ca(OH) <sub>2</sub> (ajuste pH)	9,25

Tabla 44. Post-tratamiento químico

Chemical = Ca(OH)<sub>2</sub>. Dosage = 9,25 ppm

Imagen 73. Imagen dosado del pretratamiento químico en el programa Winflows

## 9.6. Sistema de distribución

### 9.6.1. Depósito de almacenamiento

El agua producto de nuestra instalación será conducida hacia un depósito de almacenamiento, lo más cercano posible a las zonas de riego donde será usada. El depósito estará diseñado con una capacidad de almacenamiento ligeramente mayor a la producción diaria de la planta. Esto permitirá continuar con la ampliación futura de la planta en un futuro y facilitarnos el funcionamiento de la misma en días en las que la demanda sea menor que la oferta.

En un principio, la planta comenzará el llenado del depósito antes de permitir a los agricultores consumir de esta agua. Una vez el depósito esté al 70% aproximadamente se procederá a su distribución para su consumo.

La planta suministrará, como hemos dicho al comienzo,  $5000 \frac{m^3}{\text{día}}$  ( $1,825 \frac{hm^3}{\text{año}}$ ). Y la demanda total de la zona principal a la que va dirigida el agua es de  $36,65 \frac{hm^3}{\text{año}}$ . (Datos de la demanda futura, tal y como se estudió en los capítulos iniciales). Es una demanda bastante grande en comparación con nuestra planta. Por lo tanto nuestro depósito no se diseñará pensando en albergar dicho volumen sino el producido por la planta.

El depósito tendrá un poco más de capacidad que la producción diaria de la planta, para el estudio se estimarán  $7000 m^3$ . Tras haber realizado una serie de cálculos sencillos, las dimensiones del depósito serán de  $35 \times 35 \times 6$  (lado x lado x alto, unidades en metros). El volumen total del depósito con estas dimensiones será de  $7350 m^3$ .

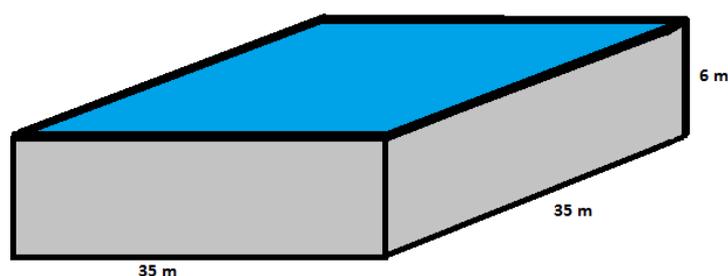


Imagen 74. Esquema depósito

### 9.6.2. Localización del depósito de almacenamiento

El depósito se intentará localizar en un punto cercano al lugar de consumo. En la imagen vemos las zonas de demanda agraria de la demarcación hidrográfica del Tinto-Odiel-Piedras, concretamente la zona de explotación de Andévalo-Chanza-Piedras, que ya se expuso en apartados anteriores. El depósito, por lo tanto, se situará en La Rábida, es decir, al oeste y muy cerca del Parque Nacional de Doñana, al cual se dirige este proyecto.



Imagen 75. Zona hidrográfica

Las siguientes imágenes describen las canalizaciones desde la instalación de desalación hasta el depósito. Estas tienen una longitud total de 25,69 km.

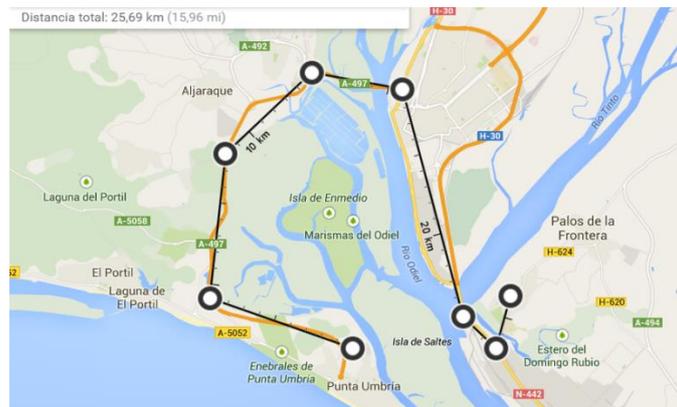


Imagen 76. Localización del depósito

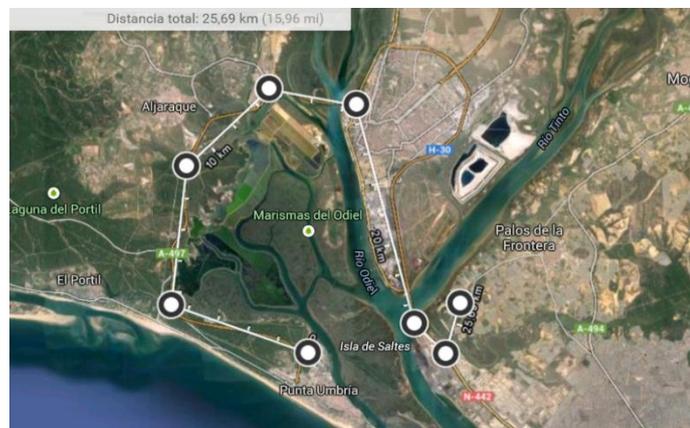


Imagen 77. Localización del depósito



Imagen 78. Parcela donde se instalará el depósito

### 9.6.3. Bomba de distribución

En cualquier instalación se tienen en cuenta una serie de requisitos de diseño como el bajo consumo, su sostenibilidad y entre otros aspectos, en instalaciones de desalación de agua, la producción ininterrumpida. Para intentar que la producción de nuestra planta se vea afectada lo menos posible ante cualquier tipo de errores o averías hemos instalado bombas de repuesto.

En el sistema de distribución pasa lo mismo. Para ello se instalarán dos bombas y una de repuesto, cada una de las dos bombas principales se encargará de una tubería de las dos que se tendrán para llevar el agua producto hasta el depósito. Esto permitirá que en el caso en el que una bomba se averíe, la de repuesto entre en juego rápidamente. Y en el caso de que haya algún tipo de problema con respecto a alguna tubería siempre estará la otra en funcionamiento abasteciendo la mitad de la producción total.

### 9.6.4. Dimensionado de la bomba de distribución

Cada equipo bombeará un caudal de  $2500 \frac{m^3}{día}$ , es decir,  $104,17 \frac{m^3}{h}$ . Y la altura que debe bombear se ha calculado en el Anexo y es de 34 m por bomba. Para sobredimensionarla se usará un caudal de  $110 \frac{m^3}{h}$ .

Las características técnicas de funcionamiento de nuestra bomba que se usarán para su dimensionamiento entonces son:

<b>BOMBA BOOSTER DE CIRCULACIÓN</b>	
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Altura (m)
110	34

Tabla 45. Características técnicas para el dimensionado de la bomba de distribución

- KSB



En primer lugar, el fabricante KSB que permite elegir la bomba según sus características técnicas por medio del “KSB EasySelect”.

La bomba que proporciona es una centrífuga de baja presión, la que mejores prestaciones da es la bomba centrífuga ETANORM para bajas presiones ETN 080-065-160 GG.

Modelo	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Altura (m)	Rendimiento (%)	Consumo (kW)
ETN 080-065-160 GG	110,09	34,05	82,6	12,34

Tabla 46. Bomba de distribución KSB

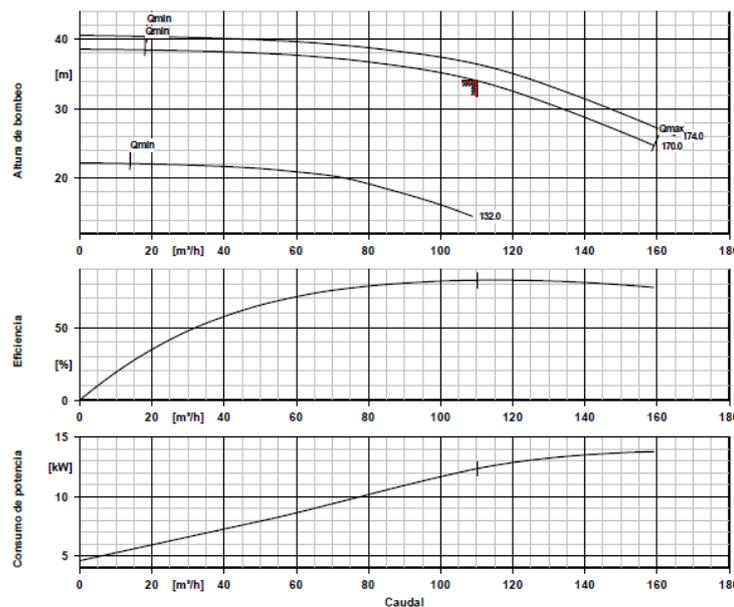


Imagen 79. Curvas bomba de distribución KSB

- GRUNDFOS



Este segundo fabricante proporciona el programa “GRUNDFOSWebcap”. Con los datos de caudal y altura mencionados antes, GRUNDFOS recomienda la bomba Hydro MPC.E 5 CRIE15-3.

Modelo	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Altura (m)	Rendimiento (%)	Consumo (kW)
<b>Hydro MPC.E 5 CRIE15-3</b>	110	34	55,7	18,2

Tabla 47. Bomba de distribución GrundFos

Finalmente, la bomba de distribución elegida será la proporcionada por el fabricante KSB, la bomba centrífuga ETANORM para bajas presiones ETN 080-065-160 GG. Presenta un rendimiento del 82,6% y un consumo de 12,34 kW.

### 9.7. Consumo específico de la planta

Tras la selección de todos los elementos que componen a la planta de desalación se ha realizado una tabla en la que se recogen los resultados de los consumos de cada elemento y otra en la que se recogen los consumos específicos de cada punto de la instalación. Esto junto a la cantidad de agua producto permitirá conocer el consumo total de potencia de la planta.

Elemento	Consumo (kW)	Número de elementos	Caudal por elemento (m <sup>3</sup> /h)
<b>Bomba captación</b>	37,28	2	200,32
<b>Bomba alta presión</b>	527	1	225
<b>Bomba Booster</b>	13,45	1	194,95
<b>Bomba distribución</b>	12,34	2	110

Tabla 48. Datos de las bombas del sistema para el cálculo del consumo específico

Punto de la instalación	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )
<b>Captación</b>	0,3722
<b>Nucleo de desalación</b>	2,4200
<b>Distribución</b>	0,2244
<b>TOTAL</b>	3,0170

Tabla 49. Consumo específico

Nuestra planta tendrá un consumo específico de  $3,017 \frac{kWh}{m^3}$  y por lo tanto, para producir  $5000 \frac{m^3}{día}$  ( $208,33 \frac{m^3}{h}$ ) consumirá una potencia de:

$$Potencia(kW) = CE \left( \frac{kWh}{m^3} \right) * Producto \left( \frac{m^3}{h} \right)$$

$$Potencia(kW) = 3,017 * 208,33 = 628,44 kW$$

Potencia consumida en la planta de desalación = 628,44 kW

Que anualmente se transforma en:

$$628,44 \text{ kW} * 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} * 24 \frac{\text{horas}}{\text{día}} = 5505134,4 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$
$$5505,13 \frac{\text{MWh}}{\text{año}}$$

## 9.8. Energía eólica

En este apartado se abordarán los cálculos realizados para la parte de energía eólica del proyecto para determinar el modelo, las dimensiones, la rentabilidad y el número de los aerogeneradores que se instalarán. El programa utilizado es el Excel.

En el presente proyecto se intenta implantar una serie de aerogeneradores para producir la suficiente energía como para alimentar la demanda de una planta de desalación. Los cálculos se realizarán a mano y haciendo uso de los datos recopilados por el atlas eólico del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía).

En un principio, los cálculos se realizarán para un único aerogenerador, para finalizar probando con más de uno para conocer la mejor elección a largo plazo.

### 9.8.1. Cálculo del recurso eólico

Para realizar el cálculo de la potencia que generará cada máquina, necesitamos en primer lugar, conocer el recurso eólico. Este permitirá conocer la dirección mayoritaria del viento, la velocidad media y lo más importante, la cantidad de horas al año que el viento está a cada una de las velocidades.

Para proceder al cálculo de potencia generada por cada aerogenerador necesitamos conocer:

- a) Rosa de los vientos
- b) Distribución *Weibull* de velocidades

Es importante destacar que los datos, que se manejan, son para una altura de 80 metros. Este dato se tendrá en cuenta a la hora de seleccionar el aerogenerador, ya que

para que los resultados finales coincidan con los requerimientos de la mayor manera posible, la altura debe ser de 80 metros aproximadamente.

### 9.8.1.1. Rosa de los vientos

En primer lugar, se calculará la rosa de los vientos (de frecuencia y de velocidad de viento) para ello se obtendrán los datos del Atlas Eólico de España del IDEA, en el punto donde trabajarán los aerogeneradores.

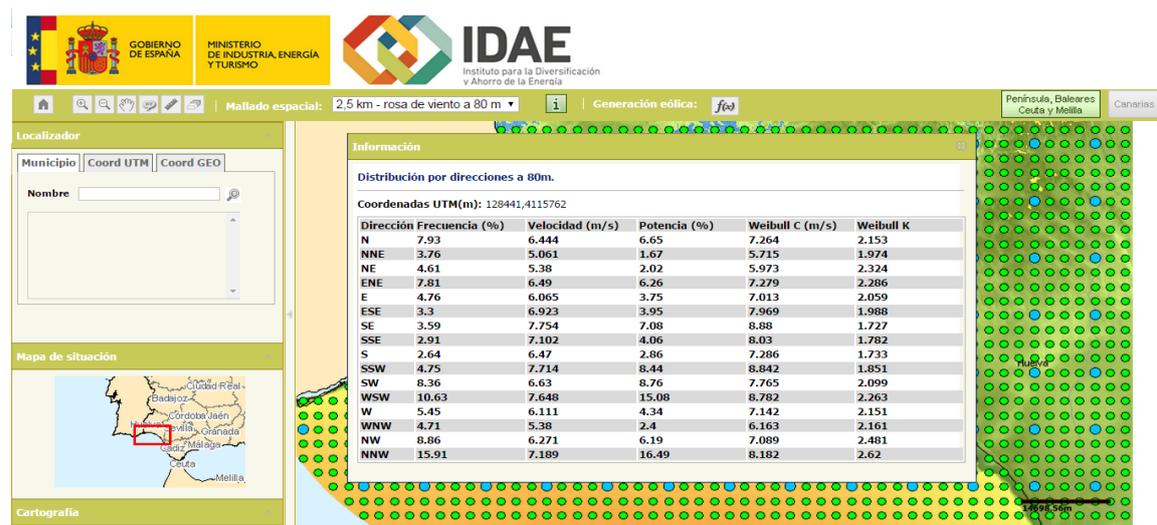
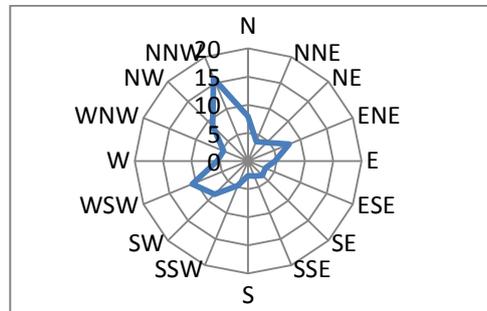


Imagen 80. Datos en relación de la dirección del viento en el punto de instalación

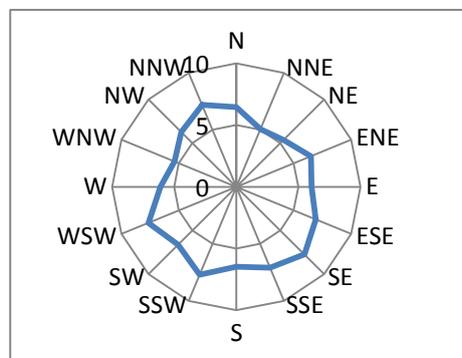
Dirección	Frecuencia (%)	Velocidad (m/s)	Potencia (%)	Weibull C (m/s)	Weibull K
N	7,93	6,444	6,65	7,264	2,153
NNE	3,76	5,061	1,67	5,715	1,974
NE	4,61	5,38	2,02	5,973	2,324
ENE	7,81	6,49	6,26	7,279	2,286
E	4,76	6,065	3,75	7,013	2,059
ESE	3,3	6,923	3,95	7,969	1,988
SE	3,59	7,754	7,08	8,88	1,727
SSE	2,91	7,102	4,06	8,03	1,782
S	2,64	6,47	2,86	7,286	1,733
SSW	4,75	7,714	8,44	8,842	1,851
SW	8,36	6,63	8,76	7,765	2,099
WSW	10,63	7,648	15,08	8,782	2,263
W	5,45	6,111	4,34	7,142	2,151
WNW	4,71	5,38	2,4	6,163	2,161
NW	8,86	6,271	6,19	7,089	2,481
NNW	15,91	7,189	16,49	8,182	2,62

Tabla 50. Datos en relación de la dirección del viento en el punto de instalación

Con estos datos obtenemos la rosa de los vientos de frecuencias y de velocidades, para conocer cuál será la dirección predominante a lo largo del año y la dirección en la que el viento sopla con mayor intensidad.



Gráfica 1. Rosa de los vientos de frecuencias



Gráfica 2. Rosa de los vientos de velocidades

Como podemos observar, la dirección predominante es la Norte-Noroeste. Y las direcciones donde con mayor intensidad sopla el viento son: sureste, sur-suroeste, oeste-suroeste y norte-noreste.

Cabe destacar que una de las direcciones donde con mayor velocidad sopla el viento también es la dirección predominante a lo largo del año. Esto facilitará el aprovechamiento máximo del aerogenerador que se instalará. Por lo tanto esa será nuestra dirección óptima.

### 9.8.1.2. Distribución Weibull de velocidades

Con los parámetros de la distribución *Weibull* obtenidos en los datos del IDAE podemos calcular la frecuencia de los vientos para cada velocidad. A continuación encontramos la expresión de la distribución *Weibull*.

$$P(v) = \frac{K}{C} \left( \frac{V}{C} \right)^{K-1} \cdot e^{-\left( \frac{V}{C} \right)^K}$$

Aunque para los cálculos se usará la herramienta “Distribución *Weibull*” del Excel. Por lo que no se usará la ecuación anterior en primera persona. “K” corresponde a *Weibull K*, “C” a *Weibull C* y “V” a la velocidad.

En primer lugar necesitamos conocer el valor medio de la velocidad, de *Weibull C* y *Weibull K*. Los resultados son:

	80m.
Velocidad (m/s)	6,65
Weibull C (m/s)	7,59
Weibull K	2,21

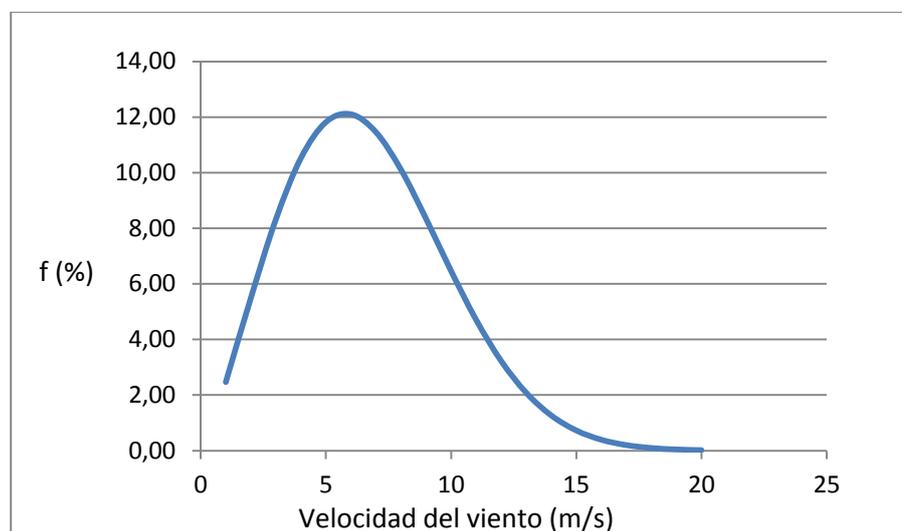
Tabla 51. Datos medios

A partir de estos datos obtenemos la siguiente tabla, en la que se muestra la frecuencia de cada velocidad del viento. Y con ese dato hallamos las horas al año que en ese punto se tendrá dicha velocidad.

80 m.			
Velocidad (m/s)	f (v)	f (v) (%)	Horas/año
1	0,0247	2,47	216,0
2	0,0549	5,49	480,8
3	0,0832	8,32	728,9
4	0,1052	10,52	922,0
5	0,1182	11,82	1035,3
6	0,1210	12,10	1060,3
7	0,1146	11,46	1003,8
8	0,1011	10,11	885,3
9	0,0834	8,34	730,8
10	0,0646	6,46	566,1
11	0,0471	4,71	412,3
12	0,0323	3,23	282,7
13	0,0208	2,08	182,5
14	0,0127	1,27	111,0
15	0,0073	0,73	63,7
16	0,0039	0,39	34,4
17	0,0020	0,20	17,5
18	0,0010	0,10	8,4
19	0,0004	0,04	3,8
20	0,0002	0,02	1,6

Tabla 52. Horas/año

La frecuencia obtenida representa el porcentaje de horas respecto al total de horas al año que tenemos una determinada velocidad. Para obtener las horas/año simplemente hay que hacer un cambio de unidades. Estos datos llevados a una gráfica son más fáciles de entender. La gráfica de distribución de velocidades tiene la siguiente forma:



Gráfica 3. Distribución de velocidades

Como calculamos antes, la velocidad media es 6,65 m/s, queda corroborada.

### 9.8.2. Cálculos para la selección del aerogenerador

En el siguiente apartado se procederá a seleccionar distintos tipos de aerogeneradores del tipo *Offshore* de varios fabricantes, para con ellos obtener la curva de potencia característica de cada máquina y así poder calcular la potencia generada, el factor de carga y seleccionar el mejor aerogenerador para este proyecto.

Los diferentes modelos de aerogeneradores y marcas del catálogo de *Offshore* que se han encontrado son los siguientes:

Fabricante	Modelo	Potencia nominal (MW)
<b>SENVION</b>	152-6.2	6.2
<b>VESTAS</b>	105-3.3	3.3
	112-3.3	3.3
	117-3.3	3.3
	126-3.3	3.3
<b>GAMESA</b>	G128-5.0	5.0
	G132-5.0	5.0
<b>SIEMENS</b>	107-3.6	3.6

Tabla 53. Aerogeneradores

### 9.8.2.1. Producción energética

Mediante las curvas de potencia y la tabla en la que se recogen los datos de las horas al año que tenemos cada velocidad podemos obtener la potencia producida por cada aerogenerador. Las tablas de los cálculos realizados para la obtención de estos resultados se encuentran en el Anexo II.

A continuación se muestra una tabla resumen donde podemos ver la producción de cada aerogenerador según nuestro recurso eólico.

Fabricante	Modelo	Diámetro aspas (m)	Potencia máxima (MW)	Potencia anual (MWh/año)	Potencia anual (kWh/h)
SENVION	152-6,2	152	6,2	18076,6	2063,5373
VESTAS	105-3.3	105	3,3	8761,3	1000,1489
	112-3.3	112	3,3	9507,5	1085,3282
	117-3.3	117	3,3	10032,7	1145,2894
	126-3.3	126	3,3	10911,4	1245,5987
GAMESA	G128-5	128	5	13744,6	1569,0144
	G132-5	132	5	14441,9	1648,6209
SIEMENS	107-3.6	107	3,6	7465,6	852,23246

Tabla 54. Potencias para cada aerogenerador

En un primer momento los aerogeneradores que mayor potencia generan son los GAMESA, el SENVION y los VESTAS grandes. Pero para hacer la selección se mirarán otros aspectos también, que siguen en los siguientes apartados.

### 9.8.2.2. Factor de carga

El factor de carga indica el número de horas a las que el aerogenerador está funcionando a máxima potencia. Esto indicará que aerogenerador está desaprovechado.

$$FC = \frac{\text{Energía Anual}}{\text{Potencia Aero}} (kWh/kW)$$

$$FC(\%) = \frac{FC (kWh/kW)}{8760} \cdot 100$$

Para este proyecto se estimará un mínimo de un factor de carga de 35%. Los resultados son los siguientes:

Fabricante	Modelo	Producción de energía (MWh/año)	Potencia nominal (MW)	FC (kWh/kW)	FC (%)	
SENVION	152-6,2	18076,6	6,2	2915,6	33,3	OTRO
VESTAS	105-3.3	8761,3	3,3	2654,9	30,3	OTRO
	112-3.3	9507,5	3,3	2881,1	32,9	OTRO
	117-3.3	10032,7	3,3	3040,2	34,7	OTRO
	126-3.3	10911,4	3,3	3306,5	37,7	BUENO
GAMESA	G128-5	13744,6	5	2748,9	31,4	OTRO
	G132-5	14441,9	5	2888,4	33,0	OTRO
SIEMENS	107-3.6	7465,6	3,6	2073,8	23,7	OTRO

Tabla 55. Selección del aerogenerador por el factor de carga

Según el cálculo del factor de carga, el único aerogenerador que cumple con los requisitos es el VESTAS 126-3.3MW, que trabajará casi un 38% del tiempo en su máxima potencia.

### 9.8.2.3. Alimentación a la planta de desalación

Conocida que la necesidad energética de la planta de desalación es de 628,44 kW, podemos calcular cuál de los aerogeneradores se aprovecharán mejor, ya que interesa que este produzca una cantidad de energía similar a la requerida.

Fabricante	Modelo	Potencia anual (MWh/año)	Potencia (kWh/h)	Cedido a la planta de desalación (%)	Energía sobrante (MWh/año)	Desalación (kW)
SENVION	152-6,2	18076,6	2063,5373	30,45	12571,45	628,44
VESTAS	105-3.3	8761,3	1000,1489	62,83	3256,17	
	112-3.3	9507,5	1085,3282	57,90	4002,34	
	117-3.3	10032,7	1145,2894	54,87	4527,6	
	126-3.3	10911,4	1245,5987	50,45	5406,31	
GAMESA	G128-5	13744,6	1569,0144	40,05	8239,432	
	G132-5	14441,9	1648,6209	38,12	8936,785	
SIEMENS	107-3.6	7465,6	852,23246	73,74	1960,422	

Tabla 56. Selección del aerogenerador por la energía cedida a la planta de desalación

Tras estudiar la tabla anterior queda claro que el mejor con diferencia sería el aerogenerador SIEMENS y que el peor es el SENVION junto a los GAMESA. Los VESTAS se encuentran dentro del rango aceptable, estando todos por encima del 50% de energía cedida.

#### 9.8.2.4. Rentabilidad

En este último apartado se revisará el aspecto de la rentabilidad de los aerogeneradores. Como todos tienen un porcentaje de energía que es sobrante, esta se aprovechará para algún fin. En un principio se venderá ese excedente de energía para rentabilizar el gasto generado en la compra del aerogenerador. En el apartado 10 de este proyecto se estudia una posible solución alternativa para el aprovechamiento del sobrante de energía tras pasar los años necesarios para alcanzar la rentabilidad.

Antes de empezar se debe buscar el precio de la venta de la energía eólica en España. En el “*Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial*” encontramos que para instalaciones eólicas ubicadas en el mar territorial el precio de venta será de 8,43 c€/kWh, con un límite superior de 16,40 c€/kWh.

Por otro lado, los fabricantes de aerogeneradores no dan facilidades a la hora de especificar los precios de sus máquinas, pero comentan que cada aerogenerador ronda el millón de euros por MW instalado.

Con estos datos podemos empezar los cálculos. En primer lugar conocemos la cantidad de energía sobrante por cada aerogenerador, también el valor que tendría el vender dicha energía y por último conociendo el valor nominal del aerogenerador y que cada MW será 1 millón de euros, obtenemos la siguiente tabla:

Eólica (RD 661/2007)	€/kWh
Prima máxima	0,0843
Límite superior	0,164

Tabla 57. Tasas venta energía eólica

Fabricante	Modelo	Energía sobrante (MWh/año)	Costo por aerogenerador (millón €)	Beneficio energía (MILLONE€/año)	Costo total primer año (MILLONE€/año)	Beneficio total resto años (MILLONE€/año)
SENVION	152-6,2	12571,5	6,2	1,06	5,14	1,06
VESTAS	105-3.3	3256,2	3,3	0,27	3,03	0,27
	112-3.3	4002,3	3,3	0,34	2,96	0,34
	117-3.3	4527,6	3,3	0,38	2,92	0,38
	126-3.3	5406,3	3,3	0,46	2,84	0,46
GAMESA	G128-5	8239,4	5	0,69	4,31	0,69
	G132-5	8936,8	5	0,75	4,25	0,75
SIEMENS	107-3.6	1960,4	3,6	0,17	3,43	0,17

Tabla 58. Tasas costos

Al obtener estos resultados no es difícil calcular el número de años necesarios para empezar a obtener rentabilidad por la venta de la energía sobrante. Para el cálculo se supondrá que el primer año la inversión será igual al precio del aerogenerador y que ésta se irá rentabilizando cada año con la venta de la energía sobrante.

	1 AÑO	2 AÑO	3 AÑO	4 AÑO	5 AÑO	6 AÑO	7 AÑO	8 AÑO	9 AÑO	10 AÑO	11 AÑO	12 AÑO	13 AÑO	14 AÑO	15 AÑO	16 AÑO	17 AÑO	18 AÑO	19 AÑO	20 AÑO
SENVION	5,14	4,08	3,02	1,96	0,90	-0,16	-1,22	-2,28	-3,34	-4,40	-5,46	-6,52	-7,58	-8,64	-9,70	-10,76	-11,82	-12,88	-13,94	-15,00
Vestas	3,03	2,75	2,48	2,20	1,93	1,65	1,38	1,10	0,83	0,56	0,28	0,01	-0,27	-0,54	-0,82	-1,09	-1,37	-1,64	-1,92	-2,19
	2,96	2,63	2,29	1,95	1,61	1,28	0,94	0,60	0,26	-0,07	-0,41	-0,75	-1,09	-1,42	-1,76	-2,10	-2,44	-2,77	-3,11	-3,45
	2,92	2,54	2,15	1,77	1,39	1,01	0,63	0,25	-0,14	-0,52	-0,90	-1,28	-1,66	-2,04	-2,43	-2,81	-3,19	-3,57	-3,95	-4,33
	2,84	2,39	1,93	1,48	1,02	0,57	0,11	-0,35	-0,80	-1,26	-1,71	-2,17	-2,62	-3,08	-3,54	-3,99	-4,45	-4,90	-5,36	-5,82
Gamesa	4,31	3,61	2,92	2,22	1,53	0,83	0,14	-0,56	-1,25	-1,95	-2,64	-3,34	-4,03	-4,72	-5,42	-6,11	-6,81	-7,50	-8,20	-8,89
	4,25	3,49	2,74	1,99	1,23	0,48	-0,27	-1,03	-1,78	-2,53	-3,29	-4,04	-4,79	-5,55	-6,30	-7,05	-7,81	-8,56	-9,31	-10,07
Siemens	3,43	3,27	3,10	2,94	2,77	2,61	2,44	2,28	2,11	1,95	1,78	1,62	1,45	1,29	1,12	0,96	0,79	0,63	0,46	0,29

Imagen 81. Rentabilidad

En la imagen anterior se muestran los años necesarios para obtener rentabilidad de la instalación del aerogenerador. El dinero que se gane a partir del punto en el que se comience a obtener beneficios se puede destinar al pago de la instalación de desalación y de sus aparatos, bombas, etc.

Los aerogeneradores que antes dan beneficios son:

- SENVION 152-6.2: a los 5 años
- GAMESA G132-5.0: a los 6 años
- GAMESA G128-5.0: a los 7 años
- VESTAS 126-3.3: a los 7 años

Pero esta rentabilidad aumentará según el número de aerogeneradores, por ello se ha hecho el estudio para 2 aerogeneradores. Y se ha supuesto que las empresas harían un descuento del 5% por comprar ambos aerogeneradores.

	1 AÑO	2 AÑO	3 AÑO	4 AÑO	5 AÑO	6 AÑO	7 AÑO	8 AÑO	9 AÑO	10 AÑO	11 AÑO	12 AÑO	13 AÑO	14 AÑO	15 AÑO	16 AÑO	17 AÑO	18 AÑO	19 AÑO	20 AÑO
Senvion	9,20	6,61	4,03	1,45	-1,14	-3,72	-6,31	-8,89	-11,47	-14,06	-16,64	-19,22	-21,81	-24,39	-26,97	-29,56	-32,14	-34,73	-37,31	-39,89
Vestas	5,26	4,24	3,23	2,22	1,20	0,19	-0,82	-1,83	-2,85	-3,86	-4,87	-5,89	-6,90	-7,91	-8,93	-9,94	-10,95	-11,97	-12,98	-13,99
	5,13	3,99	2,85	1,71	0,58	-0,56	-1,70	-2,84	-3,98	-5,12	-6,26	-7,40	-8,54	-9,67	-10,81	-11,95	-13,09	-14,23	-15,37	-16,51
	5,04	3,82	2,59	1,36	0,13	-1,09	-2,32	-3,55	-4,78	-6,00	-7,23	-8,46	-9,69	-10,91	-12,14	-13,37	-14,60	-15,82	-17,05	-18,28
	4,89	3,52	2,14	0,77	-0,61	-1,98	-3,36	-4,73	-6,11	-7,49	-8,86	-10,24	-11,61	-12,99	-14,36	-15,74	-17,11	-18,49	-19,87	-21,24
Gamesa	7,65	5,79	3,94	2,09	0,23	-1,62	-3,47	-5,33	-7,18	-9,03	-10,89	-12,74	-14,59	-16,45	-18,30	-20,15	-22,01	-23,86	-25,71	-27,57
	7,53	5,56	3,59	1,62	-0,35	-2,32	-4,30	-6,27	-8,24	-10,21	-12,18	-14,15	-16,12	-18,09	-20,06	-22,03	-24,00	-25,97	-27,95	-29,92
Siemens	6,05	5,25	4,46	3,66	2,87	2,07	1,28	0,48	-0,31	-1,11	-1,90	-2,70	-3,49	-4,28	-5,08	-5,87	-6,67	-7,46	-8,26	-9,05

### Imagen 82. Rentabilidad con 2 aerogeneradores

Al aumentar el número de aerogeneradores se ha aumentado la energía vendida, por ello la rentabilidad será mayor. Para este caso los mejores aerogeneradores son:

- SENVION 152-6.2: a los 4 años
- VESTAS 126-3.3: a los 4 años
- GAMESA G132-5.0: a los 4 años

Se ha realizado el mismo estudio para 3 aerogeneradores, pero los resultados han sido iguales a los 4 años para los anteriores modelos. Por lo tanto, habría que hacer el estudio para 4 aerogeneradores pero ya se acercaría más a ser un parque eólico y no es el objeto de este proyecto. Por ello se limitará a la estimación original de los 2 aerogeneradores.

### 9.8.3. Elección del aerogenerador

Gracias a los cálculos del apartado anterior se podrá hacer la elección más adecuada para el proyecto. En primer lugar se hará una tabla comparativa de datos para ver de una forma más sencilla los resultados anteriores. De verde están marcadas las mejores estimaciones de cada cálculo.

Fabricante	MODELO	POTENCIA ANUAL (MW/año)	FACTOR DE CARGA (%)	ENERGÍA CEDIDA A LA PLANTA (%)	RENT. (1 aero.) (AÑOS)	RENT. (2 aero.) (AÑOS)
<b>SENVIO N</b>	152-6.2	18076,6	no cumple (33,3)	30,45	5	4
<b>VESTAS</b>	105-3.3	8761,3	no cumple (30,3)	62,83	12	6
	112-3.3	9507,5	no cumple (32,9)	57,90	9	5
	117-3.3	10032,7	no cumple (34,7)	54,87	8	5
	126-3.3	10911,4	<b>37,7</b>	50,45	7	4
<b>GAMESA</b>	G128-5.0	13744,6	no cumple (31,4)	40,05	7	5
	G132-5.0	14441,9	no cumple (33,0)	38,12	6	4
<b>SIEMENS</b>	107-3.6	7465,6	no cumple (23,7)	73,74	21	8

Tabla 59. Selección de aerogenerador

Cabe destacar que el porcentaje de energía cedida a la planta será mucho menor cuando se instalan 2 aerogeneradores pero se utilizará el porcentaje de uno para su elección.

Estudiando los resultados anteriores, queda claro que el aerogenerador seleccionado es el VESTAS 126-3.3, por cumplir todos los requisitos, ceder más de la mitad de la energía que produce a la planta, estar casi el 38% del tiempo funcionando a su máxima capacidad, haciendo que se aproveche mucho más la máquina, y por tener una alta rentabilidad a los pocos años.

Cabe destacar que a la hora de la verdad se debería tener en cuenta en el cálculo las pérdidas de energía, fallos, etc. Por lo tanto por seguridad se esperaría un 95% de la potencia total obtenida. Pero para este proyecto no se tendrá en cuenta ya que si existiera el fallo de alguna de las máquinas siempre se tendrá a la otra, que tiene capacidad sobrante como para alimentar a la planta en su totalidad.

En definitiva, para nuestro proyecto se instalarán dos aerogeneradores *Offshore* del fabricante VESTAS y modelo 126-3.3 de 3.3 MW.

## 10. Alternativas para el aprovechamiento de la instalación eólica

En este apartado se llevará a cabo un pequeño estudio sobre cuál puede ser el funcionamiento alternativo de la energía sobrante de la instalación eólica.

Hemos visto en apartados anteriores que la energía de más que produzcan los aerogeneradores se venderá a la red eléctrica para conseguir una rentabilidad a pocos años de la inversión inicial.

Un posible uso que se le puede dar a esa energía es la de venderla a otra instalación industrial cercana a un precio menor que el establecido por las compañías eléctricas. De esta manera, se seguiría obteniendo beneficios suficientes para mantener e incluso mejorar la planta de desalación y los aerogeneradores, aparte de conseguir un aprovechamiento de esa energía producida.

En este caso se procedería a estudiar la viabilidad legal de vender la energía a otra instalación, o incluso llegar a hacer algún tipo de convenio para enlazar las distintas plantas.

Cerca de nuestra planta se encuentra el complejo EDAR, esta es la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Punta Umbría. Este complejo presta servicio a casi 142.000 habitantes con un caudal medio de tratamiento de  $28.400 \frac{m^3}{día}$ .

En 2012 el EDAR hizo una serie de mejoras y ampliaciones, dentro de las cuales se encuentra un nuevo proceso biológico en la parte del tratamiento físico-químico que mejora considerablemente la calidad de las aguas depuradas que posteriormente vierten en el mar, para con ello conseguir la menor contaminación posible del entorno. Además, también han añadido un tratamiento terciario que consiste en la reutilización de esas aguas para otros usos como la jardinería, riego o incluso campos de golf de los alrededores de la zona.

La idea sería la de vender la energía sobrante de la instalación eólica al EDAR una vez se haya alcanzado la rentabilidad del proyecto. De manera que para la estación depuradora esto sea una reducción considerable de gasto en energía. Esto con respecto a la energía, pero aparte se puede llegar a un acuerdo en el cuál se lleve la salmuera producida por la planta desaladora a la depuradora para que se mezcle con el agua

residual que verterán en el agua de mar para que la concentración de sales sea mucho menor y por consiguiente, genere menor contaminación del entorno.

## 11. Solución adoptada

En este penúltimo apartado se detallarán las decisiones tomadas en cada punto de este proyecto, que intenta obtener un flujo continuo de  $5000 \frac{m^3}{día}$  de agua de riego, a partir de una planta de desalación de agua de mar por ósmosis inversa, alimentada por energía eólica.

Así mismo, se realizará una descripción de los equipos y diseños finales del sistema, al igual que la localización de la instalación (eólica y desaladora), según los resultados estudiados en los apartados anteriores del proyecto. Y por último, se expondrán las medidas preventivas medioambientales.

### 11.1. Desalación

#### Localización de la planta de desalación

Los argumentos que inspiraron la decisión de la localización del proyecto se explicaron en el apartado de situación y emplazamiento, teniendo en cuenta los recursos eólicos e hídricos del lugar, el planeamiento urbano y territorial, cumpliendo los requisitos legales correspondientes.

Tras estudiar todos los puntos de potencial ubicación, la planta de desalación se ubicará en Punta Umbría, Huelva, concretamente en una parcela vecina al polígono industrial de ese municipio.

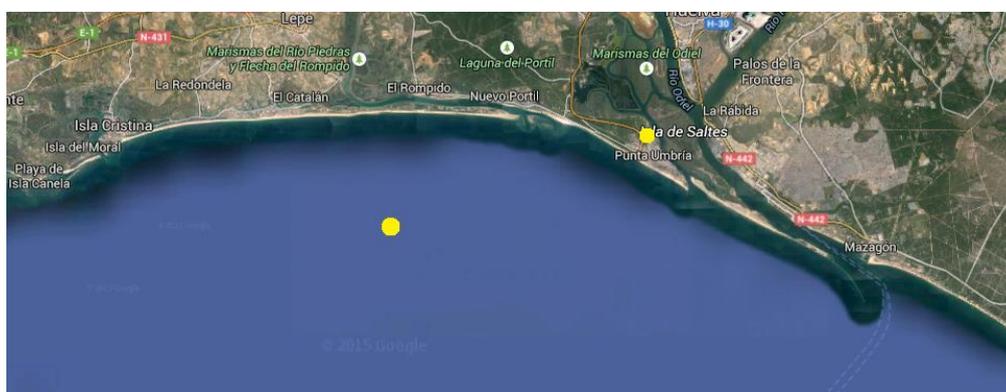


Imagen 83. Puntos de localización de las instalaciones

En la imagen anterior se marcan de amarillo los puntos aproximados donde se encontrarán, por otra parte, nuestros aerogeneradores *Offshore* y nuestra planta de desalación.

### Captación de agua de mar

Para llevar a cabo la captación de agua de mar se usará la toma por pozo. Se instalarán 3 unidades de los mismos (de los cuales 1 será de repuesto) de 15 metros de profundidad y 0,5 metros de diámetro. En cuanto a los equipos encargados de llevar el agua de los pozos hasta el núcleo serán 3 bombas sumergibles UPA 300-65/2a, una en cada pozo, del fabricante KSB. Cada una operará con un caudal de  $200,32 \frac{m^3}{h}$  y una altura de 51,56 m. Las tuberías serán de PRFV con un diámetro de 300 mm. Y las pérdidas en la misma se consideran en el Anexo III.

### Pretratamientos usados

A nuestra agua se le realizarán dos tipos de pretratamientos. En primer lugar se dosificará una cantidad de 16,41 ppm de ácido sulfúrico como pretratamiento químico para modificar el pH del agua antes de entrar a las membranas y así evitar que el carbonato de calcio precipite.

En cuanto al pretratamiento físico se le aplicará una filtración de  $1\mu m$  con un filtro de cartucho. Se usarán 17 unidades de filtro de cartucho del modelo SWRO ZS. 01-50.

### Núcleo de desalación

El núcleo de desalación por ósmosis inversa estará formado por un módulo de membranas que realizarán la ósmosis, la bomba de alta presión para el agua de alimentación, un equipo de recuperación de energía por medio del intercambiador de presión y una bomba *Booster*. Este núcleo tendrá una capacidad de producir  $5000 \frac{m^3}{día}$ .

En el corazón del núcleo se encontrarán 252 membranas AE HR Series, de alto rechazo y bajo consumo. Estarán repartidas en 36 tubos de presión de 7 membranas cada uno, con una conversión del 52%, cumpliendo, incluso con el alto valor de la

conversión, con las especificaciones químicas necesarias en cuanto a calidad del agua producto para consumo agrícola, menos con el pH que se ajustará con el post-tratamiento. El valor de la conversión se ha obtenido considerando la edad de las membranas de 5 años y variando las temperaturas del agua de alimentación a sus límites históricos.

Para reducir el consumo total de la planta se usará el intercambiador de presión como recuperador de energía. En el proyecto se ha decidido instalar 4 unidades del modelo PX-Q260 del fabricante *Energy Recovery Inc.* Haciendo así que el flujo total que pase por la bomba de alta presión disminuya y sólo pase un 54% del total de agua captada.

Para ajustar la presión del agua que sale del intercambiador de presión hasta la presión de entrada a las membranas se usará la bomba booster. Este equipo bombeará un caudal de  $195 \frac{m^3}{h}$  y una altura de 19,38 m. La bomba de circulación elegida será proporcionada por el fabricante KSB y será el modelo MCPK150-125-250 CC. Al igual que el resto de bombas de la instalación, se dispondrá de una de repuesto para posibles emergencias.

La encargada de elevar la presión del agua hasta la necesaria para realizar el proceso de ósmosis será una bomba de alta presión del fabricante *Energy Recovery Inc.* El modelo es la AquaBold 4x6x9-B, con un caudal de  $225 \frac{m^3}{h}$  y una altura de 694 metros, elevará la presión del agua hasta los 68 bar. Esta es la presión más elevada del sistema y es la evaluada para los 5 años de funcionamiento. También se dispondrá de bomba de repuesto para evitar la parada por avería.

### Post-tratamientos

La planta realizará un único post-tratamiento, este modificará la composición química del agua producto. El post-tratamiento constará en la dosificación de 9,25 ppm de "Lime" o Cal, esto ajustará el pH y remineralizará el agua por el aporte de Calcio. En concreto se variará el pH para adecuarlo a los requisitos mínimos de uso de agua para riego de 5,3 hasta 7.

### Distribución

El agua producto se bombeará a lo largo de dos tuberías de PRFV de 350 mm de diámetro y 25,69 km de longitud. Los 5000  $m^3$  agua producto de nuestra instalación serán conducidos hacia un depósito de almacenamiento localizado en La Rábida (la localización se especifica en el apartado de sistema de distribución) de 7350  $m^3$  de volumen, con unas dimensiones de 35x35x6 m. Las bombas encargadas de distribuir esta agua serán 2 bombas centrífugas (y una tercera de repuesto) ETANORM para bajas presiones, modelo ETN 080-065-160 GG, del fabricante KSB. Cada una bombeará  $110 \frac{m^3}{h}$  y darán una altura de 34 metros.

### Salmuera

La presión a la que salen los  $192,4 \frac{m^3}{h}$  de salmuera del núcleo de desalación es suficiente como para distribuirla sin necesidad de bombas, hasta la salida de la tubería que lleva desde el núcleo hasta el mar. La presión de salida de la salmuera es de 2,2 bar y la longitud de la tubería es de 2,5 km. La forma de eliminar la salmuera se llevará a cabo por medio de un emisario submarino a lo largo de los metros finales de la tubería.

Además se ha estudiado una posible alternativa en el apartado 10 de este proyecto para el aprovechamiento de la energía y la posible reducción del impacto ambiental de la salmuera por medio de la realización de una serie de convenios entre la planta de desalación y la estación depuradora de Huelva, el EDAR.

### Consumo energético de la planta

Tras la elección de los equipos que componen el núcleo de desalación, (que generan la mayor parte del consumo total de la planta) y los sistemas de captación y distribución, se calculó el consumo total de la planta, que será el que debe cubrir la instalación eólica.

Según los cálculos realizados, consumo específico de la planta de desalación será:

$$CE = 3,017 \frac{kWh}{m^3}$$

Y por lo tanto, para producir  $5000 \frac{m^3}{día}$  ( $208,33 \frac{m^3}{h}$ ) consumirá una potencia de:

628,44 kW
-----------

## 11.2. Eólica

### Localización de la instalación eólica

La instalación eólica se ubicará a 25 km de la planta de desalación, y a unos 10 km del punto más cercano a la costa. En la imagen 83 se ve claramente el lugar aproximado de instalación y en el apartado de situación y emplazamiento se especifica el motivo de que se haya instalado en ese punto.

### Aerogeneradores

Tras estudiar los aspectos pertinentes para distintos aerogeneradores *Offshore*, se instalarán dos aerogeneradores del fabricante VESTAS. Estos aerogeneradores tendrán un diámetro de 126 metros, 84 metros de altura y una potencia nominal de 3,3 MW.

Mediante la Guía Técnica de la Energía Eólica de la Junta de Andalucía y los datos del recurso eólico del punto de instalación, se ha podido calcular mediante la herramienta Excel el potencial eólico del emplazamiento para así estimar su producción anual. Según los cálculos, los aerogeneradores seleccionados funcionarán casi el 38% del tiempo a su máxima capacidad, la mitad de la energía producida por uno de los aerogeneradores será capaz de abastecer a la planta de desalación y por último, la decisión de que se hayan instalado dos aerogeneradores es para obtener una rentabilidad de la instalación eólica a los 4 años, y para tener recambio en caso de avería.

La potencia anual producida es de 10911,4 MWh, capaz de cubrir la demanda de la desaladora.

Cabe destacar que la planta desaladora está conectada a la red eléctrica para aquellos casos en los que la energía eólica no sea suficiente como para producir energía y alimentar a la instalación, ya que este es un parámetro variable y habrá días en los que no

haya viento. Una alternativa a la conexión a la red podría haber sido la instalación de baterías que almacenaran parte de la energía sobrante.

Finalmente con el potencial que proporciona el recurso eólico que tenemos en alta mar, y las especiales características de potencia de los aerogeneradores instalados, se puede decir que los resultados previstos en cuanto a la obtención de energía eléctrica anual son muy buenos.

### **11.3. Medidas preventivas medioambientales**

Tras estudiar distintos modos de proteger los medios marino, terrestre y aéreo, de las posibles influencias de los aerogeneradores se han tomado las siguientes decisiones a la hora de instalar los mismos:

Aumentar la visibilidad del aerogenerador y de sus aspas pintándolas con colores distintos o con UV

Usar aerogeneradores de gran potencia que necesiten bajas velocidades para obtener los mismos resultados que aerogeneradores más pequeños.

Uso de luces intermitentes

Sistema de detección remota *DTBird* que permitirá detener las aspas en caso de que algún ave se acerque a una distancia que pueda llevar a colisión con la máquina. Previamente a la parada se intenta disuadir al animal con distintos ruidos dependiendo del tipo de ave. Para distinguir el ave se cuenta con el módulo de detección. Y por último, todos los datos recogidos en cuanto tipo de ave, vuelos y otra información serán almacenados en una base de datos. Esa base de datos se usará para notificar vía email a los encargados, cuando se acerquen aves con alto potencial de colisión.

Para prevenir el impacto medioambiental con cetáceos y animales marinos se procederá a la monitorización previa a la instalación de los aerogeneradores. Con esto se conocerá qué puntos son aceptables para la instalación de nuestros dos aerogeneradores.

## 12. Conclusiones

La realización del presente proyecto ha permitido al alumno completar la formación académica del Grado en Ingeniería Mecánica. Se han podido perfeccionar y desarrollar las competencias profesionales, así como las capacidades de análisis, de redacción, búsqueda de información, toma de decisiones, creatividad, analizar impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas y la elaboración de documentos formales relacionados con la carrera en cuestión.

Aparte, se ha profundizado en el conocimiento de la tecnología de desalación por ósmosis y de la energía eólica. Se ha potenciado, también, la búsqueda y estudio de normativa y leyes y el aprendizaje de nuevos programas informáticos de diseño. Y por otro lado, el proyecto ha hecho que se amplíen y apliquen los conocimientos aprendidos de diversas asignaturas como las de hidráulica y oficina técnica.

Hablando más específicamente del proyecto, destacamos que:

La investigación y el desarrollo de las energías renovables experimentado en las últimas décadas han tenido un crecimiento muy destacado. Esto se debe a que cada vez más se busca la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles por su elevado coste y por las consecuencias medioambientales que le siguen. Dentro del sector de la ingeniería es una prioridad el conocimiento en energías alternativas para conseguir grandes eficiencias energéticas en procesos complicados que requieran gran cantidad de electricidad.

Por ello la unión entre el proceso de desalación y la energía eólica implica un avance en las tecnologías híbridas. Esta fusión implica obtener agua de una fuente importante, prácticamente inagotable, de este recurso, el mar, a base de explotar los recursos naturales. Es decir, supone una fuente de autoabastecimiento de agua sin apenas consumo energético.

En nuestro proyecto se han estudiado y seleccionado los componentes mecánicos y los tratamientos físicos y químicos de una planta de desalación que producirá  $5000 \frac{m^3}{día}$  de agua para el abastecimiento de parte de la demanda agraria de los campos de cultivo de los alrededores del Parque Nacional de Doñana, que actualmente están llevando a la

escasez de los recursos hídricos naturales de la zona y por lo tanto, afectando gravemente a los hábitats del Parque.

Con respecto a la planta de desalación se han estudiado distintas modificaciones con motivo de obtener los mejores resultados energéticos posibles sin dejar de lado que el agua producto tenga una buena calidad para su uso.

Los equipos elegidos han resultado ser altamente eficientes, conllevando esto a que el consumo final de la planta esté por debajo de los consumos típicos para plantas de la misma capacidad.

La idea de la instalación eólica nace con el propósito de autosuficiencia, para proporcionar la energía demandada por la planta y no tener que demandar energía externa. Para este apartado se han seleccionado los aerogeneradores y la mejor localización de los mismos para obtener la mayor cantidad de energía y rentabilidad. El uso de la energía eólica implica un aumento importante de la rentabilidad del proyecto y por lo tanto mayor es su aplicabilidad y viabilidad y la posibilidad de que se convierta en un proyecto real.

En conclusión, la combinación entre la desalación y la energía eólica es una solución eficaz y eficiente además de sostenible para la obtención de agua de calidad, que permite atender las necesidades a nivel urbano del conjunto de la población, así como para su uso industrial o agrícola, con una rentabilidad a medio y largo plazo elevada.

### **Conclusions**

*Making this Project, the student has completed the all the academic formation and has developed the professional skills like the synthesis capacity, quality in the redaction, searching of information, the taking of decision, improve the creativity, and the formal documents production. All these skills and capabilities are related to a good formation in the Bachelor's degree in Mechanical Engineering.*

*Also the student has got a deeper understanding about the reverse osmosis desalination technology and the wind energy power. At the same time, the use of laws and regulations has also improved, as well as the use of different Design software. The*

*project allowed the student to use the information and knowledge learnt in subjects like Hydraulics and Technical Office.*

*Fruit of working on this project, the author highlights the following topics:*

*The investigation and development of renewable energy has experimented an important increase during the last decades. The necessity for an independence from fossil fuels, due to their high price and environmental impact, has grown daily. Nowadays the knowledge about these technologies is really important for engineering. It can provide alternatives that improve the efficiency in different technologies and processes, and can reduce the dependency in the fossil fuels of processes that needs a lot of energy as well.*

*Mixing the osmosis desalination with the wind energy is an important step in the development of hybrids process. This mix can get clean water using the wind so it is a process that can eventually be a self-sufficient.*

*In this project it has been studied and selected the mechanical components and the physics and chemistry process in the desalination plant that will produce 5000  $\frac{m^3}{\text{día}}$  of water to supply part of the demand for agricultural fields surrounding the Doñana's National Park. This agricultural demand has affected badly to the Doñana's natural hydric sources.*

*In the desalination plant it has been studied the different modifications for the installation, looking for the best energetic results possible, without neglecting the quality of the water for its specific use.*

*The equipment selected for the installation is really efficient, which leads to a low-consumption desalination process. Lower than other similar installations with the same capacity.*

*The idea for the wind farm is born with the purpose of a self-sufficient installation, providing the energy required by the plant. In this part of the project it has been selected the wind turbines and the best situation for them, looking for obtaining the most energy and efficiency possible. The use of the wind energy will improve the profitability and viability of the project.*

*In conclusion, the mix of desalination and wind energy is effective, efficient and sustainable enough to produce water with a certain quality that will attend the urban needs of the population, as well as its industrial or agricultural use, with high profitability.*

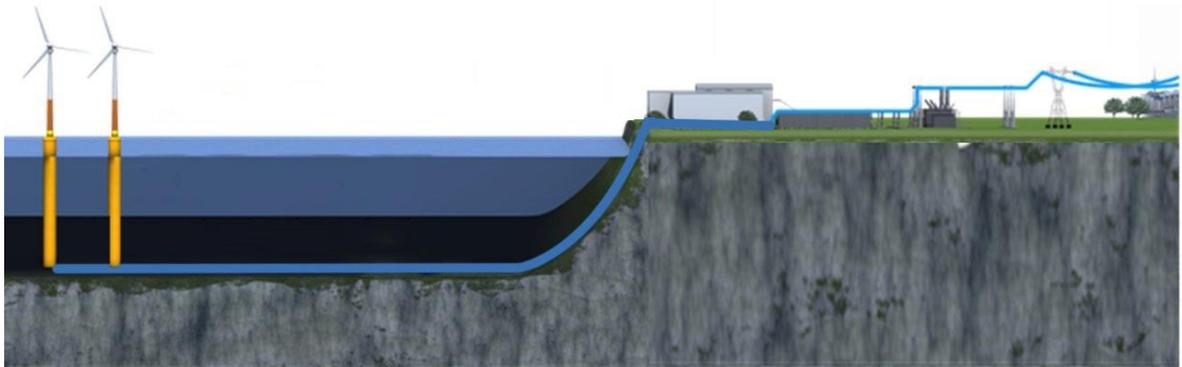


Imagen 83. Imagen del proyecto

# ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA E.S.I.T.

**TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica**

## ANEXOS

### Trabajo Fin de Grado

#### TÍTULO

ESTUDIO DE UNA PLANTA DE DESALACIÓN ALIMENTADA POR ENERGÍA EÓLICA  
PARA EL SUMINISTRO DE AGUA DE RIEGO PARA LA RECUPERACIÓN DEL  
ENTORNO HIDROLÓGICO DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA

#### AUTOR

Alberto Hernández González

#### TUTOR

Vicente José Romero Ternero



# ANEXO I

## Teoría de la desalación



## ÍNDICE

1. Descripción .....	6
2. Sistema de captación.....	6
2.1. Tipos de sistema de captación .....	6
2.2. Tipos de bombas de captación .....	8
3. Pretratamiento físico.....	8
3.1. Filtro de cartucho.....	8
4. Pretratamientos químicos.....	9
4.1. Desinfección .....	9
4.2. Ajuste de pH .....	10
4.3. Decoloración .....	10
4.4. Inhibición.....	10
5. Núcleo de desalación .....	10
5.1. Teoría de membranas de ósmosis Inversa .....	10
5.1.1. Configuraciones.....	10
5.1.2. Rechazo de sales .....	11
5.1.3. Conversión o recobro.....	12
5.1.4. Presión.....	13
5.1.5. Superficie de membranas .....	13
5.1.6. Número de membranas .....	14
5.1.7. Número de etapas.....	14
5.2. Recuperador de energía.....	15
5.2.1. Tipos de recuperadores de energía.....	15
5.3. Bomba <i>Booster</i> .....	19
5.4. Bombas de alta presión.....	19
5.4.1. Tipos de bombas de alta presión.....	19
6. Post-tratamientos .....	20
6.1. Tipos de post-tratamientos.....	20



## 1. Descripción

En este anexo se explicarán los distintos equipos y tratamientos que se podrán encontrar en una planta de desalación. Este documento servirá para exponer la teoría necesaria para entender las soluciones adoptadas en la memoria.

El orden de este Anexo sigue el flujo del agua en la planta de desalación, es decir, comienza en la captación, continúa por los pretratamientos, núcleo de desalación y finalmente post-tratamientos.

## 2. Sistema de captación

### 2.1. Tipos de sistema de captación

A la hora de diseñar la captación del agua de mar se deberá tener en cuenta las ventajas e inconvenientes de los dos tipos de sistemas que hay.

- Toma de agua cerrada

Esta es la toma que se hace mediante la excavación de pozos. Es la más recomendable por el considerable ahorro en pretratamientos químicos-físicos y tiene las siguientes ventajas e inconvenientes:

Ventajas	Inconvenientes
Limpieza del agua por su filtrado en el terreno. Reduciendo así su turbidez y colmatación	Contenidos de hierro, aluminio, sílice y flúor, que requerirán de unos pretratamientos previos antes de llegar a las membranas.
No presencia de actividad orgánica ni biológica	Composición química variable a lo largo del tiempo y de la época del año
Bajo oxígeno disuelto	Posible contaminación por pesticidas y nitratos del terreno
Temperaturas estables	

Tabla 1. WMS Propiedades físicas del suelo

Dichas ventajas permitirán un ahorro considerable en los pretratamientos, en concreto, químicos.

A la hora de implantar una toma de agua cerrada se debe tener en cuenta que a lo largo del tiempo se puede producir una disminución de caudales debido al arrastre de elementos finitos que obstruyan el terreno y por lo tanto no permitan la fluencia del agua

al pozo. Para evitar que se produzca dicha obstrucción, en el diseño se deben sobredimensionar los caudales de captación. En el caso de que los caudales disminuyan considerablemente, incluso llegando a niveles por debajo de los necesarios, se requerirían obras adicionales para la recuperación del terreno.

Dentro de las tomas de agua cerrada encontramos de dos tipos:

-Cántara de captación: Para terrenos con buena permeabilidad. Consiste en un depósito con una profundidad inferior a la cota de agua. Esto hace que el agua fluya y se filtre a través de las paredes de la cántara, para luego ser impulsadas por las bombas. Para la realización de este tipo de toma de agua, se debe tener especial cuidado con las mareas, ya que serán las que controlen la cantidad de agua que haya en el depósito.

-Cámara de captación con sondeos verticales: Cuando el terreno tenga una permeabilización insuficiente para aportar el caudal necesario por la instalación. Se realizan perforaciones en el fondo de las cántaras hasta llegar a un terreno más permeable y que aumente el caudal.

Cabe destacar que cuando el nivel de bajamar, bajo la línea del terreno, es mayor de 8 metros, el uso de cántara puede ser complicado y muy caro.

- Toma de agua abierta

Este es un tipo de toma superficial, utilizada en terrenos con características de permeabilidad muy mala o casi impermeable. Normalmente el punto de captación de agua está a una determinada distancia de la costa. Tras dicha toma, el agua es dirigida a un depósito donde es almacenada, tanto para garantizar un suministro de agua ininterrumpida, como para servir de decantador, mejorando las propiedades físicas del agua.

Hay dos tipos de tomas de agua abierta:

-Toma en canal: Tiene una menor longitud y más superficial. Por ello está más expuesta al oleaje y a las algas. Se requieren rejillas adecuadas con materiales anticorrosivos para evitar la entrada de organismos y algas a las bombas.

-Emisario submarino: Se usa cuando se encuentran con que las condiciones del oleaje no permiten usar una toma en canal debido a la gran turbidez que se produce o por el arrastre de algas. Se usan grandes tuberías adaptadas según el caudal necesario, de materiales anticorrosivos y flexibles. Y al final se dispone de un colector con varios filtros de entrada con rejillas para evitar la entrada de peces o algas. El anclaje de estas tuberías se realiza mediante dados de hormigón. Y su limpieza se hace con aire, para la cual se añadirán unas tuberías que enviarán ese aire hasta las rejillas de los colectores.

## **2.2. Tipos de bombas de captación**

El tipo de bomba de la instalación dependerá del tipo de captación de la que se disponga. Siempre se buscará la bomba que proporcione mayor eficiencia para la solución adoptada. Hay dos tipos principales de bombas usadas en la captación: bombas verticales y bombas sumergidas.

Las bombas verticales suelen tener mayores eficiencias y más fácil mantenimiento. Sin embargo con las bombas sumergidas se evitará cualquier posible problema de cavitación.

En la instalación se encontrarán sondeos verticales, es decir, pozos de gran profundidad con un pequeño diámetro. Es por ello que debe recurrirse a la impulsión del agua de captación mediante bombas sumergibles. En este caso, para mejorar las prestaciones no se elegirán bombas sumergidas normales de alta velocidad, sino otras con un menor número de revoluciones (sobre las 1500 rpm), pero más eficientes, aunque con un ligero aumento de coste.

La solución adoptada es la de instalar una bomba sumergible en cada pozo (3 pozos).

## **3. Pretratamiento físico**

### **3.1. Filtro de cartucho**

Los filtros de cartucho son usados en el pretratamiento, antes de la entrada del agua de mar a la bomba de alta presión para evitar la posible entrada de cualquier tipo de partícula abrasiva que pueda causar daños a la bomba de alta presión o que produzca algún tipo de obstrucción o taponamiento de los canales hidráulicos de las membranas. Estos filtros permiten una filtración mínima de 5  $\mu\text{m}$ , que es la mínima requerida por los

fabricantes de membranas como condición para un continuo funcionamiento de las mismas. Es altamente recomendado instalar otro filtro de 1µm tras este.

Son depósitos metálicos o plásticos recubiertos en su interior. Dentro tendrán una serie de cartuchos con eje hueco provisto de orificios por los que entrará el agua filtrada. Alrededor de ese eje se enrolla un hilo de polipropileno u otro material plástico que es el que garantizará el tamaño del poro que realizará el filtrado. Ese tamaño se consigue con la selección del espesor del hilo, tipo de enrollamiento y tensión.

El material del eje de los cartuchos debe ser un material resistente a la corrosión, como puede ser el PVC, aceros inoxidable o cualquier otro tipo de material que soporte el agua de mar.

El agua entra por el exterior de los cartuchos y pasa por ellos a la presión de entrada dada por la bomba de captación, hasta pasar por el hilo por el que está recubierto hasta llegar al eje hueco ya filtrada. El agua filtrada es separada del agua sin filtrar por unas cámaras.

Estos filtros cuentan con unas conexiones especiales que permiten el lavado a contracorriente para eliminar las partículas retenidas en la superficie filtrante. Sin embargo, la mayoría de veces cuando la limpieza deja de tener efecto, las pérdidas de carga incrementan hasta llegar a un valor determinado, en el cual se procede a la sustitución de los cartuchos.

Las dimensiones de los cartuchos varían entre las 1,5” a 2” de diámetro y 0,25-1,25m de longitud.

#### **4. Pretratamientos químicos**

##### **4.1. Desinfección**

Se usa para eliminar la contaminación bacteriológica y las algas características propias del agua de mar. Este tipo de contaminación se encontrará en todo tipo de tomas de agua y conlleva un peligro de ensuciamiento y por lo tanto, de obstrucción de las membranas. Para la eliminación de la actividad bacteriológica se puede dosificar cloro u ozono.

## 4.2. Ajuste de pH

Los pH del agua de mar suelen ser de un valor elevado, sobre 8. Por ello es necesaria una acidificación del agua. Esto prevendrá la precipitación del carbonato cálcico. Comúnmente se usa ácido sulfúrico.

## 4.3. Decloración

Este es el proceso de eliminación total del cloro. Para ello se usan una serie de reactivos como lo son, el  $SO_2$  o las soluciones acuosas de compuestos de sulfito.

## 4.4. Inhibición

La inhibición busca aumentar la solubilidad de los iones del agua mediante la dosificación de productos químicos. Es un tratamiento muy usado en instalaciones de agua salobre y se está extendiendo en desalación de agua de mar. Al aumentar la solubilidad se aumentará la recuperación de la instalación consiguiendo así una reducción de la inversión en equipos. Los inhibidores actúan principalmente en los precipitados de las sales de los sulfatos:  $SO_4$ ,  $Ca$ ,  $Ba$ ,  $SO_4Sr$ , flúor o sílice.

## 5. Núcleo de desalación

### 5.1. Teoría de membranas de ósmosis Inversa

En este apartado se estudiará la teoría de las membranas y los elementos del núcleo de desalación que determinarán como será nuestra instalación.

#### 5.1.1. Configuraciones

Se encontrarán dos tipos de membranas en cuanto a configuración: fibra hueca y arrollamiento en espiral.

La membrana de fibra hueca está compuesta de millones de tubos huecos interiormente del tamaño de un pelo humano. Estos tubos se colocan alrededor de un tubo central provisto de perforaciones por las que pasará el agua a presión) y quedan sujetas por sus extremos por un material epoxi para darles rigidez. El agua a presión se aplica desde el tubo central hasta el exterior de los pequeños tubos haciendo que el agua fluya y se filtre por la membrana separadora de los mismos haciendo que se retengan las sales en su exterior y dejando el flujo del agua producto en su interior. El resto que no es filtrado se dirige hacia los bordes del tubo que posteriormente será recogida mediante un colector para su evacuación.

Las de arrollamiento en espiral se forman por una serie de láminas rectangulares enrolladas alrededor de un eje central cilíndrico que será el encargado de recoger el agua producto por una serie de perforaciones de las que dispondrá. Entre cada lámina habrá una serie de separadores impermeables y mallas, quedando estas dos entre medio de las láminas de manera alternada. Por lo tanto, habrá el mismo número de láminas que de mallas y de separadores. Este conjunto se sella con un pegamento por tres de los lados, dejando uno de ellos para la salida del agua que ha atravesado a las membranas, que será unida al eje perforado. El agua de alimentación se introduce por un lateral de la membrana y tras atravesar las láminas, separadores y mallas, se dirige hacia el eje central perforado que dirigirá el agua producto, mientras que el rechazo atravesará todo el equipo para salir por el lado contrario al que entró el agua a presión.

A continuación se adjunta una tabla comparativa entre estos dos tipos de configuraciones.

	<b>Fibra hueca</b>	<b>Arrollamiento en espiral</b>
<b>CAUDAL</b>	-Mayor superficie por módulo. Por ello se usarán menos membranas y menos espacio	-Son más permeables -Mayor caudal unitario
<b>PRESIÓN DE FUNCIONAMIENTO</b>	-Exige mayores presiones por su menor permeabilidad -Soportan presiones de 1200 psi (84kg/cm <sup>2</sup> ) -Mayor consumo energético	-Soportan presiones de 1000 psi (70,5 kg/cm <sup>2</sup> )
<b>ENSUCIAMIENTO</b>	-Espacio pequeño entre fibras, por ello son propensos a ensuciarse y obstruirse (mayor coste en pretratamientos) -SDI<4	-SDI<5
<b>RECHAZO DE SALES</b>	-Rechazos inferiores, no superar el 99,4% -Mayor recuperación por elemento	-Valores normales de 99,5% -Algunos fabricantes llegan incluso al 99,8%

Tabla 2. Configuraciones de membranas

### 5.1.2. Rechazo de sales

Las membranas se usarán para la separación de iones, por ello, la capacidad de rechazo es realmente importante. Un valor aproximado de rechazo de estas membranas, para el caso de agua de mar, suele ser superior al 99,2%. Las membranas se distinguen unas de otras en muchos aspectos, pero precisamente este, el rechazo, es la principal diferencia. Las membranas harán de filtro para las moléculas.

El diseño de la instalación debe tener en cuenta no solo la calidad del agua que se debe tratar sino también la calidad del agua a obtener.

El rechazo de sales lo que indica es el porcentaje de sales que rechaza la membrana con respecto al total de las sales presentes en el agua. Por ello, para calcularla se mide la concentración del agua de alimentación y la concentración del agua producto, quedando la ecuación:

$$\text{Rechazo} = 100 * \left( \frac{1}{\frac{\text{Concentración producto}}{\text{Concentración alimentación}}} \right)$$

Siendo el denominador conocido como “paso de sales”.

### 5.1.3. Conversión o recobro

Es la relación (%) de la cantidad de caudal que puede desalarse a partir de un caudal de alimentación. Cuanta mayor conversión, mayor caudal aprovechado y por lo tanto menor salmuera. Pero a la hora de la verdad se tendrá unos valores límites que determinarán las distintas membranas dependiendo de sus características.

Debemos tener especial cuidado con el caudal de la salmuera ya que cuanto menor sea, mayor concentración y por lo tanto más probabilidad de que precipiten las sales en ella. Por lo tanto se puede concluir que la conversión está limitada por el coeficiente de solubilidad de las sales de la salmuera. Si la sal precipitara únicamente en la salida de la salmuera no supondría tanto problema, sin embargo, esta precipitación se produce normalmente en la superficie de las membranas, lo que llevará a la obstrucción de las mismas, conllevando a una pérdida de las características, un aumento del número de reparaciones y una reducción de la vida útil.

Por lo tanto, a menor conversión disminuye el riesgo de precipitación. Pero por otro lado aumentan los costes de producción y energía. Por ello debemos estudiar qué conversión se sitúa por debajo del límite para el aprovechamiento máximo de las membranas.

Para mejorar la conversión se suelen utilizar una serie de modificaciones:

- **Antiincrustantes:** Son compuestos químicos que actúan sobre las sales para evitar que precipiten manteniéndolos en un estado de supersaturación. Y con ello consiguiendo unos valores de solubilidad mucho mayores de los normales
- **Cambios de temperatura:** La temperatura influye en la solubilidad de las sales. Al aumentar la temperatura se reduce el rechazo de sales debido al aumento de la solubilidad de las sales y al efecto dilatador del agua en las membranas.
- **Regulación de pH:** La solubilidad también varía por el pH. Se elegirá un pH en el que la sal con mayor tendencia a precipitar obtenga un valor mayor.

Las sales que suelen crear los problemas de precipitación son el sílice, el sulfato cálcico, el fluoruro cálcico y el bicarbonato cálcico.

#### **5.1.4. Presión**

La presión a la que funcionará la membrana será aquella que permita superar la presión osmótica entre una y otra solución a ambos lados de la membrana. Este valor es dado por el fabricante.

#### **5.1.5. Superficie de membranas**

Se suele considerar a las membranas como filtros, por lo tanto, a mayor área de trabajo, mayor productividad.

El área de la membrana es un dato importante a tener en cuenta si se quiere aumentar la productividad de la planta, ya que en el caso de que no se quiera cambiar y aun así aumentar esta productividad, habría que incrementar la presión del agua conllevando ello a una disminución de la vida útil de la membrana por compactación y a un aumento del ensuciamiento por la deposición de elementos extraños más fuertemente en la superficie de la membrana.

Es un dato importante a tener en cuenta el de la superficie de membrana, para conocer el número de ellas a colocar para la capacidad de la instalación. Las configuraciones antes nombradas lo que buscan es trabajar con superficies altas en un menor espacio posible.

Las membranas vienen definidas por un flujo por unidad de superficie, definido como GFD (*gallon foot day*) o  $\frac{l}{m^2} * día$ . Para agua de mar en pozo los valores suelen estar entre los 27-34  $\frac{l}{m^2} * día$  para arrollamiento en espiral, mientras que esos valores disminuyen en fibra hueca.

#### **5.1.6. Número de membranas**

Para obtener el número de membranas necesarias se partirá de los datos de la superficie por membrana y del caudal necesario a producir. Con estos datos se conseguirá una primera cifra representativa que ayudará a obtener el número final.

Normalmente los fabricantes recomiendan unos valores máximos de recuperación por membrana. Con esos valores se intentará ajustar el número de membranas.

El caudal rechazado de una membrana en un tubo de membranas será el caudal de alimentación de la siguiente, conllevando esto a una disminución de la presión del agua y aumento de la salinidad. Además que la recuperación también irá disminuyendo. Esto se produce por ese descenso de la presión neta y el aumento de la presión osmótica por la salinidad del rechazo. Por ello en la práctica se consigue una mayor recuperación en tubos de presión de primera etapa.

Es decir, para el cálculo del número de membranas en primer lugar hay que definir el área y el caudal a producir. Acto seguido habrá que seleccionar el número de membranas por tubo de presión y con ello obtendríamos el dato final. Aparte, habrá que comprobar, con la aplicación informática necesaria que use, ese número y tipo de membranas con los requisitos de diseño de caudal y calidad del agua para ver si realmente se ajusta a los cálculos.

Las membranas de arrollamiento en espiral se usan entre 6-7 membranas por tubo de presión y las de fibra hueca por parejas.

#### **5.1.7. Número de etapas**

El número de etapas se elegirá según las prestaciones y mejoras que permitan cada una. Si la toma de agua es en pozo de agua de mar, esta agua no estará muy contaminada y el índice SDI será reducido, por lo que cualquier solución es correcta.

Para tomar la decisión de colocar una o dos etapas se deben tener en cuenta las condiciones de la instalación. En el libro de “Desalación de aguas salobres y de mar” Medina San Juan (2000), podemos leer que en dos etapas para el agua de mar de pozo la recuperación es ligeramente superior pero la calidad es inferior. Para comprobar cuál es la mejor disposición se usará más adelante el programa *Winflows*.

## 5.2. Recuperador de energía

A continuación, se explicarán los principales recuperadores de energía que hay y sus características para luego seleccionar el más apropiado para nuestra instalación.

### 5.2.1. Tipos de recuperadores de energía

- Turbina Pelton

Es una turbomáquina de flujo radial. Esta usa el rechazo a alta presión y por medio de una rueda giratoria aprovecha la energía de presión convirtiéndola en energía cinética, a modo de un chorro de un fluido con alta velocidad. Este chorro se dirige hacia los álabes de la turbina haciéndola girar y por lo tanto transformando la energía de presión del comienzo en energía mecánica producida por el giro. Las turbinas se conectan directamente al eje del generador eléctrico o a la bomba de alta presión.



Imagen 1. Turbina Pelton

En la siguiente imagen observamos cómo se instalaría la turbina en la instalación. La línea roja representa cómo el concentrado entra a la turbina y la línea gruesa negra muestra cómo se conecta la turbina Pelton a la bomba de alta presión.

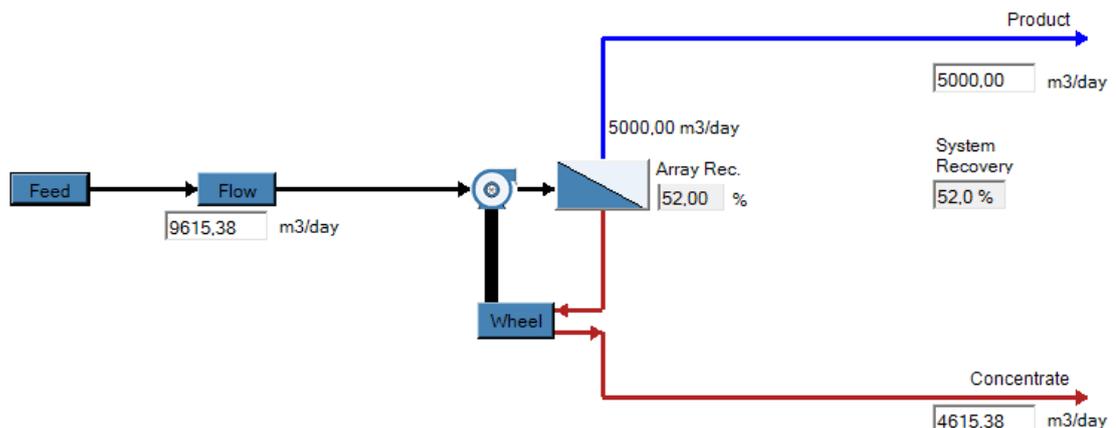


Imagen 2. Turbina Pelton en la instalación

- Turbobomba-turbocharger

Ambos son equipos que intentan integrar la bomba y la turbina unidas a un mismo eje inversamente y de manera que ocupen mucho menos espacio del que tendrían ambos elementos iguales independientemente.

Para elevar grandes volúmenes se requieren velocidades de hasta 6000 rpm, debido al poco espacio que ocupan. Esta es la turbobomba. Estas altas velocidades hacen que haya un alto número de averías. Por ello y por la dificultad para su mantenimiento, este tipo de recuperador de energía no ha tenido mucho éxito en el mercado.

Por otro lado, el turbocharger funciona de una manera similar pero aún más compacta. Este equipo transforma la energía de presión de la salmuera y la convierte en energía mecánica que luego aprovechará la bomba y así poder elevar la presión del agua de alimentación. El turbocharger no tiene la turbina conectada a ningún motor y por ello se puede conectar a cualquier punto de la instalación.

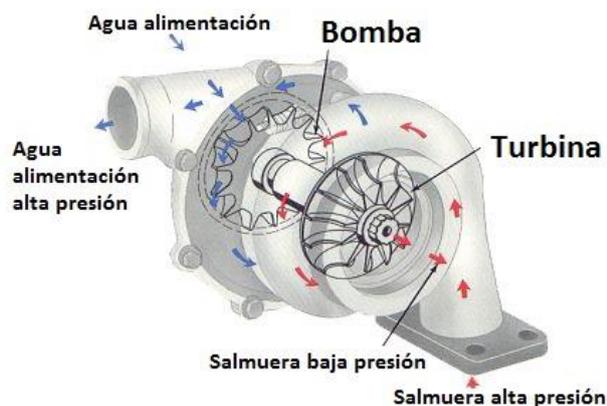


Imagen 3. Turbocharger

- Intercambiador de presión

Este es el equipo más usado en las instalaciones más recientes de desalación. El funcionamiento se basa en el intercambio de presión de un fluido con alta presión a otro al que queremos elevársela, sin necesidad de transformar la energía de presión en energía mecánica. Según el principal fabricante de intercambiadores de energía (*Energy Recovery Inc.*), la eficiencia ronda el 98%.

El intercambiador de presión funciona por medio de un cilindro giratorio provisto de una serie de agujeros en los que se encontrará una pequeña placa que será la que evite la mezcla de los fluidos. Por ambos lados del cilindro central encontramos unos cilindros laterales sin movimiento pero que tienen dos orificios, uno por donde entrará el fluido y otro por el que saldrá.

El funcionamiento es sencillo, en primer lugar el agua a baja presión entra por uno de los agujeros del cilindro lateral (supongamos que es el izquierdo), instantáneamente este fluido entrará en uno de los orificios del cilindro central que desplazará la placa que se encuentra dentro.

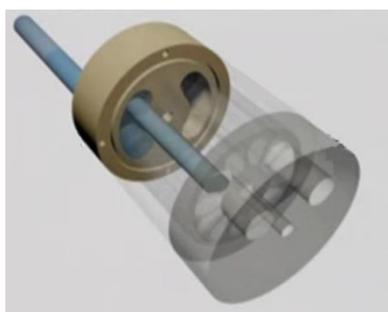


Imagen 4. Paso 1

A continuación cuando el cilindro central gira 180° se llega a la entrada de la salmuera a baja presión que comprimirá el agua de baja presión y la sacará por el otro agujero del cilindro izquierdo a alta presión.

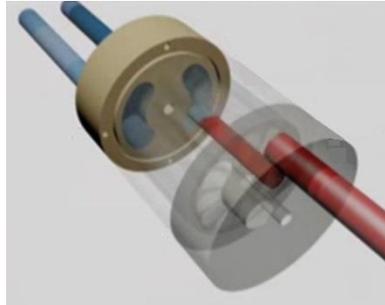


Imagen 5. Paso 2

Para finalizar, al volver a girar 180° retornará al estado inicial en el que el agua de baja presión estará a mayor presión que la salmuera sin presión, por lo tanto en la entrada de esta, el agua sacará la salmuera por el orificio final. Y vuelve a repetirse el proceso.

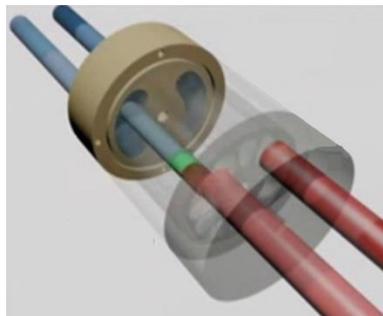


Imagen 6. Paso 3

Debido a que no se transfiere el 100% de la presión debemos instalar una bomba de circulación llamada bomba *Booster*, que aumentará la presión del agua hasta la necesaria antes de mezclarla con el agua que sale de la bomba de alta presión. A continuación, vemos una imagen de nuestro sistema con un intercambiador de presión.

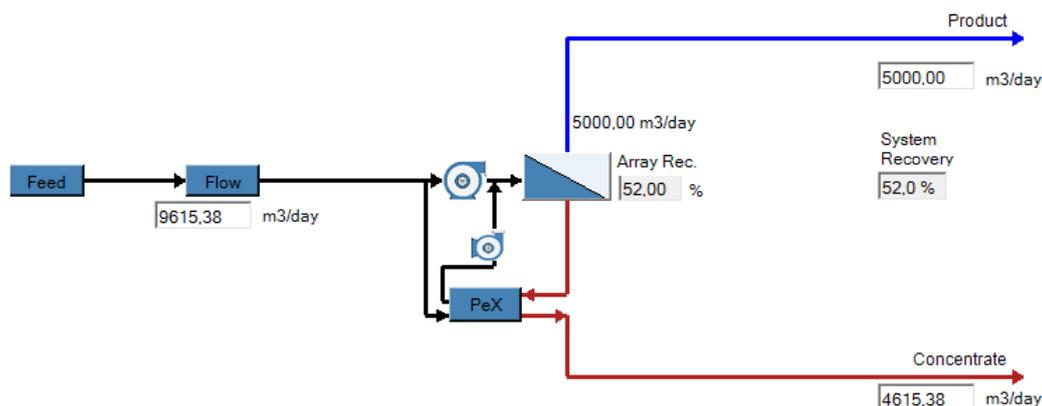


Imagen 7. Instalación con intercambiador de presión

Sin intercambiador, el flujo que pasa por la bomba de alta presión es el 100% del agua de alimentación. Sin embargo, usando el intercambiador, el caudal que pasa por la bomba será mucho menor, conllevando esto a un ahorro considerable en cuanto a energía consumida por la instalación.

### 5.3. Bomba *Booster*

Estas son un tipo de bombas centrífugas multietápicas. El número de etapas variará según la presión necesaria. Son bombas con diámetros relativamente pequeños, y que a menores caudales, mayores rendimientos. Estas bombas tienen un ruido mínimo y poco desgaste. Debido a su limitado caudal, se pueden usar dos o más bombas en paralelo para conseguir los caudales requeridos. Las bombas *Booster* necesitan poco mantenimiento y su instalación es sencilla.

Estas son ubicadas tras la salida del agua de alta presión del intercambiador de presión que va directa al agua de alimentación, antes de entrar al módulo de membranas. Se usan para elevar la presión del agua que sale del intercambiador hasta la presión que tiene el agua de alimentación a la salida de la bomba de alta presión.

### 5.4. Bombas de alta presión

#### 5.4.1. Tipos de bombas de alta presión

Los procesos de ósmosis inversa requieren que el agua que entre a las membranas tenga una presión bastante elevada, para vencer la presión osmótica necesaria. Esta elevación se lleva a cabo por la bomba de alta presión. Dentro de estas diferenciamos dos tipos de bombas:

- Bombas de desplazamiento positivo
  - Bombas helicoidales, o de tornillo que sirven para presiones de 70 bar y capacidades de hasta  $14 \frac{m^3}{h}$  y pequeños rendimientos para estas altas presiones.
  - Bombas de pistones, tienen eficiencias teóricas de hasta el 90%, aunque en la práctica sea algo inferior (86-88%). Con caudales de hasta  $100 \frac{m^3}{h}$  y presiones de entre los 20-85 bar.
- Bombas centrífugas
  - Bombas simples, para presiones de entre 35-45 bar, con rendimientos bajos.
  - Bombas de chorro, rendimientos en torno al 62%, con capacidades de  $100 \frac{m^3}{h}$  y presiones de 50-80 bar.
  - Bombas multietápicas o multicelulares, con presiones no superiores a los 45 bar, baja eficiencia, no superior al 65%. Dentro de este tipo de bombas, destacan las de cámara partida y las bombas verticales; las primeras funcionan para caudales superiores a los  $200 \frac{m^3}{h}$  llegando a unos rendimientos del 80-85%; las segundas tienen sus mayores eficiencias para caudales elevados, pero a medida que aumenta la presión y el caudal, la bomba requiere más módulos, aumentando así la longitud de la misma.

## 6. Post-tratamientos

### 6.1. Tipos de post-tratamientos

Los postratamientos son usados para alterar características químicas del agua después de pasar por las membranas. Normalmente se usan para ajustar las condiciones finales del agua para un determinado uso. Los postratamientos más usados son:

- Eliminación del CO<sub>2</sub>

Las elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> hacen que el agua se oxide mucho más rápidamente. Para eliminarlo se usan desgasificadores atmosféricos en el permeado.

- Ajuste del pH

Cuando se requiere un pH en concreto se ajusta añadiendo al agua producto hidróxido sódico, potasio o cal. El ajustar el pH también reduce el poder corrosivo del agua.

- Desionización

Se usará un intercambio iónico usando resinas para eliminar iones del agua para determinados usos del agua cuando se requiera.

- Esterilización

Es bueno realizar estudios del agua producto por seguridad, debido a que no siempre el paso por membranas elimina el total de los microorganismos del agua captada. Esta esterilización se lleva a cabo con ozonización, cloración o radiación ultravioleta.

- Control de olor, color y sabor

Estas tres características son realmente importantes en el agua de consumo humano pues esta debe ser inodora, incolora e insípida. Para llegar a esas características se usará carbón activado y/o filtros de lechos.

# ANEXO II

Cálculo de la producción de energía por  
aerogenerador



## ÍNDICE

<b>1. Cálculo de la potencia generada por aerogenerador .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Descripción .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Recurso eólico.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Curvas de potencia .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4. Producción de energía .....</b>	<b>11</b>



## 1. Cálculo de la potencia generada por aerogenerador

### 1.1. Descripción

En este anexo se encuentran las curvas de potencia de los distintos aerogeneradores seleccionados en este proyecto. Con estas curvas y una vez calculado el recurso eólico en el documento de memoria (se muestra a continuación) podemos obtener la potencia que se obtendrán con cada máquina.

### 1.2. Recurso eólico

Tras los cálculos realizados en Excel y expresados en el documento de memoria obtenemos la siguiente tabla en la que se expresan las horas al año en las que se dispondrá de cada velocidad del viento. Esto junto a las curvas de potencia permitirá calcular la producción de energía de cada aerogenerador al año.

80 m.			
Velocidad (m/s)	f (v)	f (v) (%)	Horas/año
1	0,0247	2,47	216,0
2	0,0549	5,49	480,8
3	0,0832	8,32	728,9
4	0,1052	10,52	922,0
5	0,1182	11,82	1035,3
6	0,1210	12,10	1060,3
7	0,1146	11,46	1003,8
8	0,1011	10,11	885,3
9	0,0834	8,34	730,8
10	0,0646	6,46	566,1
11	0,0471	4,71	412,3
12	0,0323	3,23	282,7
13	0,0208	2,08	182,5
14	0,0127	1,27	111,0
15	0,0073	0,73	63,7
16	0,0039	0,39	34,4
17	0,0020	0,20	17,5
18	0,0010	0,10	8,4
19	0,0004	0,04	3,8
20	0,0002	0,02	1,6

Tabla 1. Horas/año

### 1.3. Curvas de potencia

En la siguiente tabla encontramos los diferentes modelos de aerogeneradores y marcas dentro del catálogo de *Off-Shore*:

Fabricante	Modelo	Potencia nominal (MW)
<b>SENVION</b>	152-6.2	6.2
<b>VESTAS</b>	105-3.3	3.3
	112-3.3	3.3
	117-3.3	3.3
	126-3.3	3.3
<b>GAMESA</b>	G128-5.0	5.0
	G132-5.0	5.0
<b>SIEMENS</b>	107-3.6	3.6

Tabla 2. Aerogeneradores

A continuación las curvas de potencia de cada uno de ellos:

- SENVION 152-6.2

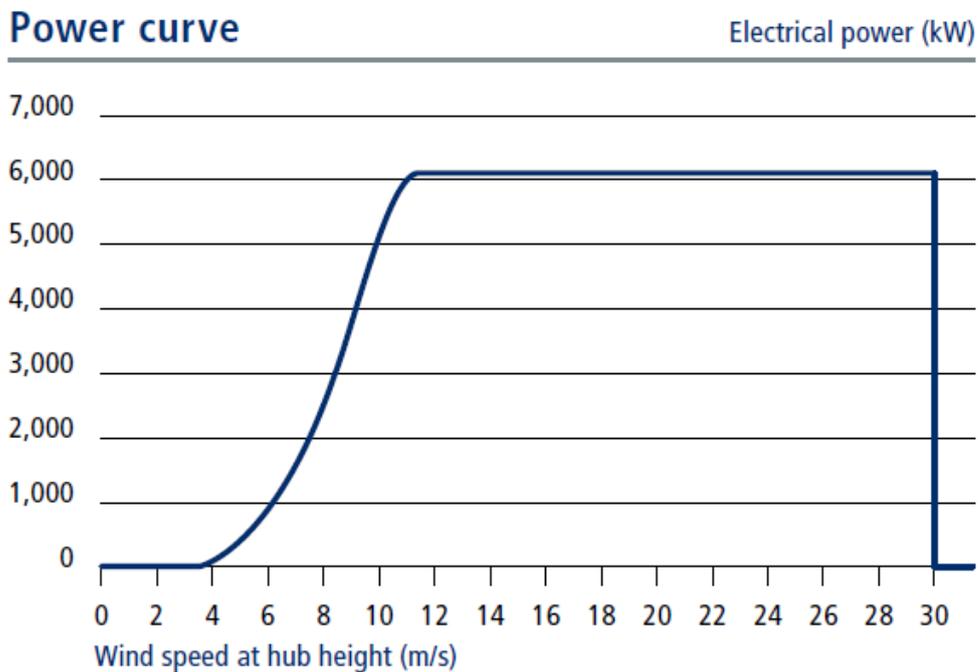


Imagen 1. SENVION

- VESTAS 105-3.3

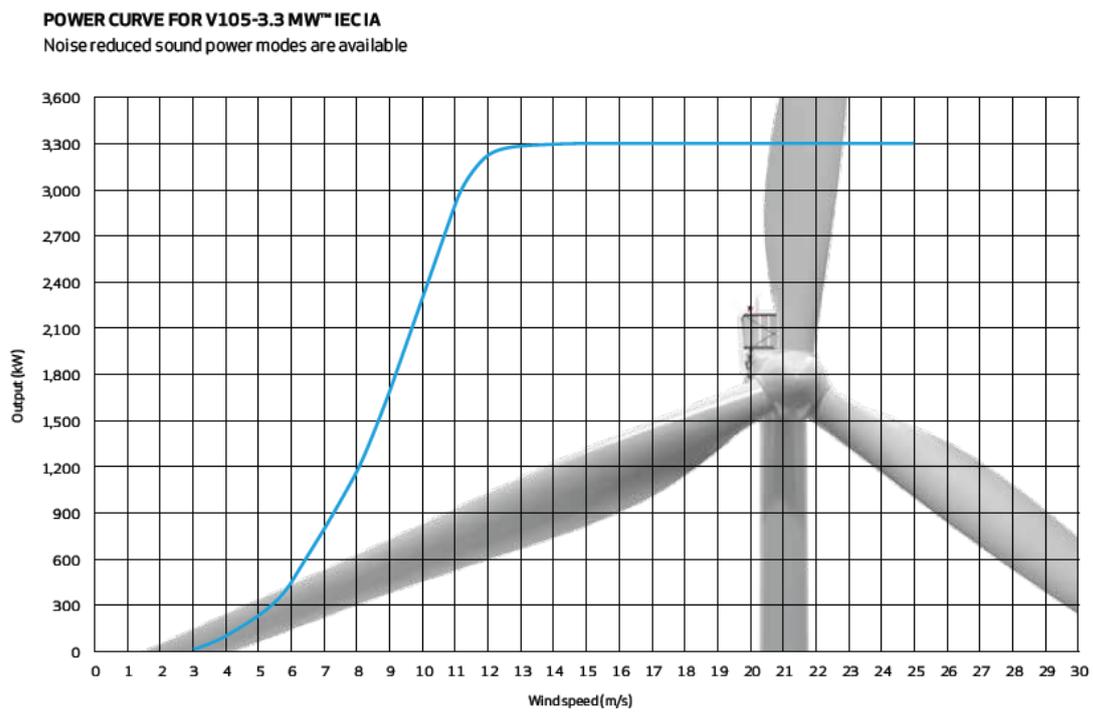


Imagen 2. VESTAS

- VESTAS 112-3.3

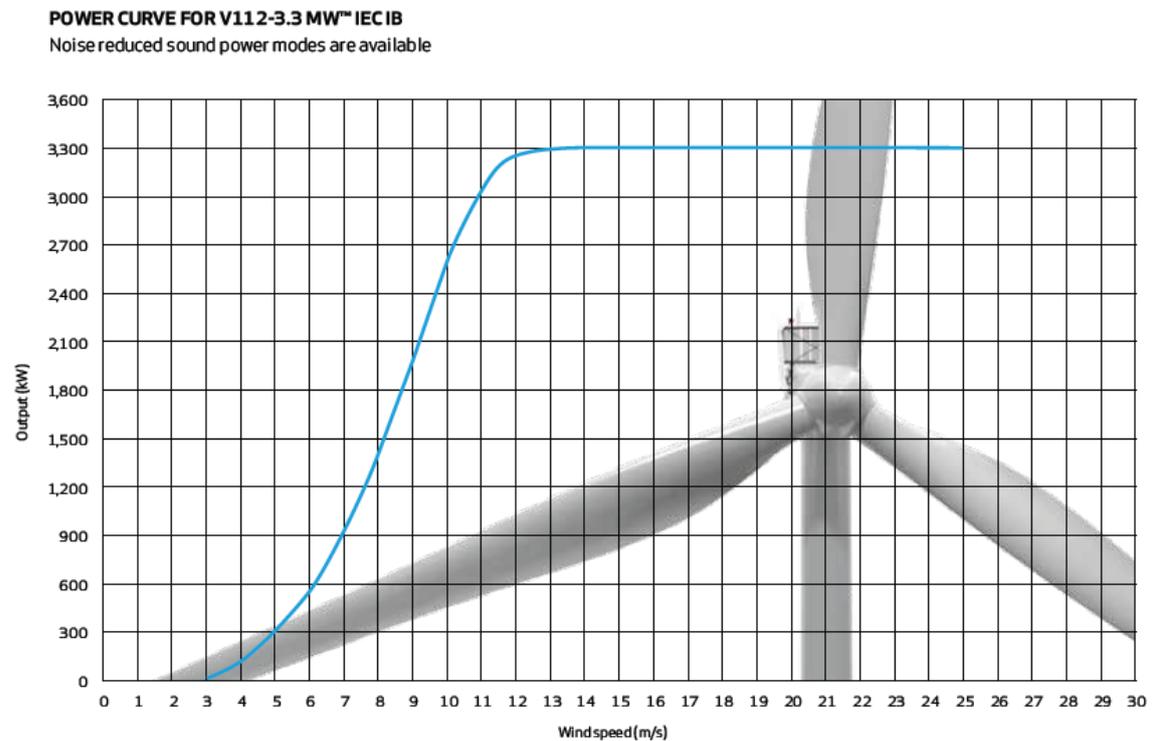


Imagen 3. VESTAS

- VESTAS 117-3.3

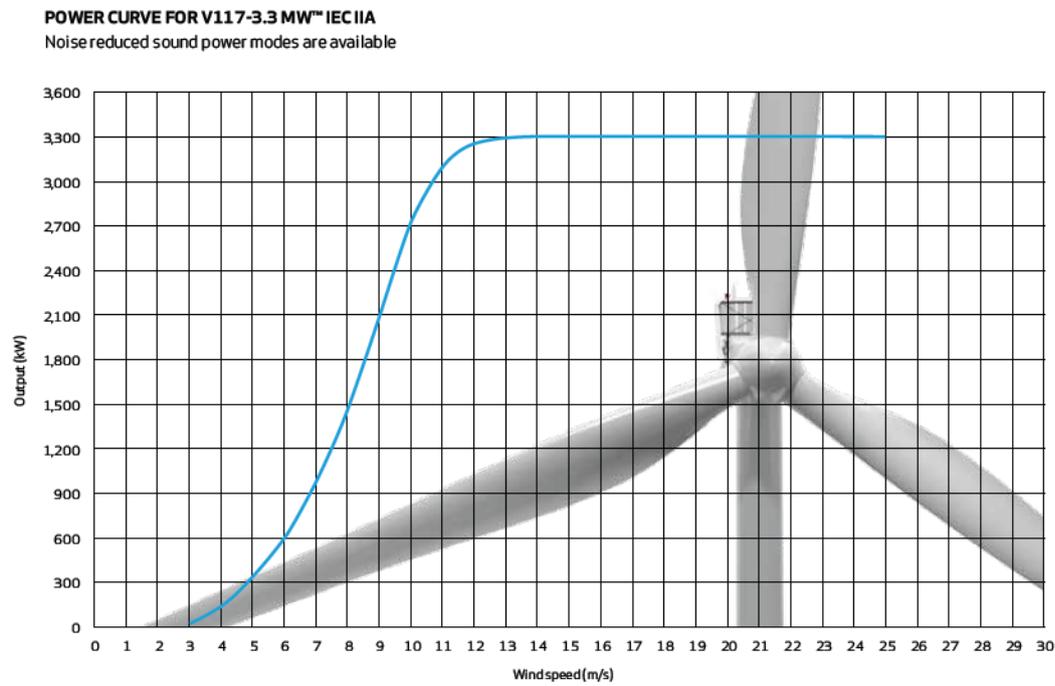


Imagen 4. VESTAS

- VESTAS 126-3.3

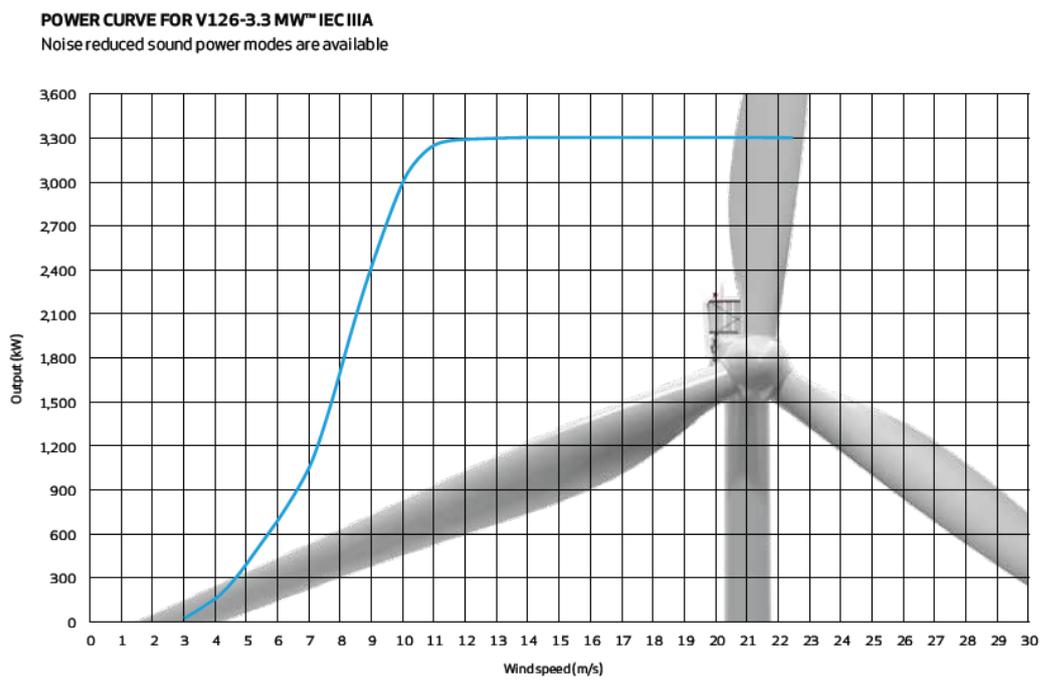


Imagen 5. VESTAS

- GAMESA G128-5.0

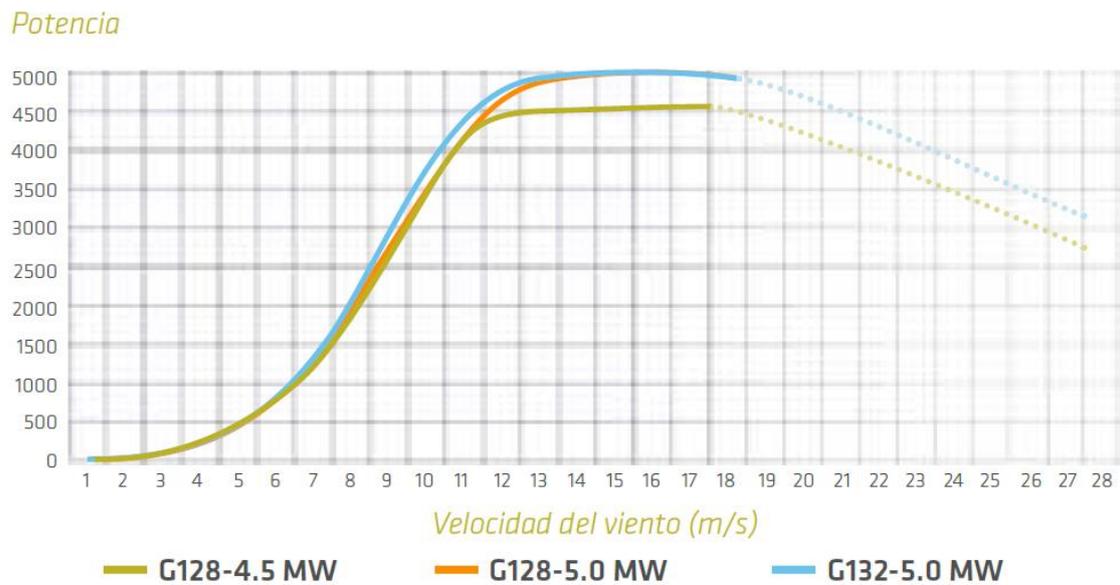


Imagen 6. GAMESA

- GAMESA G132-5.0

*Potencia*

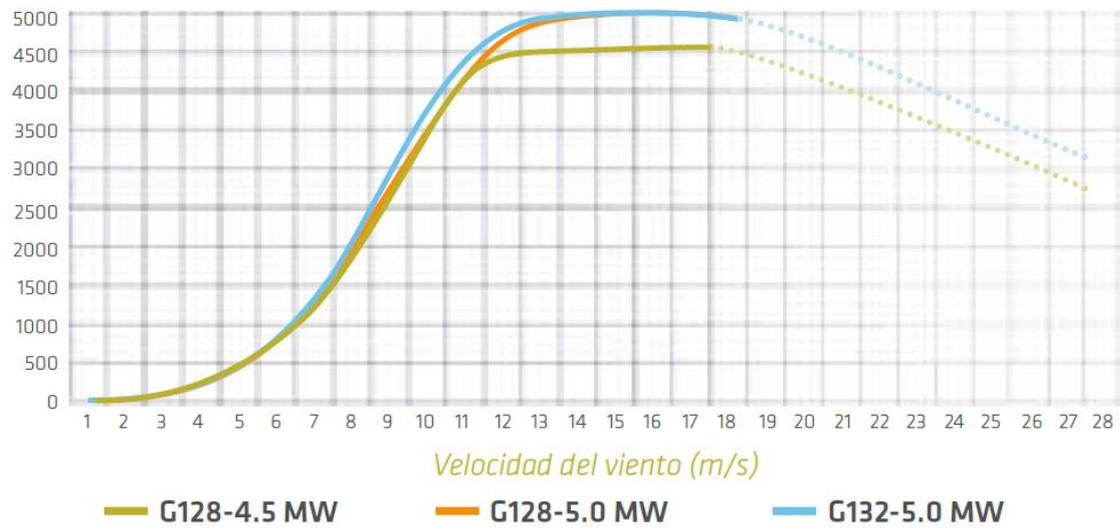


Imagen 7. GAMESA

- SIEMENS 107-3.6

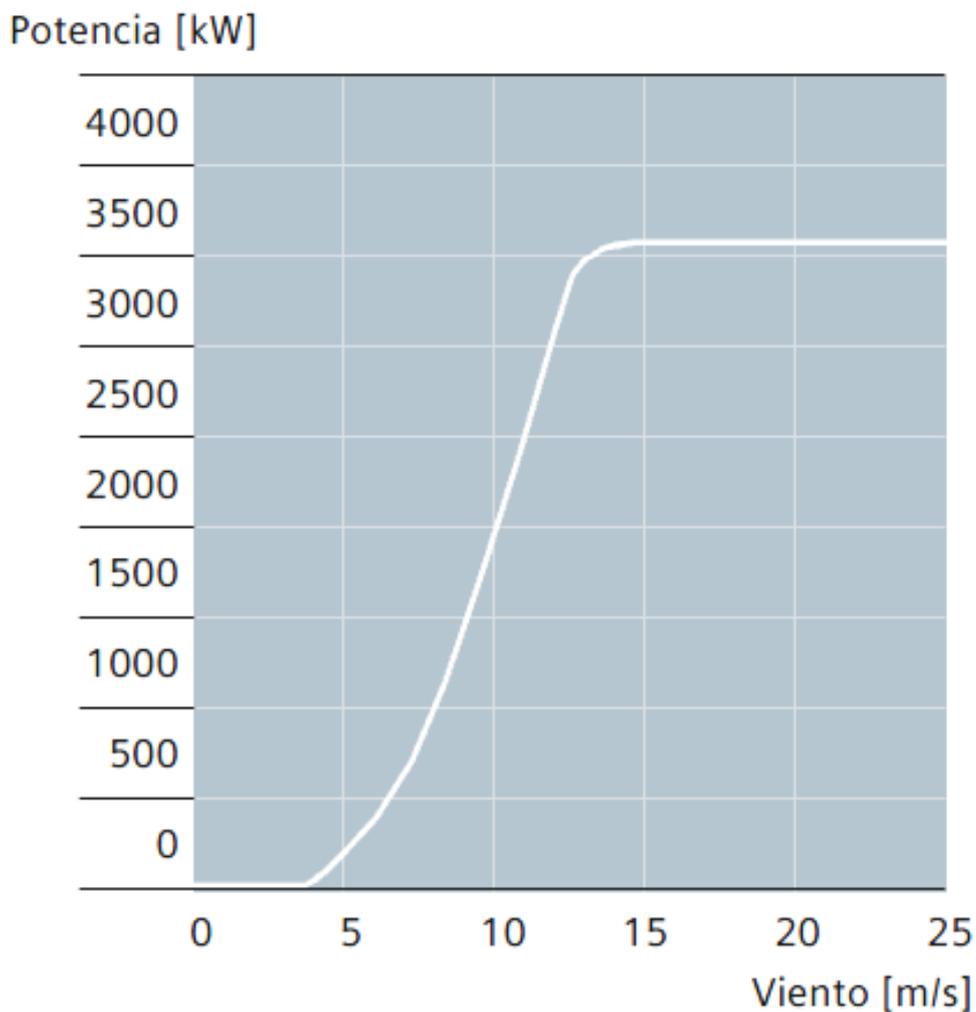


Imagen 8. SIEMENS

#### 1.4. Producción de energía

Mediante las curvas de potencia anteriores y la tabla en la que se recogen los datos de las horas al año que tenemos cada velocidad (recurso eólico) podemos obtener la potencia producida por cada aerogenerador.

PRODUCCIÓN ENERGÉTICA			
AEROGENERADOR SENVION 152-6.2 MW			
V (m/s)	P(kW)	Horas	Producción (kWh/año)
1	0	216,0	0,0
2	0	480,8	0,0
3	0	728,9	0,0
4	0	922,0	0,0
5	500	1035,3	517674,8
6	1000	1060,3	1060282,3
7	1500	1003,8	1505710,8
8	2700	885,3	2390399,9
9	4000	730,8	2923082,0
10	5000	566,1	2830565,1
11	6000	412,3	2473979,6
12	6200	282,7	1752583,9
13	6200	182,5	1131647,3
14	6200	111,0	688482,6
15	6200	63,7	394724,3
16	6200	34,4	213264,8
17	6200	17,5	108574,7
18	6200	8,4	52077,3
19	6200	3,8	23527,8
20	6200	1,6	10009,4
<b>TOTAL (kWh/año):</b>			<b>18076586,6</b>
<b>TOTAL (MWh/año):</b>			<b>18076,6</b>

Tabla 3. Potencia por aerogenerador

<b>PRODUCCIÓN ENERGÉTICA</b>			
<b>AEROGENERADOR VESTAS 105-3.3 MW</b>			
<b>V (m/s)</b>	<b>P(kW)</b>	<b>Horas</b>	<b>Producción (kWh/año)</b>
1	0	216,0	0,0
2	0	480,8	0,0
3	0	728,9	0,0
4	130	922,0	119856,5
5	270	1035,3	279544,4
6	450	1060,3	477127,0
7	830	1003,8	833160,0
8	1200	885,3	1062400,0
9	1750	730,8	1278848,4
10	2300	566,1	1302060,0
11	2800	412,3	1154523,8
12	3100	282,7	876291,9
13	3200	182,5	584076,0
14	3300	111,0	366450,4
15	3300	63,7	210095,2
16	3300	34,4	113511,9
17	3300	17,5	57789,8
18	3300	8,4	27718,6
19	3300	3,8	12522,8
20	3300	1,6	5327,6
<b>TOTAL (kWh/año):</b>			<b>8761304,2</b>
<b>TOTAL (MWh/año):</b>			<b>8761,3</b>

Tabla 4. Potencia por aerogenerador

PRODUCCIÓN ENERGÉTICA			
AEROGENERADOR VESTAS 112-3.3 MW			
V (m/s)	P(kW)	Horas	Producción (kWh/año)
1	0	216,0	0,0
2	0	480,8	0,0
3	0	728,9	0,0
4	130	922,0	119856,5
5	300	1035,3	310604,9
6	580	1060,3	614963,7
7	910	1003,8	913464,6
8	1300	885,3	1150933,3
9	1900	730,8	1388463,9
10	2600	566,1	1471893,9
11	3000	412,3	1236989,8
12	3200	282,7	904559,4
13	3300	182,5	602328,4
14	3300	111,0	366450,4
15	3300	63,7	210095,2
16	3300	34,4	113511,9
17	3300	17,5	57789,8
18	3300	8,4	27718,6
19	3300	3,8	12522,8
20	3300	1,6	5327,6
<b>TOTAL (kWh/año):</b>			<b>9507474,7</b>
<b>TOTAL (MWh/año):</b>			<b>9507,5</b>

Tabla 5. Potencia por aerogenerador

<b>PRODUCCIÓN ENERGÉTICA</b>			
<b>AEROGENERADOR VESTAS 117-3.3 MW</b>			
<b>V (m/s)</b>	<b>P(kW)</b>	<b>Horas</b>	<b>Producción (kWh/año)</b>
1	0	216,0	0,0
2	0	480,8	0,0
3	0	728,9	0,0
4	130	922,0	119856,5
5	310	1035,3	320958,4
6	600	1060,3	636169,4
7	1000	1003,8	1003807,2
8	1480	885,3	1310293,3
9	2100	730,8	1534618,0
10	2700	566,1	1528505,2
11	3100	412,3	1278222,8
12	3200	282,7	904559,4
13	3300	182,5	602328,4
14	3300	111,0	366450,4
15	3300	63,7	210095,2
16	3300	34,4	113511,9
17	3300	17,5	57789,8
18	3300	8,4	27718,6
19	3300	3,8	12522,8
20	3300	1,6	5327,6
<b>TOTAL (kWh/año):</b>			<b>10032734,8</b>
<b>TOTAL (MWh/año):</b>			<b>10032,7</b>

Tabla 6. Potencia por aerogenerador

<b>PRODUCCIÓN ENERGÉTICA</b>			
<b>AEROGENERADOR VESTAS 126-3.3 MW</b>			
<b>V (m/s)</b>	<b>P(kW)</b>	<b>Horas</b>	<b>Producción (kWh/año)</b>
1	0	216,0	0,0
2	0	480,8	0,0
3	0	728,9	0,0
4	130	922,0	119856,5
5	400	1035,3	414139,9
6	630	1060,3	667977,9
7	1100	1003,8	1104187,9
8	1700	885,3	1505066,6
9	2400	730,8	1753849,2
10	3000	566,1	1698339,1
11	3200	412,3	1319455,8
12	3300	282,7	932826,9
13	3300	182,5	602328,4
14	3300	111,0	366450,4
15	3300	63,7	210095,2
16	3300	34,4	113511,9
17	3300	17,5	57789,8
18	3300	8,4	27718,6
19	3300	3,8	12522,8
20	3300	1,6	5327,6
<b>TOTAL (kWh/año):</b>			<b>10911444,4</b>
<b>TOTAL (MWh/año):</b>			<b>10911,4</b>

Tabla 7. Potencia por aerogenerador

PRODUCCIÓN ENERGÉTICA				
AEROGENERADOR GAMESA G128-5 MW				
V (m/s)	P(kW)	Horas	Producción (kWh/año)	
1	0	216,0	0,0	
2	0	480,8	0,0	
3	200	728,9	145785,1	
4	250	922,0	230493,2	
5	500	1035,3	517674,8	
6	700	1060,3	742197,6	
7	1250	1003,8	1254759,0	
8	2000	885,3	1770666,6	
9	2750	730,8	2009618,9	
10	3500	566,1	1981395,6	
11	4250	412,3	1752402,2	
12	4600	282,7	1300304,1	
13	4800	182,5	876114,0	
14	4900	111,0	544123,3	
15	5000	63,7	318326,0	
16	5000	34,4	171987,7	
17	5000	17,5	87560,2	
18	4900	8,4	41157,9	
19	0	3,8	0,0	Parada de seguridad
20	0	1,6	0,0	
<b>TOTAL (kWh/año):</b>			<b>13744566,5</b>	
<b>TOTAL (MWh/año):</b>			<b>13744,6</b>	

Tabla 8. Potencia por aerogenerador

PRODUCCIÓN ENERGÉTICA				
AEROGENERADOR GAMESA G132-5 MW				
V (m/s)	P(kW)	Horas	Producción (kWh/año)	
1	0	216,0	0,0	
2	0	480,8	0,0	
3	200	728,9	145785,1	
4	250	922,0	230493,2	
5	500	1035,3	517674,8	
6	700	1060,3	742197,6	
7	1400	1003,8	1405330,1	
8	2100	885,3	1859199,9	
9	3000	730,8	2192311,5	
10	3750	566,1	2122923,8	
11	4400	412,3	1814251,7	
12	4750	282,7	1342705,4	
13	4900	182,5	894366,4	
14	5000	111,0	555227,9	
15	5000	63,7	318326,0	
16	5000	34,4	171987,7	
17	5000	17,5	87560,2	
18	4950	8,4	41577,8	
19	0	3,8	0,0	Parada de seguridad
20	0	1,6	0,0	
<b>TOTAL (kWh/año):</b>			<b>14441919,4</b>	
<b>TOTAL (MWh/año):</b>			<b>14441,9</b>	

Tabla 9. Potencia por aerogenerador

PRODUCCIÓN ENERGÉTICA AEROGENERADOR SIEMENS 107-3.6 MW			
V (m/s)	P(kW)	Horas	Producción (kWh/año)
1	0	216,0	0,0
2	0	480,8	0,0
3	0	728,9	0,0
4	0	922,0	0,0
5	200	1035,3	207069,9
6	300	1060,3	318084,7
7	550	1003,8	552094,0
8	1000	885,3	885333,3
9	1500	730,8	1096155,7
10	2000	566,1	1132226,0
11	2250	412,3	927742,4
12	3000	282,7	848024,4
13	3500	182,5	638833,1
14	3550	111,0	394211,8
15	3600	63,7	229194,7
16	3600	34,4	123831,2
17	3600	17,5	63043,4
18	3600	8,4	30238,4
19	3600	3,8	13661,3
20	3600	1,6	5811,9
<b>TOTAL (kWh/año):</b>			<b>7465556,4</b>
<b>TOTAL (MWh/año):</b>			<b>7465,6</b>

Tabla 10. Potencia por aerogenerador

En la siguiente tabla se reúnen todos los datos anteriores más claramente:

Fabricante	Modelo	Diámetro aspas (m)	Potencia máxima (MW)	Potencia anual (MWh/año)	Pot kWh/h
SENVION	152-6,2	152	6,2	18076,6	2063,5373
VESTAS	105-3.3	105	3,3	8761,3	1000,1489
	112-3.3	112	3,3	9507,5	1085,3282
	117-3.3	117	3,3	10032,7	1145,2894
	126-3.3	126	3,3	10911,4	1245,5987
GAMESA	G128-5	128	5	13744,6	1569,0144
	G132-5	132	5	14441,9	1648,6209
SIEMENS	107-3.6	107	3,6	7465,6	852,23246

Tabla 11. Potencias para cada aerogenerador

# ANEXO III

Cálculos para las bombas



## ÍNDICE

<b>1. Cálculo de pérdidas de carga.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Pérdidas en la conducción de captación .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Pérdidas en el pretratamiento físico .....</b>	<b>14</b>
<b>1.3. Pérdidas en la conducción de distribución.....</b>	<b>15</b>
<b>1.4. Pérdidas en la conducción de salmuera .....</b>	<b>18</b>
<b>2. Cálculo de la altura útil de las bombas .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1. Altura útil de la bomba de captación.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2. Altura útil de la bomba de distribución.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3. Altura útil de la bomba de salmuera .....</b>	<b>26</b>



## 1. Cálculo de pérdidas de carga

### 1.1. Pérdidas en la conducción de captación

A la hora de seleccionar la bomba de captación de la instalación, uno de los factores que determinará la bomba a escoger son las pérdidas de carga. Las conducciones de la captación de nuestra instalación constan de dos partes y tres tuberías como se muestra en la figura. La primera parte va desde el depósito hasta la T y la segunda va desde la T hasta el pretratamiento. El pozo de repuesto no entra en juego hasta que alguna de las bombas de los pozos 1 o 2 se averíe. En cualquier caso las pérdidas de cargas son las mismas ya que tanto las bombas como las tuberías son iguales. Las tres tuberías son las dos que van desde los depósitos hasta la T y la que unifica los caudales y va hasta el pretratamiento.

A continuación se calcularán las pérdidas de carga. Para ello se estudiará por separado las pérdidas. En primer lugar, desde el pozo 1 hasta la T. Que coincidirá con las pérdidas desde el pozo 2 hasta dicha T y del pozo de repuesto hasta la T. Y por último las pérdidas desde la T hasta el punto de pretratamiento.

El diámetro de las tuberías anteriores a la T se escogerá del menor diámetro comercial posible, este es de 300mm. En el caso de hayan demasiadas pérdidas de carga o que la velocidad del fluido sea excesivamente grande, se aumentará el diámetro hasta el siguiente comercial más cercano.

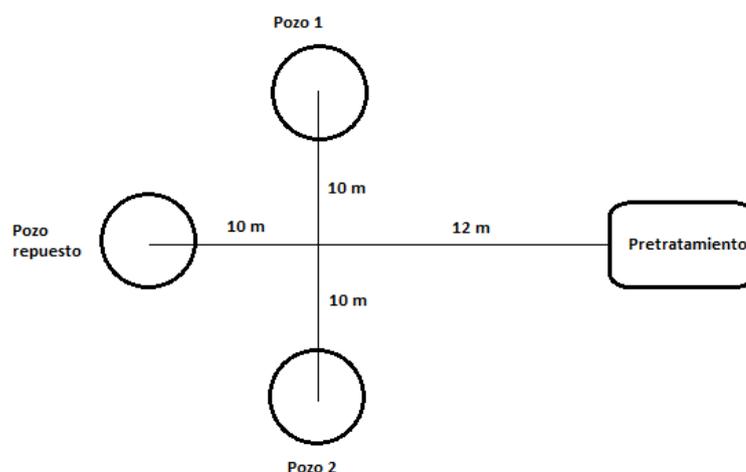


Imagen 1. Pozos

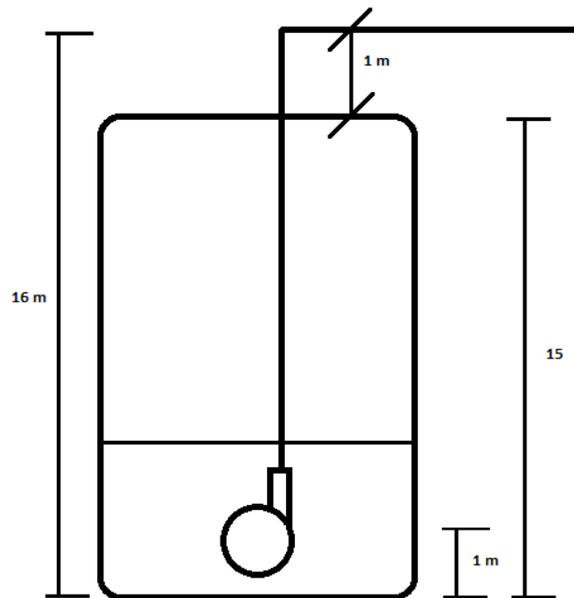


Imagen 2. Lateral pozo

- Pozo 1 – T

Datos:

-Longitud tubería = 15 + 1 + 10 = 26 m

-Diámetro tubería = 300 mm

-Caudal tubería =  $200,32 \frac{m^3}{h} = 0,0556 \frac{m^3}{s}$

Las pérdidas de carga las se calcularán con la ecuación de Darcy Weisbach.

$$Hr = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} = 0,0827 * f * L * \frac{Q^2}{D^5}$$

En primer lugar se calculará el factor de fricción. Para ello se necesita el valor del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Para calcular estos dos números de los que depende el factor de fricción, se necesitarán una serie de datos y cálculos que se resolverán a continuación.

$$Reynolds = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

$$Rugosidad\ relativa = \frac{k}{D}$$

Para obtener la densidad del agua de mar se usará su salinidad. Ésta es de 35.000 p.p.m. Es decir,  $35 \frac{Kg}{m^3}$ . Pero nuestro programa de cálculo (Winflows) da este valor más exacto según la composición química de nuestra agua, por lo tanto:

$$\rho = 1022,9 \frac{Kg}{m^3}.$$

La velocidad del fluido dependerá del caudal y de la sección de la tubería. Pudiéndose calcular con la ecuación siguiente:

$$Q = v * S$$

$$v = \frac{0,0556}{\pi * \left(\frac{0,3}{2}\right)^2} = 0,7866 \frac{m}{s}$$

El material de la tubería es poliéster reforzado por fibra de vidrio (PRFV), que según los datos del fabricante *FLOWTITE*, tiene una rugosidad de 0,029mm.

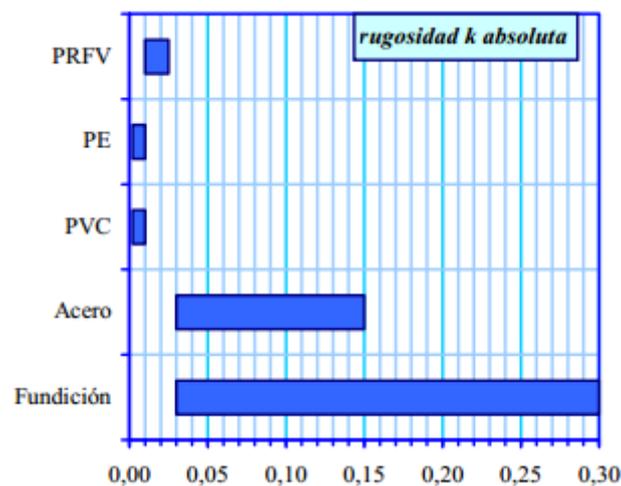


Imagen 3. Rugosidad PRFV

Por último necesitamos conocer la viscosidad dinámica del agua. Esta dependerá de la temperatura del fluido. Como comentamos anteriormente esta variará de los 16-23°C. Siendo la temperatura que se usará para los cálculos la media de 20°C. Según las tablas a 1 bar de presión:

**TABLA 4. Propiedades físicas del agua a 1 bar**

temperatura $t$ °C	densidad $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	módulo elasticidad $K \cdot 10^{-9}$ N/m <sup>2</sup>	viscosidad dinámica $\mu \cdot 10^3$ N·s/m <sup>2</sup>	viscosidad cinemática $\nu \cdot 10^6$ m <sup>2</sup> /s	tensión superficial $\sigma$ N/m	presión de vapor $p_v$ kPa
0	999,8	1,98	1,781	1,785	0,0756	0,61
5	1000,0	2,05	1,518	1,519	0,0749	0,87
10	999,7	2,10	1,307	1,306	0,0742	1,23
15	999,1	2,15	1,139	1,140	0,0735	1,70
20	998,2	2,17	1,002	1,003	0,0728	2,34
25	997,0	2,22	0,890	0,893	0,0720	3,17
30	995,7	2,25	0,798	0,800	0,0712	4,24
40	992,2	2,28	0,653	0,658	0,0696	7,38
50	988,0	2,29	0,547	0,553	0,0679	12,33
60	983,2	2,28	0,466	0,474	0,0662	19,92
70	977,8	2,25	0,404	0,413	0,0644	31,16
80	971,8	2,20	0,354	0,364	0,0626	47,34
90	965,3	2,14	0,315	0,326	0,0608	70,10
100	958,4	2,07	0,282	0,294	0,0589	101,33

Imagen 4. Tabla viscosidad dinámica

Una vez obtenidos todos los datos necesarios podemos calcular Reynolds y la viscosidad dinámica.

$$Reynolds = \frac{1022,9 * 0,7866 * 0,3}{1,002 \times 10^{-3}} = 240902,14$$

$$Rugosidad\ relativa = \frac{0,029 \times 10^{-3}}{0,3} = 9,6667 \times 10^{-5}$$

Comenzamos el cálculo del factor de fricción. Conocido que el número de Reynolds es mayor a 4000, se tendrá régimen turbulento. Por ello se usará la ecuación de Colebrook-White, que es válida para todo tipo de flujos y rugosidades, siendo la ecuación más exacta y universal. El único problema que presenta es la necesidad de realizar iteraciones para el cálculo del factor de fricción.

$$Colebrook \frac{1}{f} = -2 * \log * \left( \frac{k}{3,71D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Se elegirá el valor del coeficiente de fricción con un error menor a  $10^{-5}$ , para asegurarnos que es fiable. Mediante el programa Excel se han realizado las iteraciones necesarias, en este caso 4.

Iteración	Valor	Resultado
1	0,02	0,01562
2	0,01562	0,01594
3	0,01594	0,01591
4	0,01591	0,01591

Tabla 1. Cálculo iterativo del factor de fricción

Nuestro resultado final es de  $f=0,01591$ . Para no quedarnos con este primer resultado, se comprobará mediante el diagrama de Moody si este resultado es lógico. Para ello, con el valor del número de Reynolds y  $k/D$  obtenemos un valor aproximado de  $f$ .

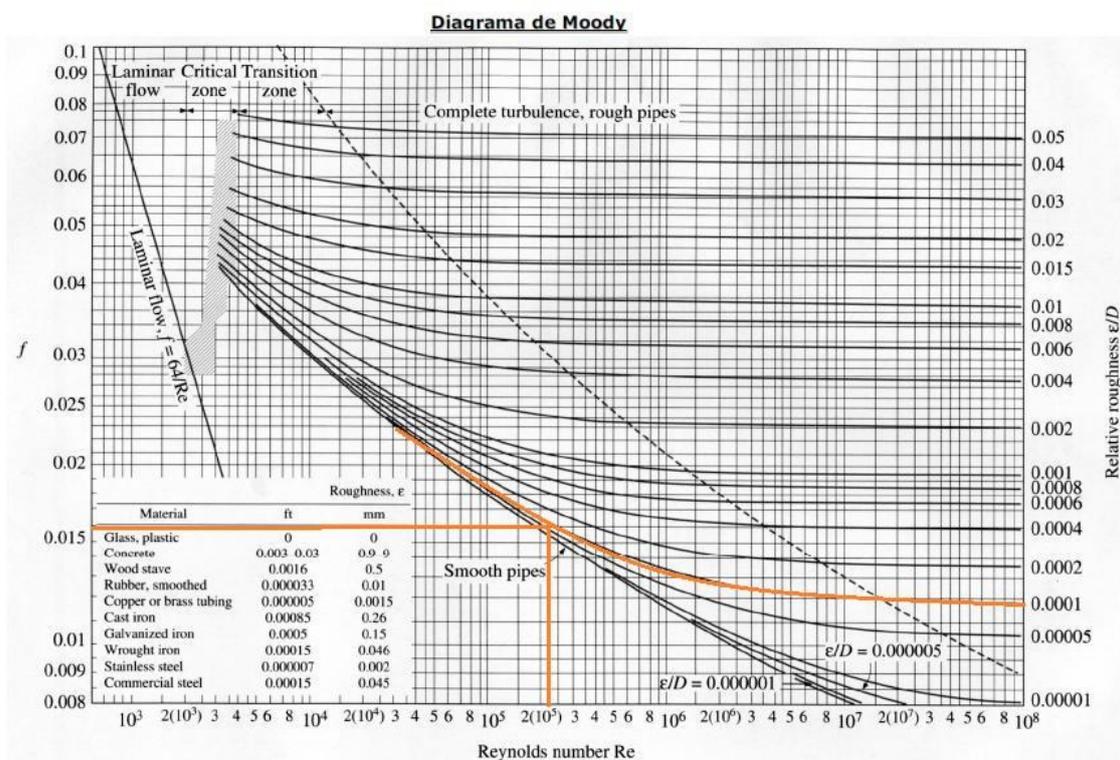


Imagen 5. Diagrama de Moody

Según el diagrama, nuestro valor será  $f=0,01590$ . Muy similar al resultado obtenido anteriormente por la ecuación de Colebrook. Por lo tanto el valor es válido.

Una vez obtenido todos los datos necesarios ya podemos calcular las pérdidas de carga en la tubería.

$$Hr = 0,0827 * 0,01591 * 26 * \frac{0,0556^2}{0,3^5}$$

$$Hr(1 - T) = 0,04359 \text{ m}$$

- Pozo 2 – T

Esta tubería tiene las mismas dimensiones, el mismo caudal y todas las propiedades de la tubería calculada anteriormente. Al igual que la tubería de repuesto. Es por ello que las pérdidas para las tres (1-T, 2-T y repuesto-T) son iguales.

$$Hr(2 - T) = 0,04359 \text{ m}$$

- Pozo repuesto – T

$$Hr(\text{Repuesto} - T) = 0,04359 \text{ m}$$

- Tubería T- Pretratamiento

El siguiente tramo a estudiar va desde la T en la que se unen los caudales de las tuberías de los pozos hasta el punto de entrada a los pretratamientos. Esta tubería tendrá un diámetro ligeramente mayor al anterior ya que debe transportar un flujo de agua dos veces mayor que las tuberías anteriores. Haciendo uso de los diámetros comerciales para tuberías de PRFV nuestro diámetro será de 350mm.

El procedimiento a seguir es el mismo que en los casos anteriores, es por ello que este apartado a continuación será una sucesión de cálculos.

Datos:

-Longitud tubería = 12 m

-Diámetro tubería = 350 mm

-Caudal tubería =  $400,64 \frac{m^3}{h} = 0,1113 \frac{m^3}{s}$

Darcy Weisbach.

$$Hr = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} = 0,0827 * f * L * \frac{Q^2}{D^5}$$

Número de Reynolds y de la rugosidad relativa.

$$Reynolds = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

$$Rugosidad\ relativa = \frac{k}{D}$$

$$\rho = 1022,9 \frac{Kg}{m^3}$$

$$Q = v * S$$

$$v = \frac{0,1113}{\pi * \left(\frac{0,35}{2}\right)^2} = 1,1568 \frac{m}{s}$$

Rugosidad de 0,029mm para PRFV según la imagen 3. Y viscosidad dinámica  $1,002 \times 10^{-3} \frac{Ns}{m^2}$  según imagen 4.

$$Reynolds = \frac{1022,9 * 1,1568 * 0,35}{1,002 \times 10^{-3}} = 413325,10$$

$$Rugosidad\ relativa = \frac{0,029 \times 10^{-3}}{0,35} = 8,2857 \times 10^{-5}$$

Reynolds es mayor a 4000, habrá régimen turbulento.

$$\text{Colebrook } \frac{1}{f} = -2 * \log * \left( \frac{k}{3,71D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Iteraciones necesarias, en este caso 5.

Iteración	Valor	Resultado
1	0,02	0,01428
2	0,01428	0,01462
3	0,01462	0,01459
4	0,01459	0,01460
5	0,01460	0,01460

Tabla 2. Cálculo iterativo del factor de fricción

Nuestro resultado final es de f=0,01460.

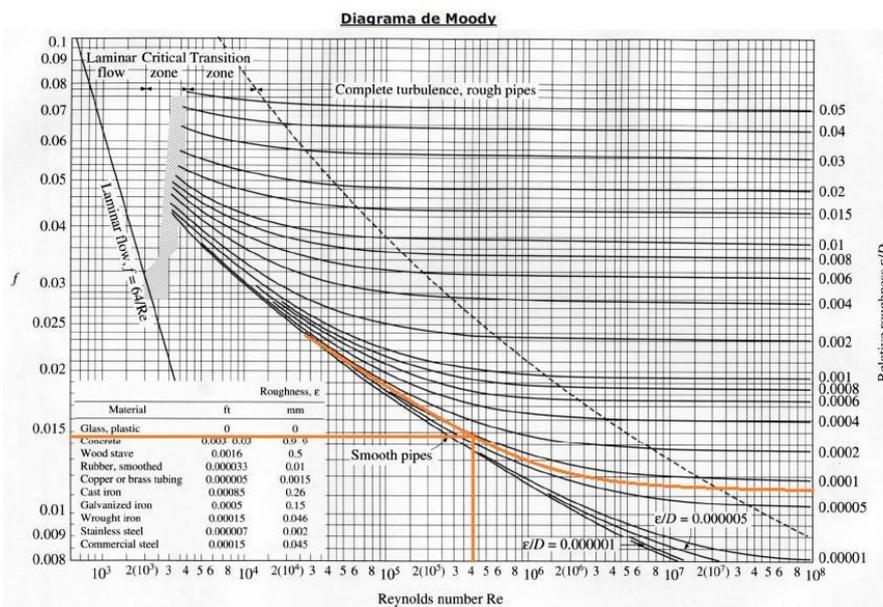


Imagen 6. Diagrama de Moody

Según el diagrama, nuestro valor será también f=0,01460.

$$Hr = 0,0827 * 0,01460 * 12 * \frac{0,1113^2}{0,35^5}$$

$$Hr(T - \text{pretratamiento}) = 0,03417 \text{ m}$$

- Pérdidas en codos y en T

Además de las pérdidas producidas en la tubería también habrán otras pérdidas debidas a singularidades de esas tuberías. Estas se producen en puntos como los codos, las T, cambios de direcciones, etc. Para calcular estas pérdidas se hará uso de la siguiente ecuación:

$$Hr = K * \frac{v^2}{2g}$$

Variando el valor de K según el tipo de singularidad. Los valores usados son los siguientes:

Singularidad	K
T	1,80
Codo a 90° con radio corto	0,9

Tabla 3. Valor de K según singularidad

En primer lugar se calcularán los codos y luego la T. En la instalación se tendrán 3 codos, uno por cada pozo. Pero en funcionamiento sólo se tendrán 2 a la vez, que serán los que se calculen. Los tres como ya se dijo antes, tendrán el mismo resultado.

Dato de codo:

-Diámetro codo = 300 mm

-Caudal codo =  $200,32 \frac{m^3}{h} = 0,0556 \frac{m^3}{s}$

-Velocidad agua =  $0,7866 \frac{m}{s}$

$$Hr = 0,9 * \frac{0,7866^2}{2 * 9,81}$$

$$Hr(codo) = 0,02838 m$$

$$Hr(2 codos) = 0,05677 m$$

Dato de T:

-Diámetro T = 350 mm

-Caudal T =  $400,64 \frac{m^3}{h} = 0,1113 \frac{m^3}{s}$

-Velocidad agua =  $1,1568 \frac{m}{s}$

$$Hr = 1,80 * \frac{1,1568^2}{2 * 9,81}$$

$$Hr(T) = 0,1228m$$

Por lo tanto, las pérdidas en la conducción de captación desde los pozos hasta la entrada del pretratamiento son:

$$Hr(\text{captación}) = (1 - T) + (2 - T) + (T - \text{pret}) + (2\text{codos}) + (T)$$

$$Hr(\text{captación}) = 0,04359 + 0,04359 + 0,03417 + 0,05677 + 0,1228 m$$

$$Hr(\text{captación}) = 0,3009 m$$

## 1.2. Pérdidas en el pretratamiento físico

Por último y para poder obtener finalmente las pérdidas de carga en el inicio de la instalación debemos conocer las pérdidas que se producen en los pretratamientos físicos al paso del fluido por los filtros de cartucho.

Mirando en la selección de filtros de cartucho del apartado de dimensionamiento del filtro en la memoria, podemos conocer que las pérdidas de presión en los filtros son de 0,75bar.

$$Hr(\text{filtro cartucho}) = 0,75 \text{ bar}$$

Conociendo que 0,98bar corresponde a 10 metros columna de agua. La pérdida será de:

$$H_r (\text{filtro de cartucho}) = 7,75 \text{ m}$$

### 1.3. Pérdidas en la conducción de distribución

Los datos necesarios para el cálculo de las pérdidas de carga a la salida del agua producto hasta el depósito son los siguientes.

Caudal: Será la mitad del total del producto teniendo en cuenta que son dos tuberías, de  $2500 \frac{m^3}{día}$ , que son  $104,17 \frac{m^3}{h}$  y  $0,0289 \frac{m^3}{s}$ .

Longitud del tramo: desde la instalación hasta el depósito, será de unos 25,69 km. Como se especifica en el apartado de “Sistema de distribución”.

Diámetro de tubería: el menor diámetro comercial para comenzar, 300 mm. Una vez calculado la pérdida de carga con este diámetro se cambiará por uno mayor y se estudiarán ambos resultados para elegir el mejor.

Material: PRFV, como en todas las tuberías de la instalación.

Cota: el depósito estará a una elevación de 30,44 m (con respecto al nivel del mar).

En primer lugar se calculará el factor de fricción. Para ello se necesita el valor del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Para calcular estos dos números de los que depende el factor de fricción se abordarán los pasos seguidos en los anteriores cálculos de pérdidas de carga.

$$Reynolds = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

$$Rugosidad\ relativa = \frac{k}{D}$$

El agua producto tiene la densidad propia del agua pura, por lo tanto:

$$\rho = 1000 \frac{Kg}{m^3}$$

La velocidad del fluido dependerá del caudal y de la sección de la tubería. Pudiéndose calcular con la ecuación siguiente:

$$Q = v * S$$

$$v = \frac{0,0289}{\pi * \left(\frac{0,3}{2}\right)^2} = 0,4093 \frac{m}{s}$$

El material de la tubería es poliéster reforzado por fibra de vidrio (PRFV), que según los datos del fabricante FLOWTITE, tiene una rugosidad de 0,029mm (imagen 3).

Por la viscosidad dinámica del agua dependerá de la temperatura del fluido siendo la media de 20°C. Según la imagen 4, la viscosidad dinámica será  $1,002 \times 10^{-3} \frac{Ns}{m^2}$ .

Una vez obtenidos todos los datos necesarios podemos calcular Reynolds y la viscosidad dinámica.

$$Reynolds = \frac{1000 * 0,4093 * 0,3}{1,002 \times 10^{-3}} = 122557,6598$$

$$Rugosidad\ relativa = \frac{0,029 \times 10^{-3}}{0,3} = 9,6667 \times 10^{-5}$$

Comenzamos el cálculo del factor de fricción. Conocido que el número de Reynolds es mayor a 4000, habrá régimen turbulento. Por ello se usará la ecuación de Colebrook-White, que es válida para todo tipo de flujos y rugosidades, siendo la ecuación más exacta y universal. El único problema que presenta es la necesidad de realizar iteraciones para el cálculo del factor de fricción.

$$Colebrook \quad \frac{1}{f} = -2 * \log * \left( \frac{k}{3,71D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Se elegirá el valor del coeficiente de fricción con un error menor a  $10^{-5}$ , para asegurarnos que es fiable. Mediante el programa Excel se han realizado las iteraciones necesarias, en este caso 4.

Iteración	Valor	Resultado
1	0,02	0,01762
2	0,01762	0,01784
3	0,01784	0,01782
4	0,01782	0,01782

Tabla 4. Cálculo iterativo del factor de fricción

Nuestro resultado final es de  $f=0,01782$ . Para no quedarnos con este primer resultado, se comprueba mediante el diagrama de Moody si este resultado es lógico. Para ello, con el valor del número de Reynolds y  $k/D$  obtenemos un valor aproximado de  $f$ , como se ha hecho en los casos anteriores.

Según el diagrama, nuestro valor será aproximadamente de  $f=0,01780$ . Muy similar al resultado obtenido anteriormente por la ecuación de Colebrook. Por lo tanto el valor es válido.

Una vez obtenido todos los datos necesarios ya podemos calcular las pérdidas de carga en la tubería.

$$Hr = 0,0827 * 0,01782 * 25690 * \frac{0,0289^2}{0,3^5} = 13,01 \text{ m}$$

$$Hr(\text{distribución}) = 13,01 \text{ m} = 1,28 \text{ bar}$$

Las pérdidas de carga son elevadas, por lo tanto vamos a estudiar una serie de casos, variando el diámetro de la tubería.

Diámetro tubería (mm)	Factor de fricción	Velocidad (m/s)	Pérdidas de carga (m)
300	0,01782	0,4093	13,04
350	0,01826	0,3007	6,18
400	0,01868	0,2303	3,24

Tabla 5. Elección diámetro de tubería

Finalmente se escogerá la tubería de 350mm de diámetro por tener una pérdida de carga reducida, con respecto a la tubería de 300mm y relativamente cercanas a las de 400. Y una velocidad del flujo conveniente.

$$Hr(\text{distribución}) = 6,18 \text{ m} = 0,61 \text{ bar}$$

#### 1.4. Pérdidas en la conducción de salmuera

Los datos necesarios para el cálculo de las pérdidas de carga de la salmuera son:

Caudal: Será la mitad del total, teniendo en cuenta que son dos tuberías de  $192,4 \frac{m^3}{h}$  es decir,  $0,0534 \frac{m^3}{s}$ .

Longitud del tramo: desde la instalación hasta el depósito, será de unos 2,5 km. Como se especifica en el apartado de “Eliminación de la salmuera”.

Diámetro de tubería: el menor diámetro comercial para comenzar, 300 mm. Una vez calculado la pérdida de carga con este diámetro se cambiará por uno mayor y se estudiarán ambos resultados para elegir el mejor.

Material: PRFV, como en todas las tuberías de la instalación.

Cota: Según los datos del IEO la isóbata más cercana es de 25 metros por debajo del nivel del mar. Por lo tanto se estima una profundidad de 20 metros.

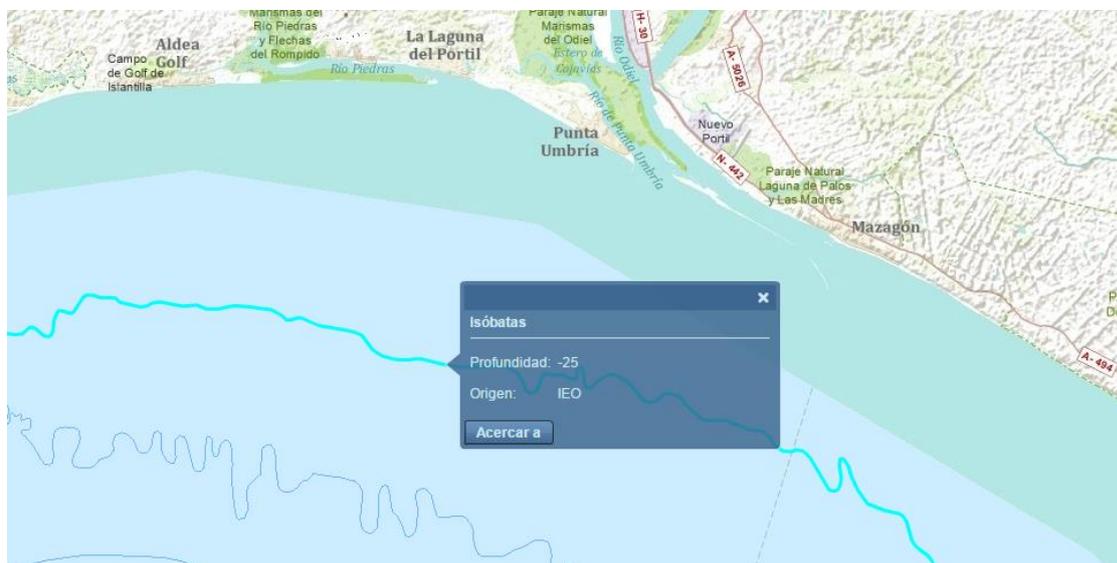


Imagen 7. Isóbata

La cota de la bomba está a 2,62 m, a la misma altura que la instalación e igualmente con respecto al nivel del mar. Datos obtenidos del servicio de mapas web (WMS) de la página oficial de la Junta de Andalucía.

En primer lugar se calculará el factor de fricción. Para ello se necesita el valor del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Para calcular estos dos números de los que depende el factor de fricción se abordarán los pasos seguidos en los anteriores cálculos de pérdidas de carga.

$$Reynolds = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

$$Rugosidad\ relativa = \frac{k}{D}$$

La salmuera tiene la densidad mayor al agua de alimentación, debemos calcularla:

$$\rho(\text{Agua alimentación}) = 1000 \frac{Kg}{m^3}.$$

$$Ca(\text{Concentración agua alimentación}) = 35000 \text{ ppm}$$

$$R(\text{conversión de las membranas}) = 52\%$$

$$Cr = \frac{Ca}{(1-R)}$$

$$Cr = \frac{35000 \text{ ppm}}{(1-0,52)} = 72916,67 \text{ ppm}$$

Esto indica que por cada litro de salmuera habrá 72916,67 mg de sales. De una manera más redondeada la densidad de la salmuera es de  $1073 \frac{Kg}{m^3}$ .

La velocidad del fluido dependerá del caudal y de la sección de la tubería. Pudiéndose calcular con la ecuación siguiente:

$$Q = v * S$$

$$v = \frac{0,0534}{\pi * \left(\frac{0,3}{2}\right)^2} = 0,7555 \frac{m}{s}$$

El material de la tubería es poliéster reforzado por fibra de vidrio (PRFV), que según los datos del fabricante FLOWTITE, tiene una rugosidad de 0,029mm (imagen 3).

Por la viscosidad dinámica del agua dependerá de la temperatura del fluido siendo la media de 20°C, se seguirá usando este dato. Será de  $1,0002 \times 10^{-3} \frac{Ns}{m^2}$  según la imagen 4.

Una vez obtenidos todos los datos necesarios podemos calcular Reynolds y la viscosidad dinámica.

$$Reynolds = \frac{1073 * 0,7561 * 0,3}{1,002 \times 10^{-3}} = 242897,7$$

$$Rugosidad\ relativa = \frac{0,029 \times 10^{-3}}{0,3} = 9,6667 \times 10^{-5}$$

Comenzamos el cálculo del factor de fricción. Conocido que el número de Reynolds es mayor a 4000, habrá régimen turbulento. Por ello se usará la ecuación de Colebrook-White, que es válida para todo tipo de flujos y rugosidades, siendo la ecuación más exacta y universal. El único problema que presenta es la necesidad de realizar iteraciones para el cálculo del factor de fricción.

$$Colebrook \quad \frac{1}{f} = -2 * \log * \left( \frac{k}{3,71D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Se elegirá el valor del coeficiente de fricción con un error menor a  $10^{-5}$ , para asegurarnos que es fiable. Mediante el programa Excel se han realizado las iteraciones necesarias, en este caso 4.

Iteración	Valor	Resultado
1	0,02	0,01560
2	0,01560	0,01592
3	0,01592	0,01589
4	0,01589	0,01589

Tabla 6. Cálculo iterativo del factor de fricción

Nuestro resultado final es de  $f=0,01589$ . Para no quedarnos con este primer resultado, se comprobará mediante el diagrama de Moody si este resultado es lógico. Para ello, con el valor del número de Reynolds y  $k/D$  obtenemos un valor aproximado de  $f$ , como se ha hecho en los casos anteriores.

Según el diagrama, nuestro valor será aproximadamente de  $f=0,01600$ . Muy similar al resultado obtenido anteriormente por la ecuación de Colebrook. Por lo tanto el valor es válido.

Una vez obtenido todos los datos necesarios ya podemos calcular las pérdidas de carga en la tubería.

$$Hr = 0,0827 * 0,01589 * 2500 * \frac{0,0534^2}{0,3^5} = 3,8622 \text{ m}$$

Las pérdidas de carga no son elevadas, por ello no vamos a estudiar distintos diámetros de tubería.

$Hr(\text{salumuera}) = 3,8622 \text{ m} = 0,4 \text{ bar}$
---

## 2. Cálculo de la altura útil de las bombas

Para el dimensionado de las bombas de captación y la de alta presión se necesitarán una serie de datos dependiendo de la bomba. Dentro de esos datos está la altura útil que es la que debe dar la bomba al fluido para que llegue al punto del núcleo de desalación un flujo determinado de agua, habiendo superado las pérdidas en las tuberías y los pretratamientos.

Para el cálculo de la altura útil se realizará un balance de energía entre la bomba y el punto final, de los que se conocen los caudales y las alturas manométricas. La ecuación del balance quedará de la siguiente forma:

$$H_{bomba} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) + Hr(\text{captación})$$

A continuación se lleva a cabo su cálculo.

### 2.1. Altura útil de la bomba de captación

Para el cálculo de la altura de las bombas de captación se usarán los siguientes datos:

- Pérdidas de carga en captación

Será la suma de las pérdidas debidas a las conducciones más las pérdidas en los pretratamientos físicos (filtros de cartucho).

$$Hr(\text{captación}) = 7,75 + 0,3009 = 8,0509m$$

- Cotas de la bomba y del núcleo de desalación

Para abordar los cálculos se tomará como cota 0 la posición de la bomba. Por lo tanto la altura del núcleo de desalación será la distancia desde la bomba hasta el nivel donde las tuberías alcanzan la superficie y luego a pesar de que no hay desnivel en la superficie donde se encontrará la planta desaladora, se tomará un ligero desnivel del 2% para evitar posibles fallos desde la salida de los pretratamientos hasta el núcleo de desalación. Y por último la longitud de la tubería desde el pretratamiento hasta el núcleo de desalación es de 50 metros. Con esto calculamos la cota del núcleo.

$$tg\varphi = 0,02$$

$$\varphi = 1,1458$$

$$\sin\varphi = \frac{Cota}{50\ m}$$

$$Cota = 0,9998\ m = 1\ m$$

De manera explicativa se adjunta el siguiente esquema. Hay que tener especial cuidado con las cotas ya que la bomba está a 1 metro de altura del fondo del pozo, por ello la distancia desde la bomba hasta la salida de las tuberías son 15 metros. Luego hasta el pretratamiento no se tiene en cuenta ningún desnivel.

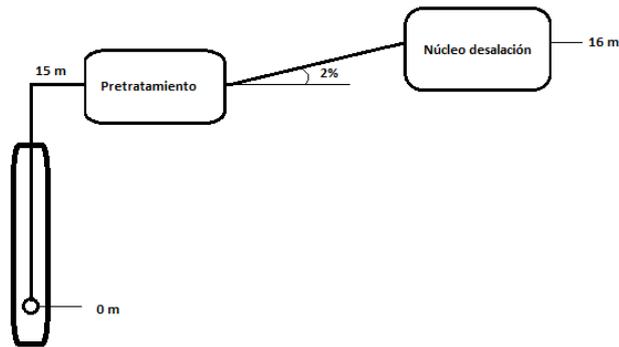


Imagen 8. Cotas

Por lo tanto, la cota del núcleo es de 15+1, es decir, 16 m.

- Presión de entrada en el núcleo de desalación

La entrada a nuestro núcleo de desalación se especifica en el programa que es de 2,76bar.

- Peso específico del agua de alimentación

$$\gamma = \rho * g$$

$$\gamma = 1022,9 * 9,81$$

$$\gamma = 10034,65 \frac{kg}{m^2 * s^2}$$

Por lo tanto ya se tienen todos los datos necesarios para el cálculo. Se considerará que la presión en el pozo de captación es la atmosférica por ello no se tendrá en cuenta, y que despreciamos la aportación de la energía cinética por no haber un cambio importante de velocidad a lo largo de la conducción.

$$H_{bomba} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) + H_r(\text{captación})$$

$$H_{bomba} = \frac{276000 Pa}{10034,65 \frac{kg}{m^2 * s^2}} + (16 - 0) + 8,0509 m$$

$$H_{bomba} = 51,56 m$$

## 2.2. Altura útil de la bomba de distribución

Se usarán dos bombas para mover el agua desde la instalación hasta el depósito. Estas bombas serán las encargadas de enviar el agua producto hasta el depósito de almacenamiento. Los datos característicos que se usarán para calcular la altura son los respectivos a una bomba:

- Cota

La cota del depósito se encuentra a 30,44 m con respecto al nivel del mar. Mientras que la cota de la bomba está a 2,62 m, a la misma altura que la instalación e igualmente con respecto al nivel del mar. Datos obtenidos del servicio de mapas web (WMS) de la página oficial de la Junta de Andalucía.



Imagen 9. Cota depósito

- Pérdidas de carga de la conducción de distribución

$$Hr(\text{distribución}) = 6,18 \text{ m} = 0,61 \text{ bar}$$

- Presiones

El depósito no tendrá presión y la presión a la entrada de la bomba la suponemos casi nula. Además, el programa WINFLOWS especifica que es 0 bar.

Ions, mg/l		Product	Concentrate	1st Pass Conc. After ERI
Flow	m3/day	4999.75	4621.68	4621.68
Temperature	C	20.00	20.00	20.00
Pressure	bar	0.00	2.03	2.03
Osm. Pressure	bar	0.16	54.18	54.18
pH		5.30	6.91	6.91
Conductivity at 25C	μS/cm	392.00	95973.00	95973.00

Imagen 10. Presión final agua producto

- Peso específico del agua producto:

$$\gamma = \rho * g$$

$$\gamma = 1000 * 9,81$$

$$\gamma = 9810 \frac{kg}{m^2 * s^2}$$

- Velocidad

Siendo el caudal la mitad del total producido ya que habrán dos canalizaciones y que debido a que es una tubería bastante grande habrá una variación de la velocidad entre la entrada y la salida. Esta variación se supondrá que es del 5%. Las velocidades de entrada y salida serán:

$$Q = v * S$$

$$v, \text{ entrada} = \frac{0,0289}{\pi * \left(\frac{0,35}{2}\right)^2} = 0,3007 \frac{m}{s}$$

$$v, \text{ salida} = 0,3007 * 0,95 = 0,2857 \frac{m}{s}$$

Por lo tanto ya se tienen todos los datos necesarios para el cálculo.

$$H_{bomba} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) + H_r(\text{distribución})$$

$$H_{bomba} = \frac{0,3007^2 - 0,2857^2}{2 * 9,81} + (30,44 - 2,62) + 6,18$$

$$H_{bomba, \text{ distribución}} = 34 \text{ m}$$

### 2.3. Altura útil de la bomba de salmuera

Según los datos del IEO la isóbata más cercana es de 25 metros por debajo del nivel del mar. Por lo tanto se estimará una profundidad de 20 metros.

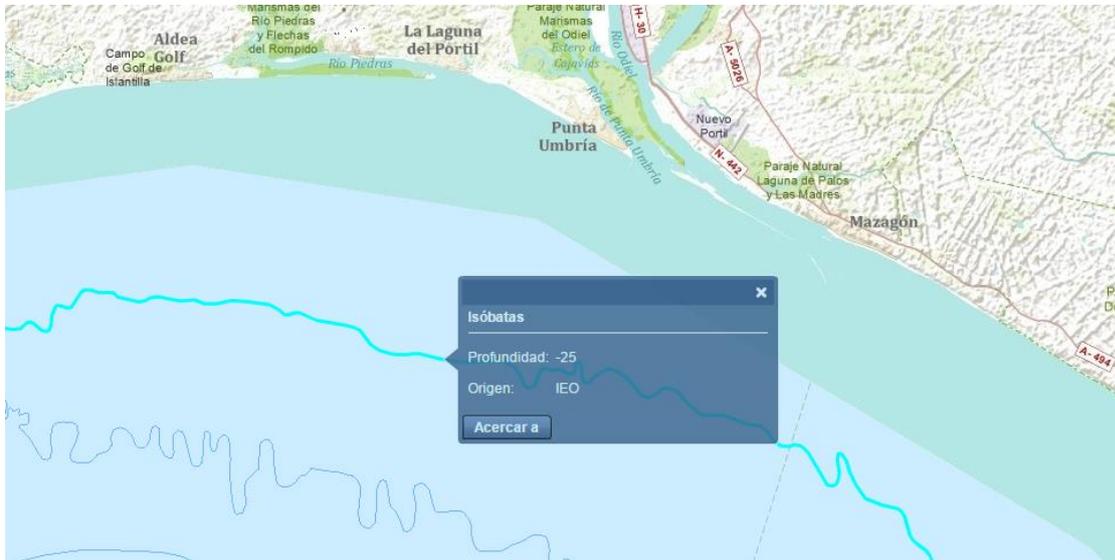


Imagen 11. Isóbata

La cota de la bomba está a 2,62 m, a la misma altura que la instalación e igualmente con respecto al nivel del mar. Datos obtenidos del servicio de mapas web (WMS) de la página oficial de la Junta de Andalucía.

Se usará una bomba para mover el agua desde la instalación hasta el mar. Los datos característicos que se usarán para calcular la altura son los respectivos a una bomba:

- Cota

La cota del emisario se encuentra a una profundidad de 20 m. Mientras que la cota de la bomba está a 2,62 m, a la misma altura que la instalación

- Pérdidas de carga de la conducción de salmuera

$$Hr(\text{salmuera}) = 3,8622 \text{ m} = 0,4 \text{ bar}$$

- Presiones

Por cada 10 metros de agua se estima 1 bar de presión, por lo tanto a la salida del emisario se estimará de 2 bar de presión.

Y según los cálculos obtenidos en el apartado de “dimensionamiento del recuperador de energía” la salmuera abandona el núcleo de desalación a 2,2 bar.

- Peso específico de la salmuera:

$$\gamma = \rho * g$$

$$\gamma = 1073 * 9,81$$

$$\gamma = 10526,13 \frac{kg}{m^2 * s^2}$$

- Velocidad

Debido a que es una tubería bastante grande habrá una variación de la velocidad entre la entrada y la salida. Esta variación se supondrá que es del 5%. Las velocidades de entrada y salida serán:

$$Q = v * S$$

$$v, entrada = \frac{0,0534}{\pi * \left(\frac{0,3}{2}\right)^2} = 0,7555 \frac{m}{s}$$

$$v, salida = 0,7555 * 0,95 = 0,7177 \frac{m}{s}$$

Por lo tanto ya se tienen todos los datos necesarios para el cálculo.

$$H_{bomba} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) + H_r(salmuera)$$

$$H_{bomba} = \frac{200000 - 220000 Pa}{10526,13 \frac{kg}{m^2 * s^2}} + \frac{0,7555^2 - 0,7177^2}{2 * 9,81} + (-20 - 2,62) + 3,8622 m$$

$H_{bomba, distribución} = -20,65 m$
--------------------------------------

Esto implica que la salmuera no necesita bomba porque ya tiene presión suficiente como para llegar al final del recorrido sin problema.

