



**Universidad  
de La Laguna**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN  
ALIMENTADO CON ENERGÍA EÓLICA PARA  
PRODUCCIÓN DE AGUA DESTINADA A USO  
AGRÍCOLA**

**AUTOR: Víctor Pérez Santana**

**TUTOR: Vicente José Romero Ternero**



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

# **ÍNDICE GENERAL**

## **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO CON ENERGÍA  
EÓLICA PARA PRODUCCIÓN DE AGUA DESTINADA A USO AGRÍCOLA**

**AUTOR: Víctor Pérez Santana**

**TUTOR: Vicente José Romero Ternero**



## MEMORIA

<b>1. Objeto.....</b>	<b>1</b>
1.1. Abstract .....	2
<b>2. Alcance .....</b>	<b>3</b>
<b>3. Antecedentes .....</b>	<b>5</b>
3.1. Situación de los recursos hídricos a nivel mundial .....	5
3.2. Situación hidrológica en Canarias .....	9
3.3. Evolución de la desalación en Canarias y en la isla de Tenerife .....	11
3.4. Desalación de agua de mar .....	14
3.4.1. Procesos de desalación de aguas .....	14
3.4.2. Comparativa de las tecnologías de desalación .....	19
3.4.3. Características básicas del agua a desalar.....	19
3.4.4. Configuración de la planta desaladora de ósmosis inversa .....	24
3.4.5. Captación del agua de mar.....	26
3.4.6. Pretratamiento.....	29
3.4.7. Postratamiento.....	32
3.4.8. Núcleo de desalación .....	32
3.4.9. Sistema de distribución .....	39
3.4.10. Salmuera.....	39
3.5 Energía eólica .....	40
3.5.1. El viento.....	41
3.5.2. Aerogenerador .....	42
<b>4. Normativa y referencias .....</b>	<b>44</b>
4.1 Disposiciones legales y normativa aplicable .....	44
4.2 Bibliografía.....	45
4.3 Programas de cálculo y herramientas empleadas .....	46
<b>5. Definiciones y abreviaturas .....</b>	<b>47</b>
5.1. Definiciones .....	47
5.2. Abreviaturas .....	47
<b>6. Requisitos de diseño .....</b>	<b>48</b>
6.1 Datos del peticionario .....	48

<b>6.2. Emplazamiento .....</b>	<b>49</b>
<b>6.3. Capacidad de la planta .....</b>	<b>63</b>
6.3.1 Condiciones de estudio .....	65
6.3.2 Determinación de la demanda hídrica .....	67
6.3.3 Cálculo de la producción .....	70
<b>6.4. Datos de partida .....</b>	<b>74</b>
6.4.1. Temperatura del agua de alimentación .....	74
6.4.2. Composición del agua de alimentación .....	75
6.4.3. Límites establecidos para el agua producto.....	76
<b>7. Análisis de soluciones.....</b>	<b>77</b>
<b>7.1. Sistema de captación de agua de mar .....</b>	<b>78</b>
7.1.1. Toma de agua cerrada (pozos).....	78
7.1.2. Toma de agua abierta (superficial).....	78
7.1.3. Solución adoptada para la captación de agua de mar .....	78
<b>7.2. Pretratamiento y Postratamiento .....</b>	<b>80</b>
7.2.1. Pretratamiento físico.....	80
7.2.2. Pretratamiento químico .....	81
7.2.2. Postratamiento.....	82
<b>7.3. Bastidor de ósmosis inversa.....</b>	<b>82</b>
7.3.1. Elección del modelo de membranas .....	83
7.3.2. Número de etapas.....	84
7.3.3 Conversión.....	85
7.3.4. Selección de la configuración y número total de membranas.....	85
<b>7.4. Selección del sistema de recuperación de energía .....</b>	<b>87</b>
7.4.1. Sistema de recuperación de energía.....	87
7.4.2. Comparativa entre los sistemas de recuperación de energía .....	89
7.4.3. Dimensionado del sistema de recuperación de energía .....	90
<b>7.5. Sistema de tuberías .....</b>	<b>92</b>
7.5.1. Material de las tuberías.....	92
7.5.2. Tubería de captación.....	93
7.5.3. Colector principal .....	93
7.5.4. Tuberías de distribución.....	94
7.5.5. Tubería del sistema de rechazo de salmuera.....	95
7.5.6. Resumen de los sistemas de tuberías .....	96
<b>7.6. Depósito de regulación y de cabecera.....</b>	<b>97</b>

<b>7.7. Dimensionado de las bombas de la instalación .....</b>	<b>97</b>
7.7.1. Selección de la bomba booster .....	98
7.7.2. Selección de la bomba de alta presión.....	99
7.7.3. Selección de la bomba de captación.....	100
7.7.4. Selección de la bomba previa al postratamiento.....	101
7.7.5. Selección de la bomba de distribución .....	103
7.7.6. Selección de la bomba de rechazo .....	104
<b>7.8. Resultados obtenidos de las bombas y consumo específico.....</b>	<b>104</b>
<b>7.9. Alternativas de gestión de la salmuera .....</b>	<b>106</b>
7.9.1. Tratamiento de salmuera mediante un sistema de vertido cero .....	106
7.9.2. Inyección profunda .....	107
7.9.3. Balsas de evaporación .....	107
7.9.4. Uso de la salmuera para producir zumos concentrados.....	107
<b>7.10. Dimensionado del sistema eólico.....</b>	<b>107</b>
7.10.1 Determinación del recurso eólico .....	107
7.10.2 Emplazamiento del aerogenerador.....	109
7.10.3 Selección del aerogenerador.....	110
<b>7.11. Abastecimiento de la EDAM .....</b>	<b>114</b>
<b>7.12. Sistema de aprovechamiento energético .....</b>	<b>114</b>
<b>8. Resultados finales .....</b>	<b>115</b>
<b>8.1. Ubicación y finalidad de la planta .....</b>	<b>115</b>
<b>8.2. Sistema de captación y colector principal.....</b>	<b>116</b>
<b>8.3. Pretratamiento.....</b>	<b>117</b>
8.3.1. Pretratamiento físico.....	117
8.3.2. Pretratamiento químico .....	117
<b>8.4. Núcleo de desalación.....</b>	<b>117</b>
<b>8.5. Postratamiento .....</b>	<b>118</b>
<b>8.6. Bomba previa al postratamiento .....</b>	<b>118</b>
<b>8.7. Sistema de distribución .....</b>	<b>118</b>
<b>8.8. Depósito de regulación y de cabecera.....</b>	<b>118</b>
<b>8.9. Rechazo de salmuera.....</b>	<b>119</b>
<b>8.10. Alternativas de gestión de la salmuera y solución adoptada.....</b>	<b>119</b>
<b>8.11. Sistema de abastecimiento de la EDAM .....</b>	<b>119</b>
<b>8.12. Sistema de aprovechamiento de energía.....</b>	<b>120</b>

<b>9. Conclusiones .....</b>	<b>121</b>
<b>9.1 Conclusions .....</b>	<b>123</b>

## **ANEXO I: Dimensionado del núcleo de membranas**

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Datos de partida.....</b>	<b>1</b>
2.1. Composición del agua de mar .....	1
2.2. Temperatura del agua de alimentación.....	2
2.3. Composición del agua producto.....	4
<b>3. Selección de las membranas de ósmosis inversa .....</b>	<b>4</b>
<b>4. Dimensionado del núcleo de membranas .....</b>	<b>5</b>
4.1. Selección del modelo del núcleo de membranas .....	6
4.2. Configuraciones estudiadas y solución adoptada. ....	9
<b>5. Calidad de permeado obtenida.....</b>	<b>11</b>

## **ANEXO II: Dimensionado del sistema de recuperación de energía y de bombas. Alternativas de gestión de la salmuera.**

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Primer dimensionado del sistema de recuperación de energía 1</b>	
<b>3. Dimensionado del sistema de captación .....</b>	<b>7</b>
3.1. Captación del agua de mar .....	7
3.2. Pozos de captación.....	8
3.3 Diámetros de las tuberías.....	11
3.4. Cálculo de las pérdidas de carga .....	14
3.4.1. Pérdidas de carga en las tuberías .....	14
3.4.2. Pérdidas de carga debidas a los accesorios de las tuberías.....	18
<b>4. Dimensionado del sistema de distribución.....</b>	<b>20</b>
4.1 Localización del depósito y red de tuberías .....	20
4.2. Depósito de regulación y cabecera .....	21
4.3. Diámetro de las tuberías de distribución.....	22
4.4. Cálculo de las pérdidas de carga .....	23
<b>5.Dimensionado del sistema de rechazo de salmuera .....</b>	<b>25</b>
5.1. Longitud y altura de la tubería de rechazo .....	25
5.2. Diámetro de la tubería de rechazo.....	26
5.3 Cálculo de las pérdidas de carga .....	27
5.3.1. Pérdidas de carga en las tuberías .....	27
5.3.2. Cálculo de las pérdidas de carga secundarias.....	28
5.3.3. Pérdidas de carga totales.....	29
<b>6. Dimensionado del pretratamiento.....</b>	<b>29</b>
6.1. Pretratamiento físico.....	29
6.2. Pretratamiento químico .....	30

<b>7. Dimensionado del postratamiento .....</b>	<b>31</b>
<b>8. Proceso de dimensionado de bombas.....</b>	<b>32</b>
8.1. Altura manométrica de la bomba .....	32
8.2. Cavitación .....	33
8.3. Dimensionado de la bomba booster .....	33
8.4. Dimensionado de la bomba de alta presión (BAP).....	42
8.5. Dimensionado de la bomba de captación.....	49
8.6. Dimensionado de la bomba previa al postratamiento .....	53
8.7. Dimensionado de la bomba de distribución .....	59
8.8. Dimensionado y selección de la bomba de rechazo .....	64
<b>9.Segundo dimensionado del sistema de recuperación de energía .....</b>	<b>65</b>
<b>10. Consumo específico de la planta .....</b>	<b>68</b>
10.1. Comparativa de los consumos específicos obtenidos referentes al núcleo de desalación.....	69
<b>11. Consumo anual de la planta.....</b>	<b>71</b>
<b>12. Alternativas de gestión de la salmuera .....</b>	<b>71</b>
12.1. Tratamiento de salmuera mediante un sistema de vertido cero .....	71
12.2. Inyección profunda.....	73
12.3. Balsas de evaporación .....	73
12.4. Uso de la salmuera para producir zumos concentrados .....	74
12.5. Comparativa de alternativas y solución adoptada .....	74

## **ANEXO III: Dimensionado del sistema eólico y métodos de aprovechamiento de la energía**

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Análisis del recurso eólico .....</b>	<b>1</b>
2.1. Datos del recurso eólico de la zona.....	1
2.2. Elección de la orientación del aerogenerador .....	3
2.3. Distribución de probabilidad de la velocidad del viento .....	4
<b>3. Determinación del emplazamiento del aerogenerador.....</b>	<b>7</b>
<b>4. Selección del modelo del aerogenerador .....</b>	<b>10</b>
4.1. Disponibilidad en el mercado .....	10
4.2. Estudio de la producción de cada aerogenerador .....	11
4.3. Selección del aerogenerador .....	13
4.4. Comprobación de la potencia y el emplazamiento .....	15
4.4.1. Cálculo de la potencia estimada .....	15
4.4.2. Configuración y emplazamiento de los aerogeneradores .....	19
<b>5. Abastecimiento de la EDAM .....</b>	<b>23</b>
<b>6. Sistema de aprovechamiento de energía .....</b>	<b>24</b>
6.1. Bombeo hidráulico .....	25
6.2. Aire comprimido .....	25
6.3. Hidrógeno .....	26

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

# **MEMORIA**

## **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO CON ENERGÍA  
EÓLICA PARA PRODUCCIÓN DE AGUA DESTINADA A USO AGRÍCOLA**

**AUTOR: Víctor Pérez Santana**

**TUTOR: Vicente José Romero Ternero**



## HOJA DE IDENTIFICACIÓN

### Título del proyecto

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO CON ENERGÍA EÓLICA PARA PRODUCCIÓN DE AGUA DESTINADA A USO AGRÍCOLA.

### DATOS DEL PETICIONARIO

RAZÓN SOCIAL: ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA. UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA.

DIRECCIÓN: CAMINO SAN FRANCISCO DE PAULA, S/N APARTADO 456. CP: 38200.SAN CRISTÓBAL DE LA LAGUNA, SANTA CRUZ DE TENERIFE (ESPAÑA).

TELÉFONO: +34 922 845 059

E-MAIL: esit@ull.es

### DATOS DEL AUTOR

NOMBRE: VÍCTOR PÉREZ SANTANA

NIF: 54116056-T

### DATOS DEL TUTOR

NOMBRE: VICENTE JOSÉ ROMERO TERNERO

### FECHA

SEPTIEMBRE 2018



## ÍNDICE - MEMORIA

<b>1. Objeto</b> .....	<b>1</b>
1.1. Abstract .....	2
<b>2. Alcance</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Antecedentes</b> .....	<b>5</b>
3.1. Situación de los recursos hídricos a nivel mundial .....	5
3.2. Situación hidrológica en Canarias .....	9
3.3. Evolución de la desalación en Canarias y en la isla de Tenerife .....	11
3.4. Desalación de agua de mar .....	14
3.4.1. Procesos de desalación de aguas .....	14
3.4.2. Comparativa de las tecnologías de desalación .....	19
3.4.3. Características básicas del agua a desalar.....	19
3.4.4. Configuración de la planta desaladora de ósmosis inversa .....	24
3.4.5. Captación del agua de mar.....	26
3.4.6. Pretratamiento .....	29
3.4.7. Postratamiento.....	32
3.4.8. Núcleo de desalación .....	32
3.4.9. Sistema de distribución .....	39
3.4.10. Salmuera.....	39
3.5. Energía eólica .....	40
3.5.1. El viento .....	41
3.5.2. Aerogenerador .....	42
<b>4. Normativa y referencias</b> .....	<b>44</b>
4.1 Disposiciones legales y normativa aplicable .....	44
4.2 Bibliografía.....	45
4.3 Programas de cálculo y herramientas empleadas .....	46
<b>5. Definiciones y abreviaturas</b> .....	<b>47</b>
5.1. Definiciones .....	47
5.2. Abreviaturas .....	47
<b>6. Requisitos de diseño</b> .....	<b>48</b>
6.1 Datos del petionario .....	48

<b>6.2. Emplazamiento .....</b>	<b>49</b>
<b>6.3. Capacidad de la planta .....</b>	<b>63</b>
6.3.1 Condiciones de estudio .....	65
6.3.2 Determinación de la demanda h́drica .....	67
6.3.3 Cálculo de la producción .....	70
<b>6.4. Datos de partida.....</b>	<b>74</b>
6.4.1. Temperatura del agua de alimentación .....	74
6.4.2. Composición del agua de alimentación .....	75
6.4.3. Límites establecidos para el agua producto.....	76
<b>7. Análisis de soluciones.....</b>	<b>77</b>
<b>7.1. Sistema de captación de agua de mar .....</b>	<b>78</b>
7.1.1. Toma de agua cerrada (pozos).....	78
7.1.2. Toma de agua abierta (superficial).....	78
7.1.3. Solución adoptada para la captación de agua de mar .....	78
<b>7.2. Pretratamiento y Postratamiento .....</b>	<b>80</b>
7.2.1. Pretratamiento físico.....	80
7.2.2. Pretratamiento químico .....	81
7.2.2. Postratamiento.....	82
<b>7.3. Bastidor de ósmosis inversa.....</b>	<b>82</b>
7.3.1. Elección del modelo de membranas .....	83
7.3.2. Número de etapas.....	84
7.3.3 Conversión.....	85
7.3.4. Selección de la configuración y número total de membranas.....	85
<b>7.4. Selección del sistema de recuperación de energía .....</b>	<b>87</b>
7.4.1. Sistema de recuperación de energía.....	87
7.4.2. Comparativa entre los sistemas de recuperación de energía .....	89
7.4.3. Dimensionado del sistema de recuperación de energía .....	90
<b>7.5. Sistema de tuberías .....</b>	<b>92</b>
7.5.1. Material de las tuberías.....	92
7.5.2. Tubería de captación.....	93
7.5.3. Colector principal .....	93
7.5.4. Tuberías de distribución.....	94
7.5.5. Tubería del sistema de rechazo de salmuera.....	95
7.5.6. Resumen de los sistemas de tuberías .....	96
<b>7.6. Depósito de regulación y de cabecera.....</b>	<b>97</b>

<b>7.7. Dimensionado de las bombas de la instalación .....</b>	<b>97</b>
7.7.1. Selección de la bomba booster .....	98
7.7.2. Selección de la bomba de alta presión.....	99
7.7.3. Selección de la bomba de captación.....	100
7.7.4. Selección de la bomba previa al postratamiento.....	101
7.7.5. Selección de la bomba de distribución .....	103
7.7.6. Selección de la bomba de rechazo .....	104
<b>7.8. Resultados obtenidos de las bombas y consumo específico.....</b>	<b>104</b>
<b>7.9. Alternativas de gestión de la salmuera .....</b>	<b>106</b>
7.9.1. Tratamiento de salmuera mediante un sistema de vertido cero .....	106
7.9.2. Inyección profunda .....	107
7.9.3. Balsas de evaporación .....	107
7.9.4. Uso de la salmuera para producir zumos concentrados.....	107
<b>7.10. Dimensionado del sistema eólico.....</b>	<b>107</b>
7.10.1 Determinación del recurso eólico .....	107
7.10.2 Emplazamiento del aerogenerador.....	109
7.10.3 Selección del aerogenerador.....	110
<b>7.11. Abastecimiento de la EDAM .....</b>	<b>114</b>
<b>7.12. Sistema de aprovechamiento energético .....</b>	<b>114</b>
<b>8. Resultados finales .....</b>	<b>115</b>
<b>8.1. Ubicación y finalidad de la planta .....</b>	<b>115</b>
<b>8.2. Sistema de captación y colector principal.....</b>	<b>116</b>
<b>8.3. Pretratamiento.....</b>	<b>117</b>
8.3.1. Pretratamiento físico.....	117
8.3.2. Pretratamiento químico .....	117
<b>8.4. Núcleo de desalación.....</b>	<b>117</b>
<b>8.5. Postratamiento .....</b>	<b>118</b>
<b>8.6. Bomba previa al postratamiento .....</b>	<b>118</b>
<b>8.7. Sistema de distribución .....</b>	<b>118</b>
<b>8.8. Depósito de regulación y de cabecera.....</b>	<b>118</b>
<b>8.9. Rechazo de salmuera.....</b>	<b>119</b>
<b>8.10. Alternativas de gestión de la salmuera y solución adoptada.....</b>	<b>119</b>
<b>8.11. Sistema de abastecimiento de la EDAM .....</b>	<b>119</b>
<b>8.12. Sistema de aprovechamiento de energía.....</b>	<b>120</b>

**9. Conclusiones ..... 121**  
**9.1 Conclusions ..... 123**

## *Índice de figuras - Memoria*

Figura 1: Disponibilidad del agua dulce en la tierra en el año 2007 (Fuente: <a href="http://www.nationalgeographic.org">www.nationalgeographic.org</a> ).....	5
Figura 2: Reparto de agua salada y dulce (Fuente: World fresh wáter resources Peter H. Gleick) .....	6
Figura 3: Estrés de desarrollo de las aguas subterráneas (Fuente: <a href="http://www.unesco.org">http://www.unesco.org</a> ) .....	7
Figura 4: Gráfica comparativa de crecimiento de población (Fuente: Naciones Unidas, World Population Prospects).....	8
Figura 5: Mapa de índice de desarrollo humano (Fuente: <a href="http://sites.google.com/site/paisessubdesarrollados/">sites.google.com/site/paisessubdesarrollados/</a> ).....	8
Figura 6: Gráfico de la distribución de recursos (Fuente: Elaboración propia).....	10
Figura 7: Gráfico de distribución de los volúmenes por sector (Fuente: Elaboración propia) .....	11
Figura 8: Capacidad instalada de desalación m <sup>3</sup> /día (Fuente: <a href="http://www.mapama.com">www.mapama.com</a> ).....	12
Figura 9: Esquema de una etapa de un evaporador MSF (Fuente: José Miguel Veza) ..	15
Figura 10: Esquema de una etapa de un evaporador MED (Fuente: José Miguel Veza)	15
Figura 11: Proceso de electrodiálisis (Fuente: José Miguel Veza).....	16
Figura 12: Esquema del proceso de compresión de vapor (Fuente: José Miguel Veza)	17
Figura 13: Proceso ósmosis directa (Fuente: <a href="http://www.h2agua.com">www.h2agua.com</a> ).....	18
Figura 14: Proceso ósmosis inversa (Fuente: <a href="http://www.h2agua.com">www.h2agua.com</a> ).....	18
Figura 15: Esquema de una planta de desalación mediante ósmosis inversa (Fuente: <a href="http://www.degremont.es">www.degremont.es</a> ).....	25
Figura 16. Esquema captación cerrada mediante pozos (Fuente: <a href="http://mrsservicios.cl">mrsservicios.cl</a> ) .....	27
Figura 17: Cántara de captación (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000)).....	27
Figura 18: Cántara de captación con sondeos verticales (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000)) .....	28
Figura 19: Captación abierta mediante emisario submarino (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))...	29

Figura 20: Disposici3n de varios bastidores de 3smosis (Fuente. <a href="http://www.laenergíadelcamnio.com">www.laenergíadelcamnio.com</a> ).....	33
Figura 21: Membrana tubular (Fuente: <a href="http://www.acsmedioambiente.com">www.acsmedioambiente.com</a> ) .....	34
Figura 22: Membrana fibra hueca (Fuente: <a href="http://www.acsmedioambiente.com">www.acsmedioambiente.com</a> ).....	34
Figura 23: membrana de arrollamiento en espiral (Fuente <a href="http://www.acondicionamientos.com.ar">www.acondicionamientos.com.ar</a> ) .....	35
Figura 24: Esquema instalaci3n simple etapa (Fuente: "Desalaci3n de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, Jos3 Antonio (2000)) .....	37
Figura 25: Esquema etapas de salmuera (Fuente: "Desalaci3n de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, Jos3 Antonio (2000)) .....	38
Figura 26: Esquema etapas de producto (Fuente: "Desalaci3n de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, Jos3 Antonio (2000)) .....	38
Figura 27: Evoluci3n de la potencia instalada en el mundo (Fuente: <a href="http://www.aeeolica.org">www.aeeolica.org</a> ) .....	41
Figura 28: Movimiento de las masas de aire en la Tierra (Fuente: <a href="http://www.tutiempo.net">www.tutiempo.net</a> ).....	42
Figura 29: Esquema de los distintos elementos que conforman un aerogenerador (Fuente: <a href="http://triplep97.wordpress.com">triplep97.wordpress.com</a> ) .....	43
Figura 30: Precipitaci3n convencional media (1945-2010) (Fuente: PHT).....	50
Figura 31: Extracci3n aguas subterr3neas (1985-2010) (Fuente: PHT).....	51
Figura 32: Estado cuantitativo de las masas de aguas subterr3neas (Fuente: PHT).....	52
Figura 33: Reparto de los recursos hídricos para riego agŕcola (Fuente: PHT) .....	53
Figura 34: Índice de potencial e3lico (Fuente: PHT).....	54
Figura 35: Mapa e3lico, zonas de compatibilidad e incompatibilidad (Fuente: PIOT, 2011) .....	55
Figura 36: Crecimiento de la poblaci3n de los distintos municipios de Tenerife (Fuente: PHT) .....	56
Figura 37: Demanda de regadío (Fuente: PHT) .....	57
Figura 38: Localizaci3n de las desaladoras en la isla (Fuente: Googlemaps) .....	58
Figura 39: Espacios naturales protegidos (Fuente: PIOT,2011) .....	60
Figura 40: Usos del suelo (Fuente: PIOT,2011) .....	60
Figura 41: Ordenaci3n del territorio (Fuente: Grafcan) .....	61

Figura 42: Referencia catastral de la parcela elegida (Fuente: <a href="http://www.sedecatastro.gob.es">www.sedecatastro.gob.es</a> )	62
Figura 43: Emplazamiento de la EDAM (Fuente: Grafcan)	63
Figura 44: Valores habituales para el agua de regadío (Fuente: José Miguel Veza)	77
Figura 45: Esquema de estructuración de los pozos (Fuente: Elaboración propia)	79
Figura 46: Disposición de los pozos con respecto a la EDAM (Fuente: Grafcan)	80
Figura 47: Dimensiones de las membranas TM800V-400 y 440 (Fuente: Toray Industries)	84
Figura 48: Esquema de funcionamiento turbina Pelton (Fuente: Toray Industries)	88
Figura 49. Esquema de funcionamiento turbo-charger (Fuente: Toray Industries)	88
Figura 50: Esquema de funcionamiento intercambiador de presión (Fuente: Energy Recovery)	89
Figura 51: Resultados del primer dimensionado del intercambiador de presión (Fuente: Energy Recovery)	91
Figura 52: Resultados del segundo dimensionado del intercambiador de presión (Fuente: Energy Recovery)	91
Figura 53: Diámetros comerciales de tuberías (Fuente: Flowtite)	93
Figura 54: Recorrido de la tubería de distribución hasta el depósito de regulación (Fuente: Elaboración propia. Goolzoom)	95
Figura 55: Distancia y profundidad a la que se encuentra el emisario submarino (Fuente: Instituto Español de Oceanografía)	96
Figura 56: Imagen del modelo NSCF 125-250/110 del fabricante Lowara ( <a href="http://www.lenntech.com">www.lenntech.com</a> )	99
Figura 57: Imagen del modelo 3X10DMX-F del fabricante Flowserve (Fuente: <a href="http://www.flowserve.com">www.flowserve.com</a> )	100
Figura 58: Imagen del modelo Z10220 3/2B-L8W del fabricante Lowara (Fuente: <a href="http://www.xylect.com">www.xylect.com</a> )	101
Figura 59: Imagen del modelo NSCF 100-315/110/P45VCC4 del fabricante Lowara (Fuente: <a href="http://www.xylect.com">www.xylect.com</a> )	102
Figura 60: Imagen del modelo NSCF 80-160/220/W25RCC4 del fabricante Lowara (Fuente: <a href="http://www.xylect.com">www.xylect.com</a> )	104

Figura 61: Rosas de los vientos de frecuencias y velocidades (Fuente: Elaboración propia)	108
Figura 62: Gráfica de distribución de velocidades (Fuente: Elaboración propia)	109
Figura 63: Diversos emplazamientos para instalar el aerogenerador (Fuente: Elaboración propia. Grafcan)	110
Figura 64: Imagen del modelo de aerogenerador U57 del fabricante Unison (Fuente: Unison)	112
Figura 65: Disposición de los aerogeneradores (Fuente: Elaboración propia. Goolzoom)	113

## *Índice de tablas - Memoria*

Tabla 1: Distribución de los recursos disponibles (Fuente: CIATF) .....	9
Tabla 2: Volúmenes de agua suministrados según sectores (Fuente: CIATF).....	11
Tabla 3: Número total de desaladoras y volumen de agua desalada producida y consumida (Fuente: Elaboración propia. CIATF) .....	13
Tabla 4: Valores de salinidad (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000)) .....	20
Tabla 5: Valores de los índices de potencial eólico (Fuente: PHT) .....	54
Tabla 6: Estaciones desaladoras situadas en la vertiente sur de la isla (Fuente: Elaboración propia) .....	58
Tabla 7: Valores de evapotranspiración por mes (Fuente: <a href="http://www.agrocabildo.org">www.agrocabildo.org</a> ) .....	66
Tabla 8: Coeficiente de cultivo del tomate (Fuente: Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos) .....	67
Tabla 9: Necesidad hídrica por semana (Fuente: Elaboración propia) .....	68
Tabla 10: Hectáreas de tomate bajo invernadero (Fuente: <a href="http://www.gobierodecanarias.org">www.gobierodecanarias.org</a> ) .....	68
Tabla 11: Necesidad hídrica por día (Fuente: Elaboración propia) .....	69
Tabla 12: Necesidad hídrica por mes (Fuente: Elaboración propia) .....	70
Tabla 13: Necesidad hídrica anual (Fuente: Elaboración propia).....	71
Tabla 14: Producción EDAM (Fuente: Elaboración propia).....	71
Tabla 15: m3 de agua apartada al depósito cada mes (Fuente: Elaboración propia)....	72
Tabla 16: m3 de agua almacenada en el depósito al final de cada mes (Fuente: Elaboración propia) .....	73
Tabla 17: Valores máximos y mínimos de temperatura según mes (Fuente: Elaboración propia. Puertos del Estado) .....	75
Tabla 18: Composición química del agua de mar (Fuente: Elaboración propia. Desaladora de Santa Cruz de Tenerife) .....	76
Tabla 19: Características físico-químicas (Fuente: Elaboración propia. Desaladora de Santa Cruz de Tenerife) .....	76
Tabla 20: Composición agua producto (Fuente: Elaboración propia. Dpto. Producción Agraria. Área Edafología y Química Agrícola. Universidad Politécnica de Cartagena) ..	77

Tabla 21: Modelos de la serie TM800V (Fuente: Toray Industries) .....	84
Tabla 22: Número total de tubos de presión y membranas por configuración (Fuente: Elaboración propia) .....	86
Tabla 23: Configuraciones estudiadas imponiendo 6 elementos por tubo de presión (Fuente: Elaboración propia).....	86
Tabla 24: Tabla 7: Configuraciones estudiadas imponiendo 7 elementos por tubo de presión (Fuente: Elaboración Propia).....	86
Tabla 25: Comparativa de recuperadores de energía (Fuente: Toray DS2).....	90
Tabla 26: Datos de entrada del software (Fuente: Elaboración propia. TorayDS2) .....	90
Tabla 27: Datos de interés para el dimensionado de bombas de la instalación (Fuente: Elaboración propia. Energy Recovery) .....	91
Tabla 28. Consumos específicos obtenidos del software de membranas (Fuente: TorayDS2) .....	92
Tabla 29: Resumen de datos obtenidos sobre las tuberías (Fuente: Elaboración propia) .....	96
Tabla 30: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas booster (Fuente: Elaboración propia) .....	98
Tabla 31: Tabla resumen de los modelos de bomba booster (Fuente: Elaboración propia) .....	98
Tabla 32: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de alta presión (Fuente: Elaboración propia).....	99
Tabla 33: Tabla resumen de los modelos de bomba de alta presión (Fuente: Elaboración propia) .....	99
Tabla 34: Pérdidas de carga en el sistema de captación (Fuente: Elaboración propia)101	
Tabla 35: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de captación (Fuente: Elaboración propia).....	101
Tabla 36: Tabla resumen de los modelos de bomba de captación (Fuente: Elaboración propia) .....	101
Tabla 37: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de pre-postratamiento (Fuente: Elaboración propia).....	102
Tabla 38: Tabla resumen de los modelos de bomba de pre-postratamiento (Fuente: Elaboración propia) .....	102

---

Tabla 39: Tabla 32: Pérdidas de carga en el sistema de distribución (Fuente: Elaboración propia) .....	103
Tabla 40: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de distribución (Fuente: Elaboración propia).....	103
Tabla 41: Tabla 26: Tabla resumen de los modelos de bomba de distribución (Fuente: Elaboración propia) .....	103
Tabla 42: Comparativa de consumos específicos finales (Fuente: Elaboración propia) .....	105
Tabla 43: Consumo específico de cada bomba (Fuente: Elaboración propia) .....	105
Tabla 44: Consumo específico total de todos los sistemas de la instalación (Fuente: Elaboración propia) .....	106
Tabla 45: Calificación factores de carga (Fuente: Elaboración propia).....	111
Tabla 46: Resultados obtenidos en el proceso de dimensionado del aerogenerador (Fuente: Elaboración propia).....	111
Tabla 47: Exceso de la configuración de dos aerogeneradores (Fuente: Elaboración propia) .....	113



## 1. Objeto

El presente trabajo que se ha elaborado tiene como propósito demostrar los conocimientos y competencias adquiridas a lo largo del Grado en Ingeniería Mecánica. Por una parte su elaboración tiene como objetivo la superación de la asignatura Trabajo Fin de Grado, mientras que por otro lado se trata del desarrollo de un documento técnico que define el diseño de una planta desaladora abastecida mediante energías renovables con el fin de producir agua para consumo agrícola.

El objetivo de dicha asignatura es que el alumno sea capaz de redactar un proyecto de manera autónoma bajo la supervisión de un tutor académico con la meta de poder mostrar sus conocimientos y competencias adquiridas en el campo de la ingeniería así como en el tema que trate el propio proyecto. Dentro de dichos conocimientos y competencias se puede destacar la redacción del documento técnico como tal, manejo de reglamento y normativa referente al tema tratado, desarrollo e interpretación de cálculos y procedimiento de toma de decisiones en relación a sistemas y equipos.

Con respecto al objetivo específico de este proyecto es el estudio de una planta desaladora de agua de mar mediante ósmosis inversa que estará situada en la localidad de Los Abrigos, que forma del parte del municipio de Granadilla de Abona, en Tenerife (España). Su producción será de 3700 m<sup>3</sup>/día e irá destinada a cubrir la necesidad hídrica del cultivo más predominante bajo invernadero en el municipio, el tomate. No obstante, la producción de la planta desaladora es tal que produce un exceso que se puede destinar a otros cultivos del municipio que sean capaces de tolerar las condiciones que presente el agua como pueden ser la cebolla, la papa, el melón o el pepino.

Una vez se han dimensionado los sistemas que conforman el núcleo de la planta, se determinada que la misma presenta un consumo específico de 3,33 kWh/m<sup>3</sup>. Para cubrir la demanda impuesta se hará uso de la energía producida por dos aerogeneradores de 750 kW además de que la EDAM estará conectada a red para cubrir el déficit energético en situaciones de bajo recurso eólico. Todos los equipos dimensionados fueron expuestos a un análisis previo con el fin de obtener un consumo de la planta óptimo para sus condiciones de operación.

## 1.1. Abstract

The tasks carried through have the purpose of demonstrating the knowledge and competences acquired throughout the Mechanical Engineering Degree. On one hand, its elaboration serves the purpose of passing the subject “Trabajo Fin de Grado”, while on the other hand it is also the development of a technical document that defines the designment of a desalination station supplied by renewable energies with the intention of producing water for agricultural consumption.

The main purpose of the subject is for the student to be able to elaborate a project in an autonomous fashion under the guidance of a tutor with the goal of showing the knowledge and competences acquired in the field of engineering as well as the theme the project is based on. Between the aforementioned knowledge and competences, we can highlight the composition of a technical document, use of rules and laws related to the subject, development and interpretation of calculus and the process of decision-making in relation to hardware and systems.

Regarding the specific purpose of this project, it is the study of a desalination station of seawater through inverse osmosis which will be located in Los Abrigos, which belongs to the municipality of Granadilla de Abona, Tenerife (Spain). Its output will be of de 3700 m<sup>3</sup>/day and will be destined to cover the hydrological need of the predominant greenhouse crop in the municipality, the tomato. Nevertheless, the output of the desalination station is so high that it produces a surplus that can be destined to other crops in the area able to tolerate the characteristics of this water, such as onion, potato, melon or cucumber.

Once the measurements of the systems that conform the station have been realized, it turns out it represents a specific consumption of 3,33 kWh/m<sup>3</sup>. To cover the demand, we will use the energy produced by two wind turbines of 750 kW and the energy of the electric distribution grid. All measured hardware was exposed to a previous analysis with the purpose of obtaining an optimal consumption of the station for its working conditions.

## 2. Alcance

En este proyecto se va a realizar el estudio de una planta de desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa alimentada energéticamente por un sistema de captación de energía eólica. Estará situada en la localidad de Los Abrigos, en el municipio de Granadilla de Abona. Su producción será de 3700 m<sup>3</sup>/día destinada a cubrir la necesidad hídrica del tomate cultivado bajo invernadero.

El estudio se centra en el análisis y estudio del núcleo de desalación de la planta, la captación del agua de mar, la distribución del agua producto y los consumos que presenta cada uno de estos apartados, Por otro lado también se dimensiona el sistema de aprovechamiento del recurso eólico de forma que sea capaz de producir la energía que demanda la planta. Además se estudiarán opciones de aprovechamiento del rechazo que produce el proceso de ósmosis inversa y de los excesos energéticos que genera el sistema eólico.

Así pues, el proyecto se conformará por los apartados que se enumerarán a continuación. Se dividirán en varios grupos:

➤ Núcleo de desalación:

- Determinación del emplazamiento de la planta desaladora
- Cálculo de la producción diaria de la planta para satisfacer las necesidades hídricas del tomate.
- Dimensionado del núcleo de desalación.
  - Estudio e imposición del agua de mar que pasará a través del proceso de desalación.
  - Diseño y dimensionado del bastidor de membranas de ósmosis inversa.
  - Dimensionado del sistema de recuperación de energía.
- Dimensionado del pre y post-tratamiento del sistema.
- Dimensionado de la bomba booster.
- Dimensionado de la bomba de alta presión.
- Dimensionado del sistema de captación.
- Selección de la bomba de captación.
- Dimensionado de las tuberías del sistema distribución.

- Selección de la bomba de distribución.
  - Dimensionado del sistema de rechazo de salmuera.
  - Cálculo del consumo específico de la planta.
  - Alternativas de gestión de la salmuera
- Sistema eólico:
- Evaluación del recurso eólico y orientación de los aerogeneradores.
  - Selección del lugar de emplazamiento de los aerogeneradores.
  - Cálculo de la producción energética de los aerogeneradores seleccionados en el emplazamiento elegido.
  - Selección de la configuración y modelo de aerogenerador que producirá la energía necesaria para abastecer la planta desaladora.
  - Abastecimiento de la EDAM.
  - Estudio de sistemas de aprovechamiento de energía.

Es importante remarcar que se trata de un estudio, es decir, que no se trata de un proyecto ejecutable como tal por lo que los siguientes apartados quedarán excluidos del documento:

- Proyecto de obra civil.
- Instalaciones eléctricas, de saneamiento, climatización, contra incendios y cualquier otra que fuera requerida por la planta.
- Estudio de seguridad y salud (tanto básico como de entidad propia).
- Pliego de condiciones.
- Mediciones y presupuesto (por lo que no se darán precios específicos de membranas u otros equipos de la instalación).
- Planificación.
- Sistema de conducción en el interior de la planta.
- Dimensionado de sistemas de control y distribución en las conducciones.
- Dimensionado del sistema de control de rechazo de salmuera.
- Instalaciones de pre y post-tratamiento.

- Estudios de entidad propia para realizar un dimensionado óptimo del proceso (estudios del agua de alimentación de membranas, geológicos, del recurso eólico de la zona u otros que podrían afectar a los cálculos de la planta).

Así pues, a la vista de los apartados incluidos y excluidos se puede observar que el estudio se centra en el análisis y dimensionado del apartado tanto mecánico como energético de los aspectos que forman parte del proceso de desalación de agua, y en el apartado de generación de energía eléctrica mediante los recursos eólicos disponibles en el lugar de emplazamiento. Es importante remarcar que en el caso de que este proyecto fuese ejecutable habría que añadir todos los apartados excluidos anteriormente para que este se pudiese desarrollar de manera correcta.

### 3. Antecedentes

#### 3.1. Situación de los recursos hídricos a nivel mundial

El agua es el elemento que se encuentra en un mayor porcentaje sobre la superficie terrestre y es imprescindible para la vida debido a que la mayoría de los seres vivos están constituidos aproximadamente de un 80% de agua. Además juega un papel primordial en las actividades que desarrolla el ser humano por lo que tiene un gran peso sobre la economía mundial. Y dependiendo de la distribución que esta misma presente

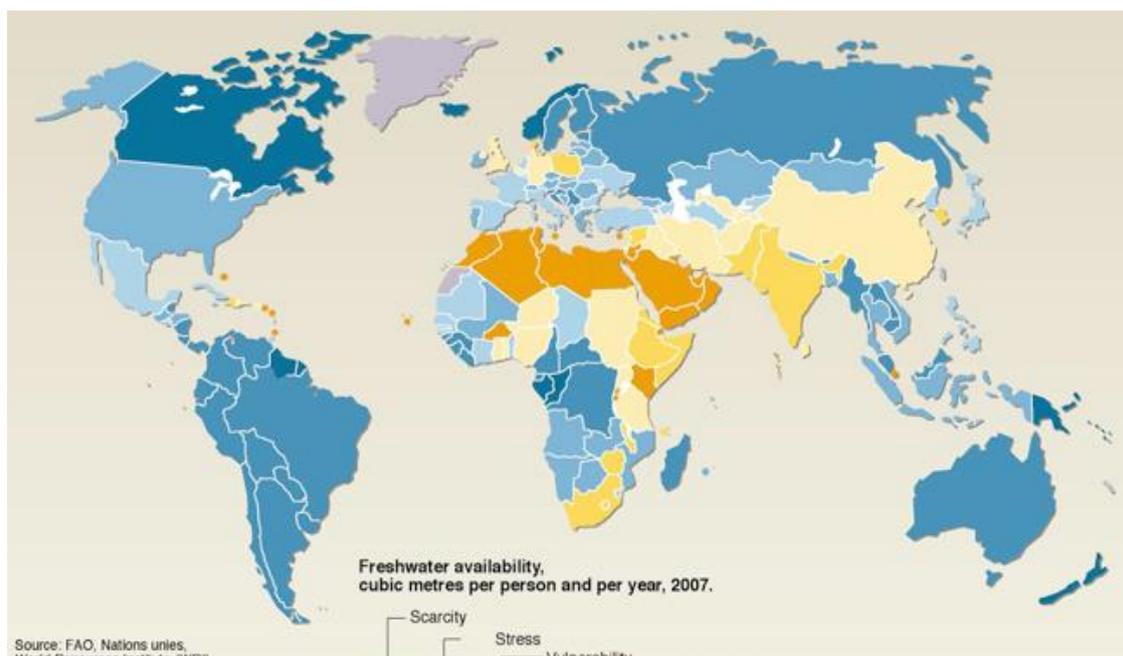


Figura 1: Disponibilidad del agua dulce en la tierra en el año 2007 (Fuente: [www.nationalgeographic.org](http://www.nationalgeographic.org))

sobre el territorio, puede favorecer o limitar la capacidad de dichas actividades lo que puede crear carencias en ámbitos como la agricultura o la industria. La distribución actual de los recursos h́dricos del planeta es la mostrada en la figura 1.

Con respecto a su reparto por el territorio, en la totalidad del planeta hay aproximadamente 1370 millones de kiĺmetro cúbicos de agua, de los cuales el 96,5% se encuentra en mares y océanos, es decir, se trata de agua salada. Dentro de esta masa de agua también se consideran las aguas salobres que se encuentra en un pequeño porcentaje en comparación a la previamente comentada. Y el 2,5% restante corresponde al agua dulce que se encuentra repartida por la superficie y que equivale a unos 35 millones de kiĺmetros cúbicos. No obstante dentro de ese 2,5% hay masas de agua que no pueden ser utilizadas por el ser humano, que son las capas de hielo y los glaciares que presentan la siguiente proporci3n dentro del total de agua dulce.

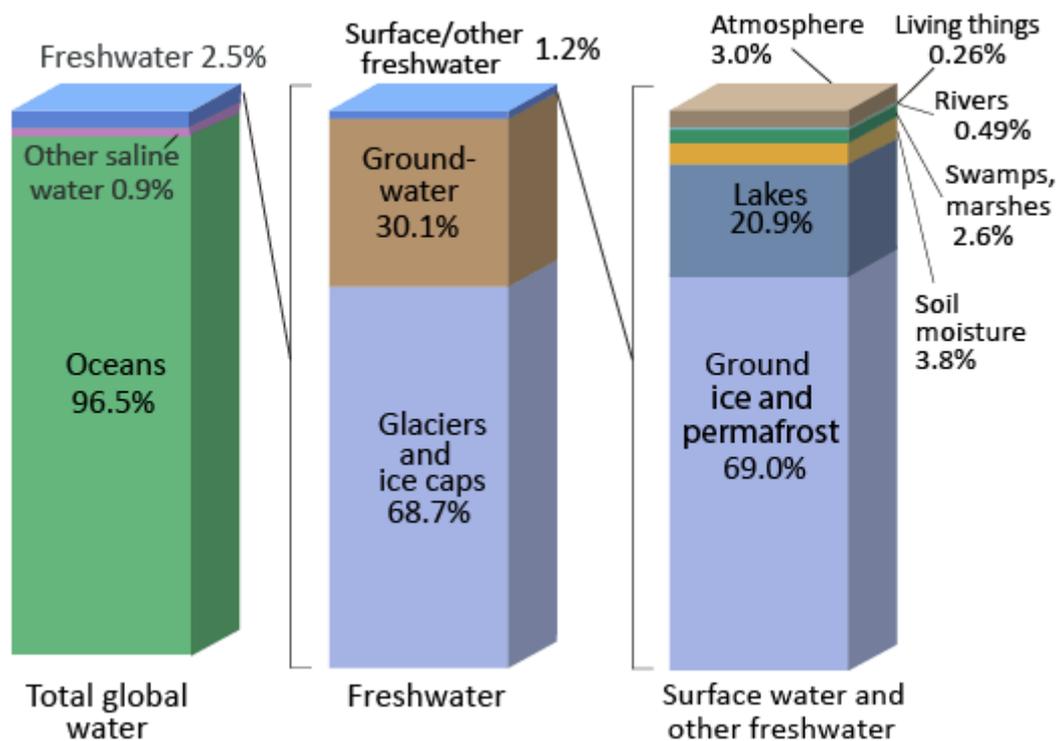
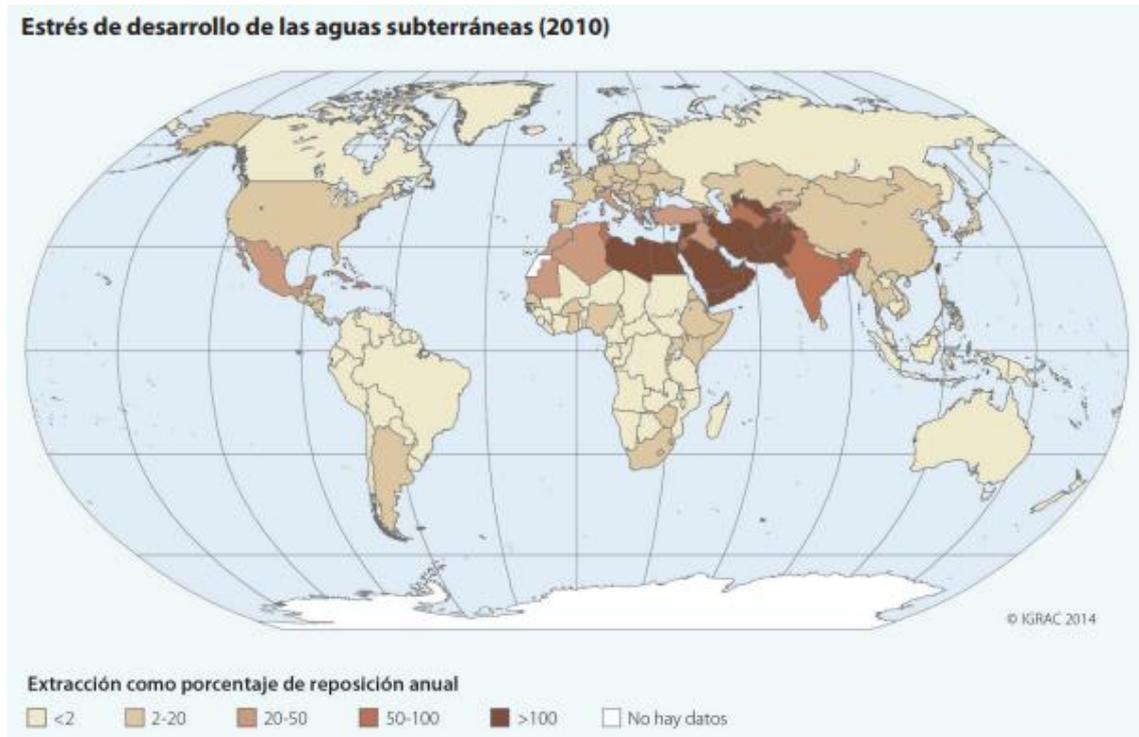


Figura 2: Reparto de agua salada y dulce (Fuente: World fresh wáter resources Peter H. Gleick)

Con relación a la figura anterior se puede observar que el agua dulce no apta para el uso humano presenta un porcentaje muy alto (68,7%). De manera que el recurso h́drico que es capaz de aprovechar el ser humano es muy bajo, y a medida que aumente su explotación la precariedad de estos irá en aumento creando una situaci3n de total

insostenibilidad. Esta situación empieza a ser notable en las masas de agua subterránea del planeta dado que la extracción de este recurso es tal que no se posibilita su renovación, y se espera que esta situación vaya en aumento por lo que las zonas que dependan únicamente de este recurso se verán afectadas muy negativamente. El estado actual de extracción de masas de agua subterránea es el siguiente:



*Figura 3: Estrés de desarrollo de las aguas subterráneas (Fuente: <http://www.unesco.org>)*

Además esta situación se ve acrecentada por el aumento drástico de la población mundial. Ya que el aumento de la población va ligado a un aumento de la necesidad de recursos hídricos, tanto en el ámbito humano como en el industrial y el agrícola. Asimismo con el paso del tiempo y debido a los avances en los sectores previamente nombrados se han producido cambios en los hábitos de vida del ser humano que han propiciado un crecimiento gradual de la demanda.

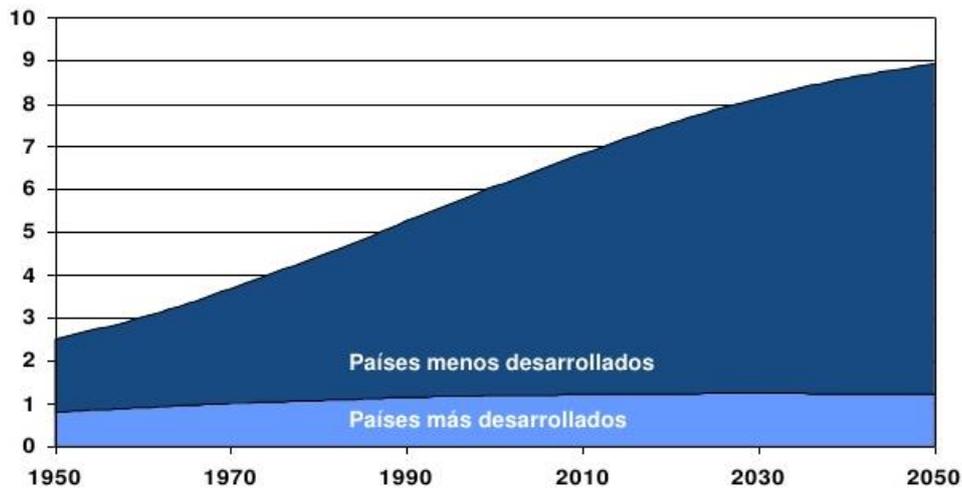


Figura 4: Gráfica comparativa de crecimiento de población (Fuente: Naciones Unidas, World Population Prospects)

Se observa que según las predicciones de la ONU el aumento de la población en los países en vías de desarrollo incrementará de manera drástica en comparación a los países más desarrollados.



Figura 5: Mapa de índice de desarrollo humano (Fuente: [sites.google.com/site/paisessubdesarrollados/](https://sites.google.com/site/paisessubdesarrollados/))

Y muchos de estos países se encuentran en el continente africano, que según los dispuesto en la figura 1 presentan una disponibilidad de recursos hídricos bastante escasa al ser zonas bastante áridas donde las precipitaciones escasean al igual que las masas de agua subterránea. Por lo que se puede llegar a la conclusión de que el alto aumento de la población que sufren estas regiones sumado a la baja disponibilidad de

recursos hídricos crea una situación problemática que impide que se dé un correcto desarrollo socio-económico de estas regiones de modo que la única forma de cubrir este crecimiento de la demanda hídrica es hacer uso de tecnologías de desalación. Esto permitiría obtener agua apta para uso humano a través del recurso que se encuentran en mayor proporción en la superficie terrestre, el agua de mar.

### 3.2. Situación hidrológica en Canarias

Las islas canarias presentan una gran dependencia de los recursos hídricos. Su reparto en la superficie del archipiélago se da de la misma manera que en el caso de la península ibérica, donde la zona norte es la que presenta una mayor cantidad de recursos, esto se debe principalmente por las diferencias en las condiciones climáticas, geográficas y geológicas que presentan la zona septentrional y meridional de cada isla. Esto ha condicionado en gran medida el desarrollo socioeconómico de ciertas regiones, propiciando la implantación de núcleos urbanos, industrias, superficies destinadas al sector agrícola etc. Un claro ejemplo son las islas de Lanzarote y Fuerteventura donde su progreso se ha visto estacando debido a la gran escasez de recursos hídricos.

Actualmente las islas presentan una superficie de 7442 km<sup>2</sup> y según los datos facilitados por el ISTAC la población alcanza un valor de 2.108.121 habitantes en 2017. La demanda total en el archipiélago canario es de 458,1 hm<sup>3</sup>/año y la cantidad de recursos disponibles es de 496,2 hm<sup>3</sup>/año, pero la totalidad de estos recursos no son convencionales.

Recursos	hm <sup>3</sup> /año
Superficiales	25,1
Subterráneos	326,2
Aguas salobres desaladas	32,5
Agua desalada	92
Reutilización	20,5
<b>Total</b>	<b>496,2</b>

Tabla 1: Distribución de los recursos disponibles (Fuente: CIATF)

Así pues observando la tabla anterior se puede concluir que los recursos convencionales no son capaces de cubrir la demanda presente en las islas, y por ello el uso de tecnologías de obtención de recursos no convencionales es una obligación.

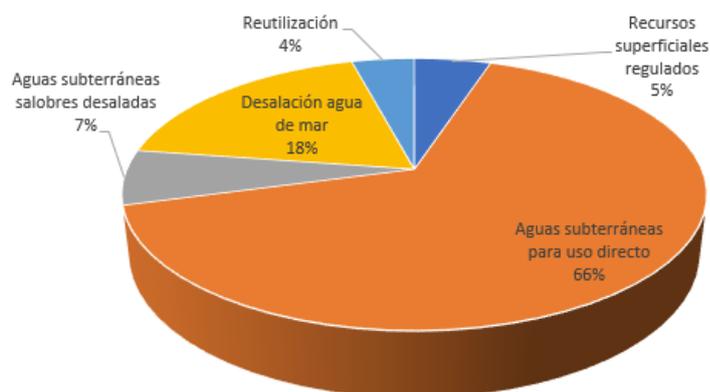


Figura 6: Gráfico de la distribución de recursos (Fuente: Elaboración propia)

Aunque la dependencia del recurso subterráneo sigue manteniendo un valor considerable (66%). Se puede observar que la producción de recursos no convencionales comienza a jugar un papel relevante llegando a alcanzar un 30% de los recursos totales que presentan las islas. De ese porcentaje la mayor parte se obtiene mediante procesos de desalación de aguas. Por lo que si la capacidad de renovación de los recursos subterráneos se ve mermada debido a su gran volumen de extracción, la implantación de plantas desaladoras será una medida muy acertada para cubrir su déficit.

En términos de demanda, el reparto del recurso hídrico entre los sectores es el siguiente:

Sector	hm <sup>3</sup> /año
Urbano	135,8
Turístico	57,4
Industrial	13,6
Riego	230,5
Servicios	3,8
Otros	17

<b>Total</b>	<b>458,1</b>
--------------	--------------

Tabla 2: Volúmenes de agua suministrados según sectores (Fuente: CIATF)

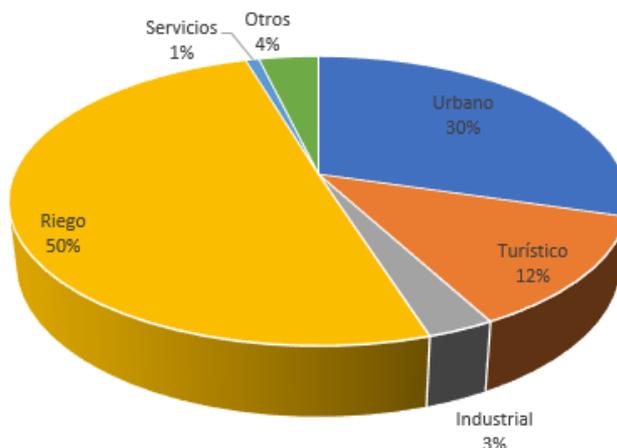


Figura 7: Gráfico de distribución de los volúmenes por sector (Fuente: Elaboración propia)

El ámbito agrícola, con amplia diferencia, es el sector que más demanda requiere. No obstante se ha visto bastante afectado por el aumento de la población y por el auge del sector turístico. Ya que se crean nuevos puntos de demanda de recurso hídrico dando lugar a situaciones complejas donde el cubrir la demanda de la totalidad de islas se convierte en una tarea imposible, lo que propicia que sectores como el agrícola sean incapaces de mantener el ritmo de desarrollo que deberían.

### 3.3. Evolución de la desalación en Canarias y en la isla de Tenerife

La desalación en las islas canarias se han convertido en una práctica vital para mantener el nivel de desarrollo económico y turístico que ha estado en auge durante los últimos años. Por ello es la región de Europa que presenta un mayor número de plantas desaladoras con diversas tecnologías de desalación.

El uso tan intensivo de este proceso de obtención de agua se debe al déficit que ha existido a lo largo de los años de los recursos hídricos convencionales, entre los cuales destaca el agua subterránea, que ha alcanzado tal nivel de sobreexplotación que el recurso no tiene capacidad de renovarse y le es imposible cubrir la demanda presente en las islas.

La primera planta de desalación que entró en funcionamiento en Canarias fue en el año 1964 en Lanzarote. Y partir de ese momento se ha hecho uso de esta forma de obtención de recurso no convencional para abastecer tanto la demanda urbana como la del sector agrícola. Se debe destacar que volumen de agua desalada es tan alto que Canarias actualmente es la comunidad española que mayor capacidad de desalación tiene instalada.

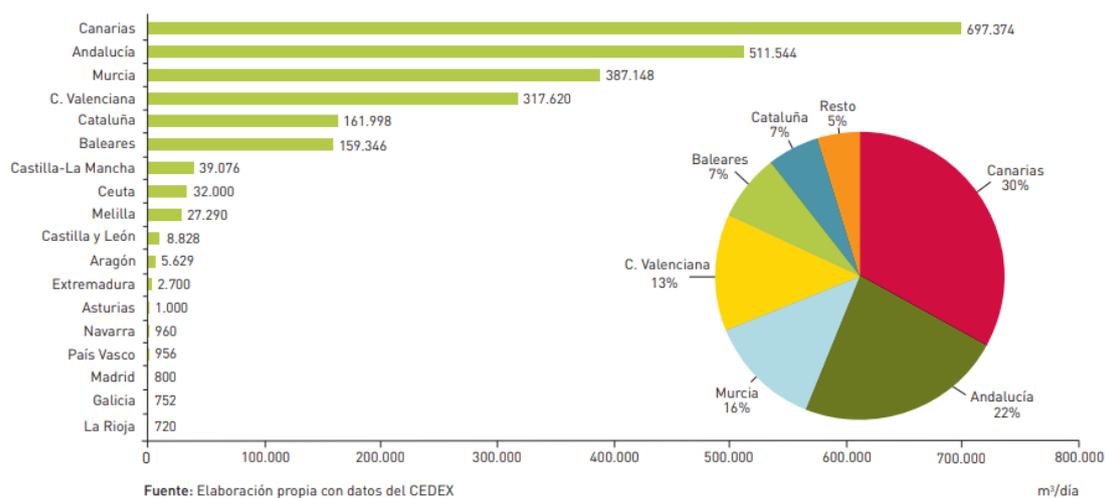


Figura 8: Capacidad instalada de desalación m³/día (Fuente: [www.mapama.com](http://www.mapama.com))

Sin embargo esa situación no se traduce a todas las islas dado que la cantidad de recursos convencionales varía en función de las condiciones que presenta cada una de ellas, como es el caso de las islas orientales, que tienen una alta dependencia del abastecimiento que brindan las plantas de desalación. Para justificar esa situación se mostraron los datos referentes al número total de desaladoras y el volumen de agua desalada producido por isla.

Isla	Nº total de desaladoras	Volumen de agua desalada (hm³/año)	% del volumen total de agua consumida en la isla
Lanzarote	49	16,9	99
Fuerteventura	66	11,9	86
Gran Canaria	129	77,1	52
Tenerife	46	18	9

La Gomera	0	0	0
El Hierro	2	0,5	19
La Palma	1	0,1	0

*Tabla 3: Número total de desaladoras y volumen de agua desalada producida y consumida  
(Fuente: Elaboración propia. CIATF)*

Como se puede observar se cumple la premisa previamente dicha. Las islas de Fuerteventura y Lanzarote se abastecen en gran medida de aguas desaladas dado que presentan un clima árido además que su relieve no favorece que se den precipitaciones. Por otro lado la isla de Gran Canaria es la que produce una mayor cantidad de agua desalada ya que gran parte de la población vive en las zonas costeras. Con respecto a las islas occidentales tenemos una situación totalmente distinta. Su cantidad de recursos hídricos subterráneos es mucho mayor además que se dan cantidad de precipitaciones durante el año lo que favorece su renovación. Por esta razón tanto la isla de la Gomera y La Palma no requieren de la instalación de plantas desaladoras. Y en el caso de la isla de Tenerife y El Hierro se han comenzado a incorporar al uso de este tipo de tecnologías.

Dada una visión general del archipiélago, ahora se comentará en profundidad la situación de la isla de Tenerife, lugar de emplazamiento de la EDAM bajo estudio.

La implantación de plantas desaladoras en la isla de Tenerife se realizó a pequeña escala y con un ámbito privado. Pero en los últimos años se han puesto en marcha diversas desaladoras destinadas al abastecimiento público. Por un lado tenemos la EDAM de Adeje-Arona que tiene una capacidad de producción de 30000 m<sup>3</sup>/día, la segunda mayor desaladora es la de Santa Cruz de Tenerife con una capacidad de 21000 m<sup>3</sup>/día. Después tendríamos la EDAM de la Caleta de Adeje cuya producción es de 10000 m<sup>3</sup>/día. Y la última en entrar en funcionamiento fue la EDAM de Granadilla con una capacidad de 14000 m<sup>3</sup>/día. Todas ellas están destinada a cubrir la demanda del ámbito urbano aunque parte de la capacidad de algunas se destinan al sector agrícola.

Es remarcable que en la isla la problemática de déficit de recursos hídricos es muy notoria en la zona sur. Esto se debe principalmente a las pocas precipitaciones que se dan a lo largo del año y a la escasa existencia de masas de agua subterráneas. Además del aumento de la población en sectores urbanos y el auge de las zonas de explotación

turística. Todo esto ha conllevado que la mayoría de las plantas instaladas en la isla se encuentre emplazadas en regiones pertenecientes a la zona sur.

### **3.4. Desalación de agua de mar**

La desalación de agua de mar se puede definir como un proceso de separación de sales de una solución. No obstante teniendo en consideración las tecnologías existentes se puede distinguir entre procesos que separan el agua de las sales y los que realmente realizan la separación de sales de la solución. El factor principal que los diferencia es la forma en la que se aplique la energía para obtener el proceso de separación.

#### **3.4.1. Procesos de desalación de aguas**

Atendiendo a la premisa impuesta anteriormente se pueden distinguir los siguientes procesos de desalación de agua:

*Destilación súbita multietapa (MSF)*: el proceso se basa en la ebullición de agua en un evaporador que cuenta con diversas cámaras que operan a temperaturas y presiones decrecientes. Es decir, se introduce el agua a un tanque donde se reduce rápidamente la presión del agua por debajo de su presión de vapor para que se produzca su evaporación, como no se evapora la totalidad del fluido el proceso se realiza mediante diversas etapas que operan a presiones cada vez menores. Se suele utilizar en aguas con alta salinidad, temperatura y contaminación. Su principal inconveniente es que el proceso presenta un alto consumo específico por lo que es una tecnología que con el tiempo ha caído en desuso.

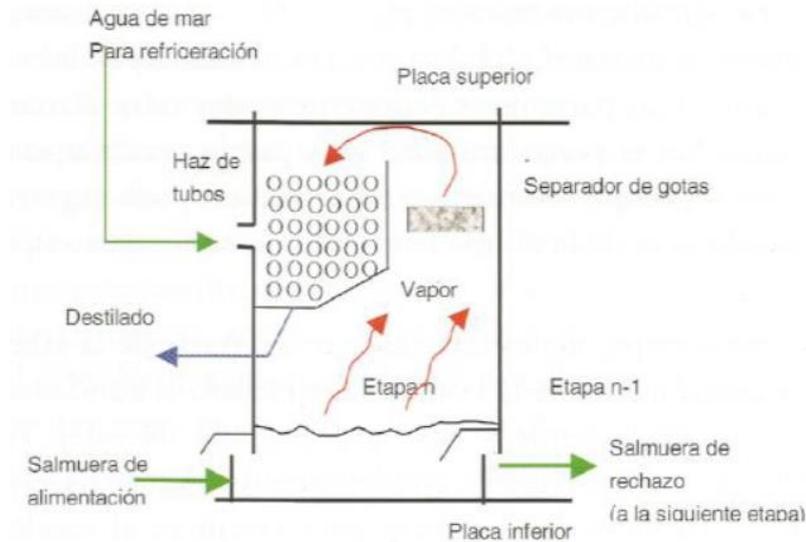


Figura 9: Esquema de una etapa de un evaporador MSF (Fuente: José Miguel Veza)

**Destilación multiefecto (MED):** su principio de funcionamiento es mediante condensación y evaporación. El proceso está compuesto de una serie de tubos horizontales por los que circula un vapor. Este se condensa liberando la energía hacia el exterior de los tubos, ésta es la encargada de evaporar parte del agua de mar que fluye por el exterior. Finalmente se condensa el vapor para obtener el agua con bajo contenido de sales. Este proceso se repite hasta producir el permeado deseado. Los principales inconvenientes de este proceso son su baja eficiencia y la necesidad de grandes extensiones de terreno.

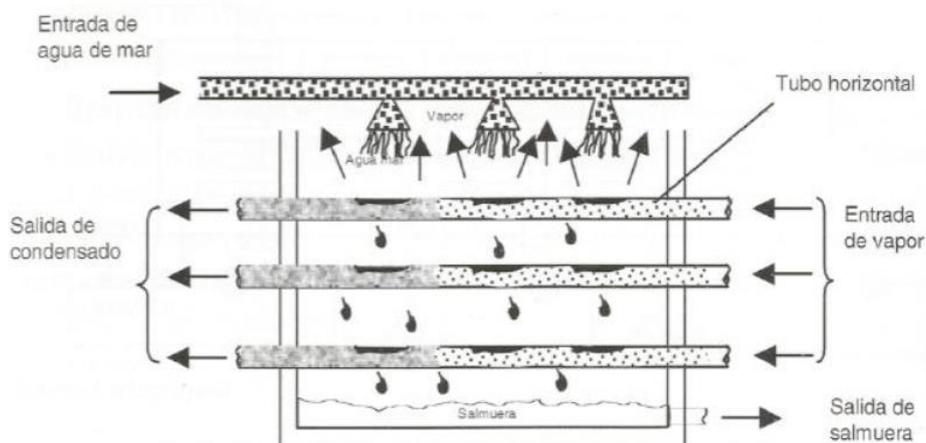


Figura 10: Esquema de una etapa de un evaporador MED (Fuente: José Miguel Veza)

**Electrodialisis (ED):** es un proceso que combina la electrólisis con un par de membranas selectivas. Se dispone una cuba donde se aplica una tensión eléctrica mediante dos electrodos, los cationes se desplazan al electrodo negativo (cátodo) mientras que los aniones se desplazan al positivo (ánodo). Entre ambos electrodos se colocan un par de membranas selectivas (catiónica y aniónica), encargadas cada una de retener iones con una determinada carga. El agua contenida en la cuba se desaliniza de manera progresiva hasta conseguir la calidad deseada. Su coste de instalación es algo mayor al proceso de ósmosis inversa.

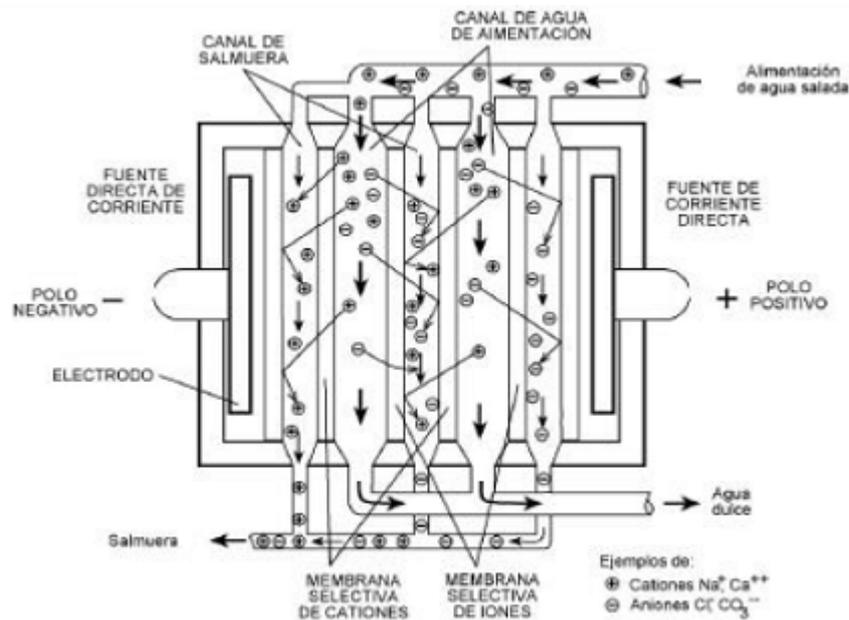


Figura 11: Proceso de electrodialisis (Fuente: José Miguel Veza)

**Compresión de vapor (CV):** el agua de alimentación pasa por un sencillo pretratamiento. A continuación se precalienta hasta elevar a una temperatura próxima a su evaporación. Ahora el flujo caliente se mezcla con una parte de la salmuera y se introduce en el evaporador mediante unas boquillas de dispersión. El vapor obtenido se hace pasar por un compresor que aumenta su presión y temperatura, y se descarga ahora en las tuberías del evaporador que se encargan de aumentar la temperatura. A su paso por las tuberías pierde calor hasta alcanzar su temperatura de saturación y por consiguiente se condensa, obteniendo así el agua producto buscada.

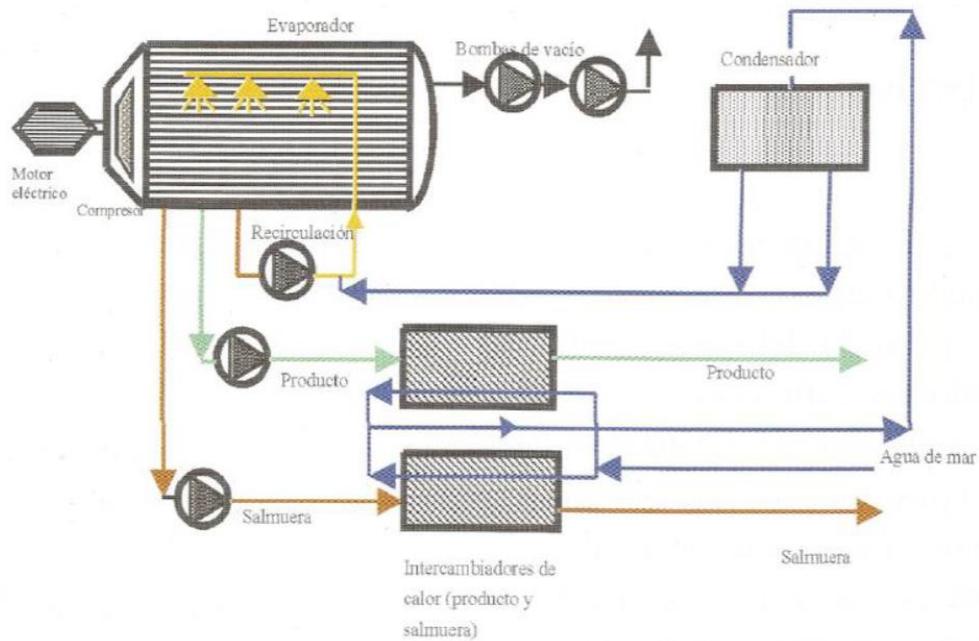


Figura 12: Esquema del proceso de compresión de vapor (Fuente: José Miguel Veza)

**Ósmosis inversa:** este proceso se basa en la ósmosis, un proceso físico natural que se produce en las células de los seres vivos donde dos soluciones de distinta concentración son puestas en contacto mediante una membrana semipermeable con el fin de igualar sus concentraciones.

Para que esta situación se produzca se da un movimiento desde la solución menos concentrada (diluida) hacia la más concentrada con el fin de diluirla y alcanzar ambas la misma concentración. Cuando se alcanzan un cierto desnivel entre ambas soluciones se detiene el paso de agua. Dicho desnivel se denomina presión osmótica, que es el factor determinante para que se dé el proceso de ósmosis inversa. A continuación se mostrará una imagen de este proceso para que sea más fácil su entendimiento.



Figura 13: Proceso ósmosis directa (Fuente: [www.h2agua.com](http://www.h2agua.com))

Ahora para que se dé el proceso contrario, la ósmosis inversa, se tiene que aplicar una presión igual o superior a la osmótica en la solución de mayor concentración. Al aplicar la presión se produce la circulación de la solución de mayor concentración a través de la membrana hacia la solución diluida, alcanzando una presión de equilibrio. La altura que se alcanza en este caso depende de la presión aplicada, de las características de la membrana y de las concentraciones de ambas soluciones.

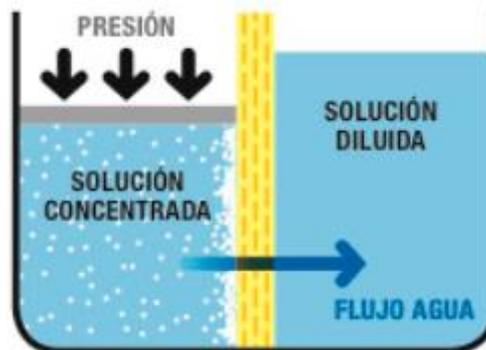


Figura 14: Proceso ósmosis inversa (Fuente: [www.h2agua.com](http://www.h2agua.com))

En caso de que se fuera a utilizar este proceso de manera industrial para desalar agua como es el caso de este estudio se tiene que seguir el siguiente procedimiento: se obtiene el agua de alimentación mediante un sistema de captación que bombea el flujo a otro sistema que nuevamente lo bombea a alta o media presión hacia una membrana semipermeable en la que se obtienen dos flujos. Uno de alta concentración de sales denominado rechazo o salmuera y otro de baja concentración denominado permeado. La membrana se seleccionarán atendiendo a que sean capaces de soportar las elevadas presiones osmóticas y altas concentraciones de sales.

### **3.4.2. Comparativa de las tecnologías de desalación**

Aunque la EDAM bajo estudio hará uso de la ósmosis inversa, en este apartado se hará una comparativa de las tecnologías previamente comentadas para analizar las ventajas y desventajas que presentan cada una de ellas.

Con respecto a la destilación se puede decir que estos procesos presentan un alto consumo energético ya que se requiere una gran cantidad de calor para provocar la evaporación, pero a su vez este cambio de estado no depende prácticamente de la salinidad que tenga el agua. Necesitan una gran extensión de terreno para su implantación, su eficiencia es baja, necesitan una fuente de vapor, producen agua de alta calidad y pueden acoplarse a una central de producción eléctrica.

El proceso de electrodiálisis no requiere de consumo tan altos como la destilación pero en caso de trabajar con soluciones de alta concentración se tendrá que aumentar la intensidad de corriente. No necesita tratamientos químicos muy restrictivos, sus costes de instalación son algo superiores a los de la ósmosis inversa y calidad del agua producto es inferior a la conseguida con las otras tecnologías.

La ósmosis inversa es la tecnología que requiere menor consumo energético, no obstante cuanto mayor sea la concentración de sales de la solución, más energía se requerirá dado que el incremento de sales propia a su vez un aumento en la presión osmótica. Se puede utilizar tanto en agua salobre como en agua de mar, su coste de instalación es relativamente inferior a las otras tecnologías, las características físico-químicas del agua juegan un papel vital a la hora de dimensionar el proceso, precisa pretratamientos restrictivos y separa tantos iones como bacterias y virus con lo que también se puede tratar como un sistema de desinfección.

### **3.4.3. Características básicas del agua a desalar**

Como se comentó en el apartado anterior, las características físico-químicas del agua de alimentación del proceso de ósmosis son determinantes a la hora de diseñar el proceso, por ello se tiene que realizar un análisis previo. Las características básicas que definen al agua son la conductividad eléctrica o salinidad, dureza, pH y anhídrido carbónico libre.

**Salinidad del agua**

Es el contenido total de sales que presenta el agua. Puede variar en función del tipo de agua que se esté tratando, siendo el contenido de sales totales en el agua de mar 40000 ppm mientras que el agua salobre tiene un contenido de 4000 ppm. El uso que tenga el agua determina el contenido límite que pueda contener ya que el agua destinada a uso agrícola no será tan restrictiva como el agua destinada a abastecimiento humano.

El agua se puede clasificar según su salinidad, que se puede expresar como residuo seco a 105 °C o TDS (mg/l o ppm).

Tipo de agua	Salinidad (ppm)
Salmuera	300000
Agua de mar	30000
Agua salobre	3000
Agua potable	300
Agua industrial	30
Agua desionizada	3
Agua pura de calderas	0,3
Agua ultrapura	0,003

*Tabla 4: Valores de salinidad (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))*

El agua tratada en un proceso de ósmosis suele ser salobre o de mar, aunque en ocasiones también se tratan aguas potables o industriales.

La determinación de la salinidad es un proceso lento y además se requiere una muestra de agua. Por lo que se puede optar por medir la conductividad eléctrica, que es indicativa de la cantidad de elementos disueltos que puede contener el agua dado que cuando mayor sea la cantidad más facilidad tendrá de conducir la corriente eléctrica. Este parámetro depende la temperatura, y aumenta cuando ésta lo hace. Por ello se mide siempre a una misma temperatura (20 °C). Se debe destacar que a medida que aumente la conductividad también lo hace su poder de corrosión, por lo que se debe

tener especial atención para evitar posibles daños en equipos que formen parte del proceso.

### **Composición química del agua**

Todos los elementos contenidos en el agua son los causantes de su salinidad. Por tanto es primordial tener un conocimiento de los efectos que puede tener sobre el agua y el usuario final de la misma, o incluso sobre las membranas. Así pues estos son todos los elementos que se han de tener en consideración cuando se vaya a estudiar la composición del agua.

- **Sodio**: metal alcalino que se encuentra frecuentemente en la composición de las aguas debido a que todos los componentes sódicos son solubles, indicativo de que nunca precipitarán en las membranas. Su concentración en el agua de mar suele ser de 10000 mg/l y se encuentra en forma de carbonatos, cloruros sódicos o bicarbonatos.
- **Calcio y Magnesio**: suelen estar presentes en todas las aguas y abundan en las aguas provenientes del subsuelo. Son responsables de la mayoría de las incrustaciones que se dan cuando se producen variaciones de temperatura, pH y presión. Desde el punto de vista agrícola producen efectos indirectos ya que bloquean la absorción de otros elementos por parte de los cultivos y favorecen la aparición de incrustaciones de carbonatos en los equipos de riego.
- **Cloro**: es el elemento que se encuentran en una mayor concentración en el agua de mar, se mueve entorno a los 20000 mg/l. Se recomienda un valor de 150 ppm independientemente del uso que se la vaya a dar.
- **Sulfatos**: son los más frecuentes en el sulfato sódico y el magnésico. Sus concentraciones pueden alcanzar unos 2000 mg/l. Para uso agrícola se recomienda concentraciones inferiores a 1,2g/l. Puede precipitar sobre las membranas por lo que debe vigilarse.

- Carbonatos y bicarbonatos: se encuentra en todas las aguas y en ocasiones en concentraciones muy elevadas. Puede elevar el pH de agua hasta 10. Pueden precipitar sobre la superficie de las membranas. Tener en consideración el efecto ión común, que hace referencia al cambio de solubilidad que puede sufrir una sal debido a la presencia de otras que no tienen iones comunes con ella.
- Nitratos: si existe un alto contenido de nitrato puede ser indicativo de que hay presencia de bacterias peligrosas.
- Hierro: contenido en la mayoría de las aguas. Su concentración debe de estar por debajo de 0,5 ppm para evitar posibles efectos adversos. Se puede encontrar en forma de dos tipos de iones, el ferroso y el férrico. Pueden dar lugar a situaciones donde se favorezca el crecimiento de bacterias como la crenothrix.
- Manganeso: presenta un comportamiento similar al hierro. Aparece como bicarbonato manganeso soluble que cambia a hidróxido de manganeso insoluble cuando reacciona con oxígeno y produce manchas de difícil eliminación. El mejor pretratamiento para ambos elementos es realizar la captación del agua mediante bombas sumergibles para evitar su exposición al aire.
- Sílice: no contribuye a dureza del agua pero es una parte importante de las incrustaciones formadas por diversas aguas. Su solubilidad está directamente relacionada con la temperatura del agua.
- Flúor: suele estar en pequeñas concentraciones de aguas provenientes del subsuelo. Su rechazo depende directamente de la composición completa del agua aunque suele ser alto, lo que implica que su concentración sea elevada y se pueda dar su precipitación.
- Bario y Estroncio: se detectan en aguas subterráneas. Los sulfatos de estos dos elementos son mucho menos solubles que el calcio por lo que pueden precipitar. El hexametáfosfato sódico actúa de manera eficaz como antiincrustante.

- Aluminio: solo aparece cuando se ha producido un vertido o contaminación industrial. El hidróxido de aluminio presenta una solubilidad que varía en función del valor del pH, si éste se encuentre por debajo de 5. En caso de que se produzca precipitación, se elimina mediante la acidificación.

### **Gases disueltos**

Además de la presencia de iones, las aguas de distintas procedencias pueden contener gases disueltos. Como la solubilidad de los gases es inversamente proporcional a la temperatura y aumenta con la presión, los gases suelen intervenir en problemas relacionados con la corrosión y la precipitación. Los gases más comunes son los siguientes:

- Oxígeno disuelto: la concentración de este elemento en el agua es indicativo de su calidad sanitaria. Disuelto en el agua acelera los ataques corrosivos sobre el hierro, aceros y otros metales. También se acelera este proceso si el pH del agua. Su presencia en el agua favorece la proliferación de bacterias aerobias que provocan la contaminación de las membranas.
- Sulfhídrico: proporciona un olor característico. Cantidades pequeñas de en torno a 0,5 ppm forman un ácido débil y el agua es generalmente corrosiva. Se encuentra en aguas subterráneas y en contacto con el aire produce precipitados de azufre que dan lugar a ensuciamientos de las membranas. Se puede eliminar mediante desgasificación o cloración.
- Dióxido de carbono: relacionado directamente con la cantidad de materia orgánica que contiene el agua. Provoca descensos en el pH y por consiguiente hace más corrosiva al agua. Como el proceso de ósmosis no lo elimina se tiene que realizar una etapa de postratamiento para evitar daños en los equipos del sistema de distribución.

### **Temperatura**

Su valor varía en gran medida según la procedencia del agua de alimentación. Tiene una gran influencia en el correcto funcionamiento de las membranas por lo que se tiene que tener en consideración los siguientes aspectos:

- La solubilidad de determinadas sales aumenta con la temperatura, si este valor incrementa existe riesgo de precipitación.
- Influye en la viscosidad del agua y en la dilatación de los materiales de las membranas. Se debe tener muy en cuenta a la hora de dimensionar membranas y bombas.
- Favorece a la actividad biológica de microorganismos que pueden ensuciar las membranas.

### **pH**

Es consecuente de la cantidad de sales disueltas en el agua. Influye en la solubilidad de carbonato ya que condiciona su precipitación. Limita el empleo de membranas de celulosa, que operan con el valor exacto de 5. Las aguas para consumo agrícola deben presentar un valor de pH que se encuentre entre los valores de 6,5 y 8,5.

### **Alcalinidad**

Capacidad del agua para neutralizar un ácido. El agua puede presentar un pH ligeramente inferior a 7 pero a su vez tener sales que neutralizan el ácido, esto es indicativo de que el agua presenta una alcalinidad, la cual se puede medir.

### **Dureza**

Puede darse de formas: carbonatada, que es causada por carbonatos y se puede eliminar mediante la ebullición del agua. Y la no carbonatada o permanente causada por nitratos, cloruros, y sulfatos de calcio y magnesio.

## **3.4.4. Configuración de la planta desaladora de ósmosis inversa**

El diseño como tal puede ser más o menos complejo dependiendo de las consideraciones que se haya de tener cuenta con relación al agua de alimentación, su capacidad o la propia calidad del permeado que se quiera obtener. Y debe tener todos los equipos necesarios que conformen su ciclo completo de desalación, desde su

---

captación hasta su llegada al depósito regulador. Un ejemplo de esquema de funcionamiento sería el mostrado a continuación.

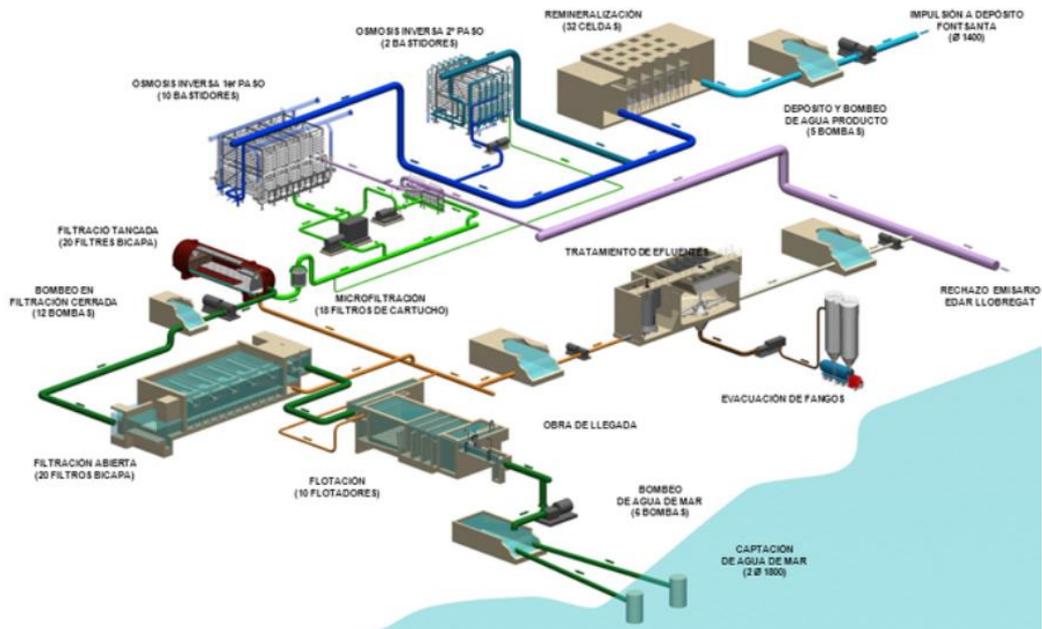


Figura 15: Esquema de una planta de desalación mediante ósmosis inversa (Fuente: [www.degremont.es](http://www.degremont.es))

La planta desaladora en su totalidad está formada de las siguientes partes:

- ❖ Sistema de captación: se encarga de obtener el agua que va a alimentar la planta.
- ❖ Pretratamiento físico-químico: se ajustan las condiciones del agua de alimentación para evitar posibles situaciones adversas que puedan afectar a los equipos de la instalación.
- ❖ Posttratamiento: se realiza en el permeado obtenido con el fin de ajustar sus características a las implantadas por el uso que se le vaya a dar.
- ❖ Núcleo de desalación: compuesto por el bastidor de membranas, varias bombas y el sistema de recuperación de energía. Aquí se produce el proceso de desalación.
- ❖ Distribución: encarga de llevar el permeado desde la salida del núcleo de desalación hasta un depósito regulador o a las instalaciones de la empresa distribuidora de agua.
- ❖ Rechazo: se encarga de devolver al mar el flujo rechazo de las membranas, que presenta un alto contenido de sales.

### 3.4.5. Captación del agua de mar

La captación se puede realizar mediante toma abierta o cerrada. Su elección influye de manera vital en las condiciones en las que se capta el agua de alimentación.

#### **Toma de cerrada (pozos)**

Se realiza mediante la captación de agua mediante pozos, el agua se bombea gracias a la instalación de una bomba sumergible en su interior. Suele ser la más utilizada ya que el agua obtenida se encuentra en unas condiciones más favorables para realizar el proceso de desalación. La profundidad del pozo varía en función de la permeabilidad que presente el terreno ya que la captación se realiza mediante la permeación de los caudales a través de sus diversos estratos, dicha profundidad tiene que ser lo suficientemente grande como para que se obtenga el caudal de alimentación requerido. Las ventajas principales que brinda son las siguientes:

- Limpieza del agua gracias al filtrado de esta a su paso por el terreno lo que implica una disminución del índice de turbidez (NTU) y de colmatación (SDI).
- Ausencia de actividad orgánica y biológica.
- Baja contaminación.
- Temperaturas bastante estables.
- Bajo contenido de oxígeno disuelto.

Las ventajas citadas permiten recudir en considerablemente los costes de los tratamientos, especialmente químicos, e incluso de equipos de la instalación.

Sin embargo, la toma mediante pozos también presenta los siguientes inconvenientes:

- Concentraciones importantes de elementos secundarios como el hierro, aluminio, sílice, flúor u otros elementos que implican la realización de tratamientos previos antes de que el agua de alimentación entre en los bastidores de membranas.
- Contaminación por nitratos, pesticidas, etc.
- Variaciones en la composición química del agua a lo largo del tiempo incluso según la época del año.

Con relación a la construcción de los pozos se debe destacar que su construcción puede ser más complicada en las zonas costeras. Y además puede producirse pérdidas

de caudal debido al arrastre de elementos finos que pueden obstruir el permeado del agua del pozo.

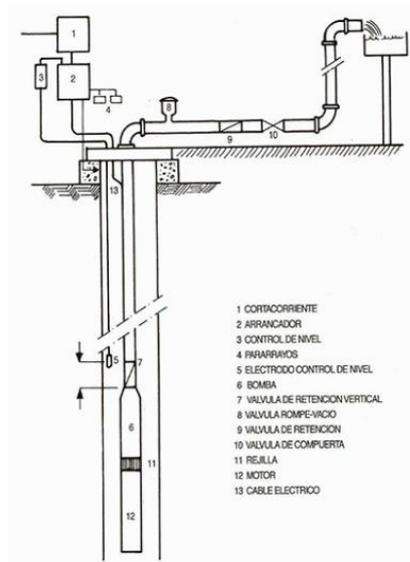


Figura 16. Esquema captación cerrada mediante pozos (Fuente: [mrsservicios.cl](http://mrsservicios.cl))

Aunque la toma mediante pozo cerrado es la más utilizada existen diversas variaciones constructivas a la hora de realiza la captación cerrada de agua de mar:

### Cántara de captación

Se excava un depósito por debajo de la cota del agua, se puede construir con forma circular (instalaciones pequeñas) o rectangular (instalaciones grandes). Esto permite el filtrado del agua a través de sus paredes, la cual se extrae mediante bombas horizontales. En cuanto a la altura del depósito se determina atendiendo a la altura de aspiración, sumergencia y distancias entre base de la aspiración y fondo del depósito. Además de estar condicionada por las mareas, siendo la bajamar la referencia para indicar el nivel inferior del depósito.

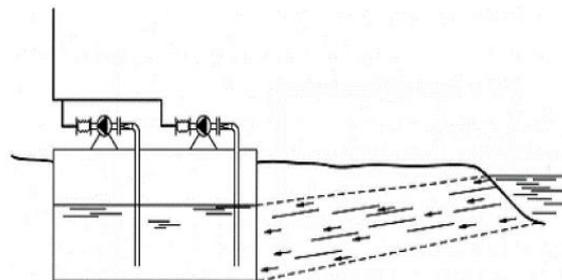
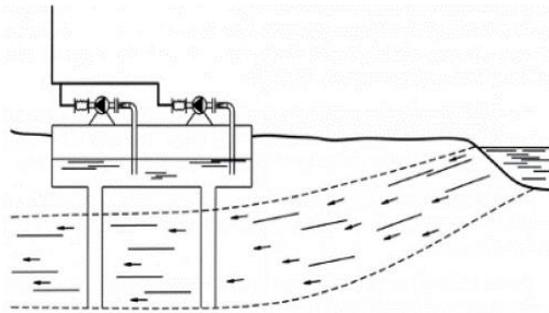


Figura 17: Cántara de captación (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))

### Cántara de captación con sondeos verticales

Cuando la permeabilidad del terreno no es suficiente como para obtener el caudal necesario se pueden realizar perforaciones en el fondo de la cántara hasta alcanzar una capa del terreno más permeable que aumente el caudal de captación. Se suele utilizar en instalaciones que se encuentran relativamente alejadas de la costa.



*Figura 18: Cántara de captación con sondeos verticales (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))*

### Toma de abierta

Se recurre a este tipo de tomas cuando la permeabilidad no es suficientemente grande como para realizar la captación mediante el tipo anterior. Por lo que permite se utiliza para instalaciones que requieran grandes caudales, pero esto a su vez provoca los siguientes inconvenientes:

- Alto nivel de actividad orgánica y biológica.
- Incremento del contenido de sólidos en suspensión.
- Mayor exposición a la contaminación.
- Altas concentraciones de oxígeno disuelto
- Amplia variación de temperaturas.
- Composición química homogénea.

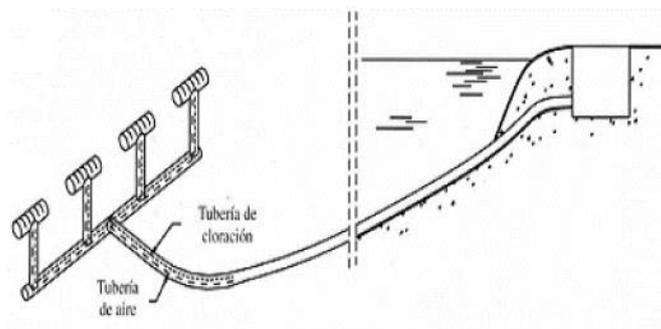
Existen dos formas de realizar esta captación:

### Toma en canal

Es de menor longitud y más superficial, lo que implica que se vea más afectada por la acción del oleaje lo que conlleva la aparición de algas contaminantes y turbidez. Debido a esto se recomienda instalar una etapa de pretratamiento a la entrada, que consistiría en la instalación de rejillas fijas y móviles resistentes a la corrosión.

### Emisario submarino

En este caso se requiere una tubería de captación capaz de soportar la corrosión además de ser flexible. Se sumerge a una profundidad lo bastante grande para evitar la influencia del oleaje. Su anclaje se realiza mediante dados de hormigón.



*Figura 19: Captación abierta mediante emisario submarino (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))*

### **3.4.6. Pretratamiento**

Esta etapa es fundamental para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos de la instalación, prestando especial atención al núcleo de desalación. La forma de captar el agua juega un papel determinante a la hora de su dimensionado dado que la composición del agua puede ser distinta lo que conlleva a tener que realizar más o menos etapas de pretratamiento. Existen tanto pretratamientos físicos como químicos.

#### **Pretratamiento físico**

Su objetivo es eliminar los sólidos, materia orgánica y algas que pueda contener el agua de alimentación. Estos elementos proceden de la erosión de los terrenos, la disolución de sustancias minerales y la descomposición de sustancias orgánicas.

Se realiza mediante diversas etapas de filtración, aunque se puede combinar con otros procesos como la decantación para mejorar su eficacia. Y si los niveles de partículas siguen siendo excesivos se implanta otra etapa de filtración mediante cartuchos. Hay que destacar que ambas etapas siempre se implantan sin importar las características que presente el agua por motivos de seguridad. Por último en casos especiales se puede hacer uso de técnicas más avanzadas de filtración como la micro y ultrafiltración.

A continuación se explicarán las distintas técnicas de filtración:

- Filtración mediante filtros de arena: se retienen partículas y sólidos de hasta 20 micras. Se hace uso de filtros de arena que son generalmente de presión y pueden ser verticales u horizontales. Los verticales alcanzan una calidad de filtrado mayor y más homogénea pero su superficie de filtración es limitada. En caso de trabajar con grandes caudales se hará uso de los horizontales.
- Filtración mediante filtros de cartucho: garantizan un nivel de filtración mínima de 5 micras, que es valor requerido por los fabricantes de membranas. Los filtros son depósitos metálicos recubiertos interiormente y en disposición vertical. Utilizan como medio filtrante cartuchos de eje hueco con orificios donde se enrolla hilo de polipropileno a una determinada tensión que garantiza la retención de sólidos.
- Filtración mediante filtros precapa: se emplea cuando se esté haciendo uso de aguas susceptibles a la contaminación, como las que se obtienen mediante las tomas superficiales abiertas. Su principio de funcionamiento es igual de los filtros de arena pero en este caso se tiene un elemento de filtración que actúa a modo de soporte de una capa de material filtrante muy fina, de forma que el agua se verá obligada a atravesar esta precapa antes de atravesar el elemento de filtración.
- Microfiltración: es capaz de retener partículas de hasta 0,1 micras. En este caso se emplea como medio filtrante una membrana de mayor nivel de retención que los filtros previamente comentados, por lo que se producirá un ensuciamiento más rápido y se tendrán que realizar limpiezas periódicas.
- Ultrafiltración: su capacidad de filtración llega hasta las 0,01 micras. Al igual que el método de filtración anterior, hace uso de membranas, pero en este caso se hace uso de dos tipos distintos, las de arrollamiento en espiral y las de fibra hueca. Su uso

solo se justifica en situaciones muy especiales debido a sus problemas de ensuciamiento y el costo que presentan.

### **Pretratamiento químico**

La composición química del agua o la actividad biológica que en ella se desarrolla puede crear problemas en las membranas por lo que se deben ajustar sus parámetros previamente para evitarlos. Aquí es donde entran en juego los pretratamientos químicos, los cuales se describirán a continuación:

**Desinfección:** proceso de esterilización del agua de alimentación que culmina con la eliminación de la actividad biológica. Se consigue mediante la aplicación de hipoclorito sódico, en dosis no muy constantes.

**Decloración:** se realiza cuando se opera con membranas de poliamida ya que no toleran el cloro residual u otros elementos que pueda contener el agua de alimentación. Se aplica una vez finalizado el proceso de desinfección. Se hace uso de bisulfito sódico, un agente reductor capaz de eliminar estos elementos.

**Regulación de pH:** el agua de mar suele presentar un pH de 8. Esto puede provocar desgastes en las membranas o precipitación de sales como el bicarbonato cálcico. Por lo que el ajuste de pH se realiza mediante la dosificación de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) en concentraciones del 96-98% antes del filtro de cartucho para evitar la precipitación de carbonatos cálcicos en las membranas. Como se trata de un líquido altamente corrosivo se recomienda que en instalaciones pequeñas se sustituya por ácido clorhídrico (HCl) con concentración de 100%.

**Antiincrustante:** se debe poner especial atención a las sales poco solubles que puede contener el agua como son el sulfato cálcico, sulfato de bórico, sulfato estróncico y fluoruro cálcico para evitar su precipitación sobre la membrana. Para ello se hará uso de un dispersante compatible con la membrana. Su aplicación debería realizarse después del paso del agua por los filtros de arena y antes de los filtros de cartuchos para evitar que el primer filtrado retenga parte del dispersante, y en caso de que parte de este no se acabe de disolver, el segundo filtrado lo retiene para evitar su entrada en las membranas.

### 3.4.7. Postratamiento

Una vez finalizo el proceso de desalación se debe ajustar el permeado al uso que se le vaya a dar. El agua producto sale con un pH en torno a 5 por lo que habría que aumentarlo a un mínimo de 6,5 para hacerla apta para consumo agrícola. También hay otros elementos que se deben corregir para estabilizar el agua como la baja alcalinidad y la pobre concentración de calcio. Para conseguir la estabilización se puede aplicar tres procedimientos:

Descarbonatación o desgasificación: se realiza mediante una torre de agua, el agua entra por la parte superior y fluye a través de un material de diversos tamaños y formas. Simultáneamente se inyecta un gas distinto del que se quiera separar, a contracorriente. De esta forma el CO<sub>2</sub> disminuye su concentración a menos de 10m/l y el pH se queda entre 6 y 6,5.

Adición de productos químicos: para conseguir la estabilización se hace uso de NaOH (sosa cáustica) o Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (soda ash), pero no garantizan que el agua no sea corrosiva por lo que se un inhibidor de corrosión.

Mezcla con otras aguas: el agua desalada se mezcla con otra de distinto origen. En la mezcla tiene que haber mínimo un 10% de agua desalada

En caso de que se quiera evitar cualquier actividad biología en las tuberías o en el depósito de regulación se puede aplicar también una post-cloración mediante gas Cloro, hipoclorito sódico o hipoclorito cálcico.

### 3.4.8. Núcleo de desalación

#### Bastidor de membranas

Los bastidores de membranas están constituidos de una estructura metálica sobre la que se colocan los tubos de presión. Su objetivo es mantener sujetos tanto los tubos de presión como las membranas que se encuentran en su interior durante el proceso de desalación, y con mayor importancia en el arranque de la instalación donde se pueden producir desplazamientos debidos a golpes de ariete.

El bastidor siempre se diseña con la premisa de que ocupe el menor espacio posible pero en caso de requerir una mayor capacidad se debe aumentar su altura, algo

que puede dificultar las labores de mantenimiento. De manera que para evitar alturas innecesarias se debe estudiar la distribución adecuada de los tubos de presión. El bastidor aparte de sujetar los tubos también tiene la labor de sujetar los colectores de alta presión, distribución y rechazo. En la parte superior de ellos se deben instalar llaves de purga para la eliminación del aire en las operaciones de arranque de la instalación, y como se pueden producir fugas también es recomendable disponer canaletas debajo de cada fila de tubos de presión. La separación entre bastidores tiene que ser lo suficientemente grande para garantizar la correcta realización de los trabajos de mantenimiento. Entre los extremos anterior y posterior de los bastidores y las paredes debe existir una distancia mínima de 2 metros en tubos de 6 membranas y 3 metros en los de 7.



*Figura 20: Disposición de varios bastidores de ósmosis (Fuente. [www.laenergíadelcamnio.com](http://www.laenergíadelcamnio.com))*

Con respecto a membranas contenidos en los tubos de presión, según la bibliografía, las más utilizadas para ósmosis inversa en situaciones como las que se plantea en este estudio son las de arrollamiento en espiral. Generalmente se alojan entre 6 ó 7 por tubo de presión y se conectan entre ellas. Actualmente, estos tubos de presión permiten la conexión lateral de la alimentación y el rechazo, facilitando en gran medida su montaje.

Aunque en la planta únicamente se haga uso de este tipo de membranas, se hará una breve descripción de los tipos que existen.

**Membranas de tipo plano:** es el primer tipo que se utilizó y el más sencillo. Cuentan con una lámina que se coloca dentro de un marco que actúa de soporte, y le confiere rigidez

y resistencia. Se colocan unas encima de otras formando una columna de membranas. Su principal inconveniente es la baja producci3n que tienen por lo que su uso se acota a instalaciones de baja capacidad. Pero a su vez presentan la ventaja de que se obstruyen menos que otros tipos y su proceso de limpieza es muy sencillo.

**Membranas tubulares:** en este caso la membrana se coloca en el interior de un tubo de PVC, que soporta la presi3n del proceso de desalaci3n. Éste contar3 con una serie de orificios que permiten la entrada y salida del agua. La membrana se alimenta por su interior mientras que el permeado se obtiene por la parte exterior. Se pueden disponer varios tubos en paralelo, si se busca aumentar su capacidad de producci3n.

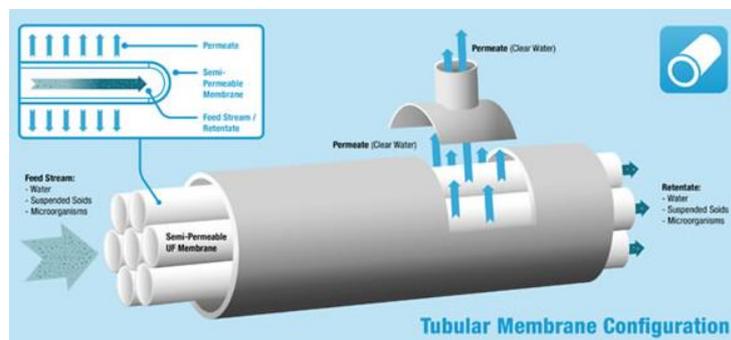


Figura 21: Membrana tubular (Fuente: [www.acsmedioambiente.com](http://www.acsmedioambiente.com))

**Membranas de fibra hueca:** est3 formada por haz de millones de tubos capilares, que son huecos interiormente y tienen el tama1o de un pelo humano. Se agrupan dentro de un tubo que tiene la funci3n de carcasa protectora y permite la circulaci3n del agua de alimentaci3n. El tubo est3 fabricado de PRFV para evitar la corrosi3n. La superficie total de las membranas es muy grande lo que posibilita la obtenci3n de un caudal de permeado elevado.

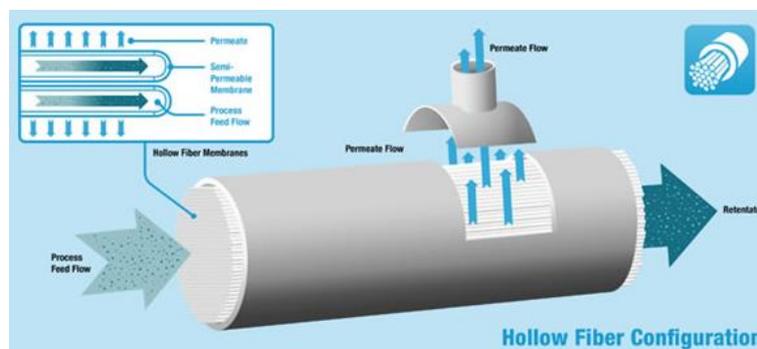


Figura 22: Membrana fibra hueca (Fuente: [www.acsmedioambiente.com](http://www.acsmedioambiente.com))

Membranas de arrollamiento en espiral: están constituidas por varias láminas rectangulares que se enrollan alrededor de un eje cilíndrico que cuenta con una serie de perforaciones por las que se obtienen el flujo de permeado. Entre cada lámina se coloca un separador impermeable y una malla. Ésta última determina los canales por los que circula el agua de alimentación, su forma cuadrículada garantiza un régimen turbulento que reduce la posibilidad de que se produzcan obstrucciones debidas a elementos extraños. Por otro lado el separador aísla el caudal que circula por cada lámina con el fin de obtener dos flujos, uno de permeado y otro de salmuera.

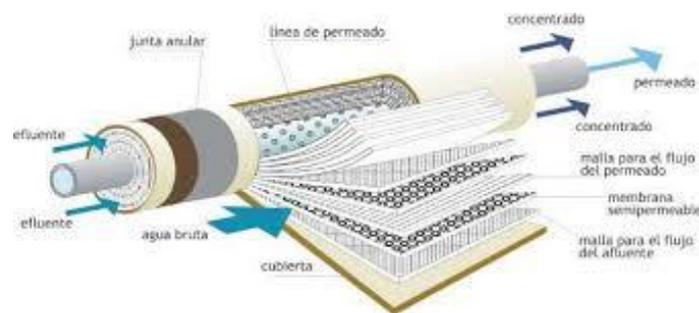


Figura 23: membrana de arrollamiento en espiral (Fuente [www.acondicionamientos.com.ar](http://www.acondicionamientos.com.ar))

### Parámetros técnicos de las membranas de ósmosis inversa

A la hora de dimensionar el núcleo de desalación, existen una serie de parámetros que condicionan el diseño de las membranas, y se tiene que hacer un estudio de estas para determinar que valores deben presentar con el fin de dimensionar un proceso eficiente y que a su vez produzca un caudal de permeado apto para la aplicación que se le vaya a dar.

Presión: siempre tendrá que ser mayor que la presión osmótica diferencial, y tendrá que tener a su vez un valor tal que posibilite el caudal suficiente para que las membranas operen correctamente. La presión máxima de operación vendrá fijada por el fabricante de membranas y en ninguna situación se deberá de sobrepasar con el fin de garantizar su integridad.

Temperatura: su valor varía en función de la localización donde se desarrolle el proceso o la época del año. Es importante remarcar que las membranas de ósmosis inversa pueden operar con temperaturas que estén por debajo de los 45 °C.

Rechazo: es el factor primordial de la membrana y impone las condiciones en las que opera la misma con relación al agua que se está tratando. El rechazo se define mediante dos parámetros: el paso y rechazos de sales. Por lo que si se tiene un rechazo del 99,6% esto es indicativo de que la membrana tiene un paso de sales del 0,4%.

Conversión: es relación entre el caudal de permeado que se obtiene y el agua de alimentación aportada. Se puede variar atendiendo a unos límites muy concretos. La conversión está condicionada por la concentración de sales de la salmuera ya que cuanto menor sea su caudal, más concentrado será éste. Y se puede producir la precipitación de sales en las membranas.

Factor de ensuciamiento (fouling factor): es un número, menor de 1 que expresa el deterioro que se produce en el caudal y rechazo de una membrana en un año de operación. Este valor permite dimensionar las membranas con un cierto margen de seguridad.

### **Configuración de las membranas**

Anteriormente se comentó que dentro del tubo de presión las membranas se colocan en serie, la finalidad de esta disposición es que cada membrana obtenga el rechazo producido por la anterior y así sucesivamente. La capacidad de los tubos es de 6-7 membranas. Y para mejorar la capacidad de producción se pueden implantar módulos en paralelo. Que se pueden estructurar de diversas formas mediante la combinación de etapas y pasos con el fin de adaptarse a la capacidad de producción deseada.

Se denomina etapa a las unidades de producción que son alimentadas por un único equipo de alta presión. De forma más explicativa se puede considerar una etapa como el conjunto de tubos de presión dispuestos de forma paralela que son alimentados por una única bomba. Si se desea aumentar la eficiencia de la instalación, se podría alimentar otro tubo de presión mediante la salmuera que vierta un tubo previo a este, por lo que así se constituirá otra etapa. Si se aumenta el número de etapas se consigue

umentar la conversión del proceso, lo que se traduce en la obtención de un mayor caudal de permeado. Pero esto a su vez provoca una disminución de calidad de permeado, ya que la salinidad que presenta el flujo de alimentación de cada etapa es cada vez mayor.

Por otro lado un paso es un grupo de tubos de presión que son alimentados mediante el flujo de la primera etapa y que requieren de una bomba para poder operar correctamente, es decir, el caudal de rechazo de la primera etapa se bombea nuevamente para poder realizar el proceso de ósmosis en la siguiente etapa.

Ahora que se conoce el significado de ambos parámetros se puede explicar el funcionamiento de las diversas estructuras de producción.

Simple etapa: conjunto de tubos de presión que se disponen en paralelo y son alimentados mediante una única bomba de alta presión. Es una configuración muy ineficiente, pero es la más empleada para desalar agua de mar debido a su baja tasa de conversión.

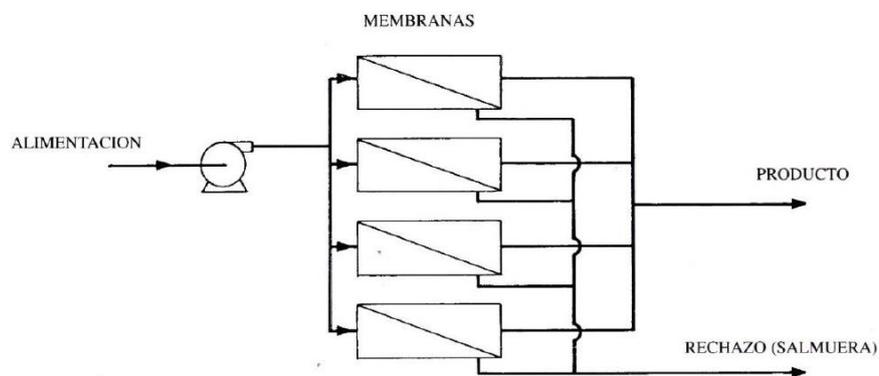


Figura 24: Esquema instalación simple etapa (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))

Etapas de salmuera: es la configuración que más se utiliza. La disposición de tubos se realiza de forma que hay un conjunto de tubos en paralelo y otros en serie. El rechazo de salmuera que generan los de la primera etapa se utiliza como flujo de alimentación para la siguiente. En cada etapa el caudal de rechazo se va disminuyendo por lo que cada vez se requiere menos superficie de membrana para realizar el proceso de ósmosis. Mediante esta configuración se obtiene una alta conversión. La imposición del número de etapas está condicionada por la composición química del agua ya que en cada etapa la

concentración de la sal aumenta, y su solubilidad es la que marca la capacidad de producción del proceso.

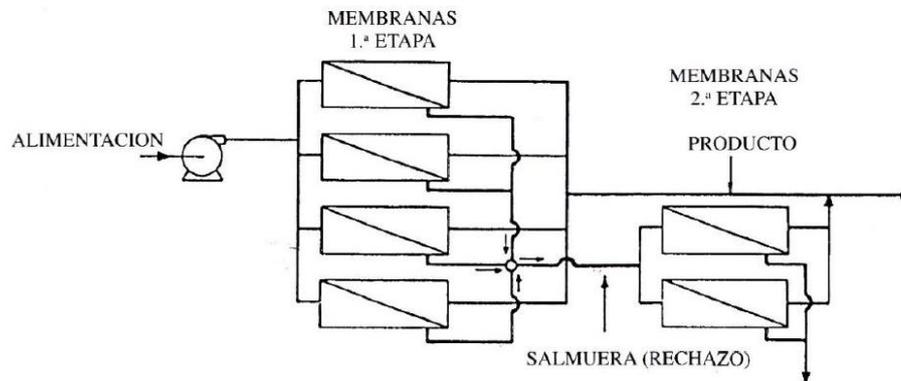


Figura 25: Esquema etapas de salmuera (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))

**Etapas de producto:** se emplea cuando se requiere obtener un permeado de alta calidad. En esta configuración se tiene una primera etapa cuyo rechazo se bombea con el fin de alimentar una segunda etapa. Su utilización es cada vez menor ya que actualmente existen membranas que permiten obtener un permeado de buena calidad en un único paso.

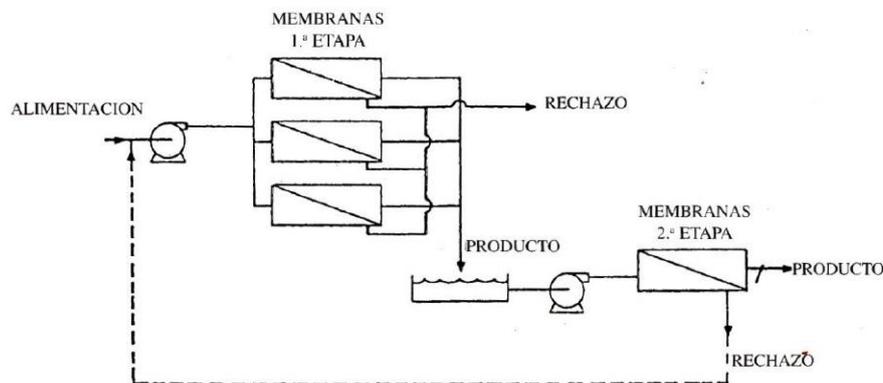


Figura 26: Esquema etapas de producto (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))

### **Recuperador de energía**

Se instalan en plantas destinadas a desalar agua de mar dado que presentan una baja recuperación. El aprovechamiento de la energía contenida en la salmuera se puede realizar mediante diversos equipos, las más utilizadas son las turbinas Pelton y los intercambiadores de presión.

Las primeras transforman la energía de presión del rechazo en energía cinética mientras que el intercambiador de presión tiene la capacidad de transferir la alta presión de la salmuera al flujo de agua de alimentación.

### **Bomba de alta presión**

Es el elemento vital para que se produzca el proceso de ósmosis inversa. Una vez se ha captado el agua de alimentación y ha pasado a través del pretratamiento esta bomba se encarga de elevar la presión a un valor que esté por encima de la presión osmótica para que se dé lugar el proceso de desalación.

### **Bomba booster**

Tiene la función de elevar la presión del flujo de agua de alimentación que ha pasado por el intercambiador de presión hasta que alcance el valor de presión de entrada a las membranas. Su instalación se debe a las pérdidas que se dan en los tubos de presión, en las conducciones y en el intercambiador de presión que propician que el segundo flujo de entrada a las membranas no se encuentre a la presión requerida para el proceso de desalación.

## **3.4.9. Sistema de distribución**

Por medio de una bomba se eleva el permeado obtenido de la planta al depósito regulador. Éste último se suele construir en zonas cuya cota está por encima de los puntos de consumo para realizar el trasvase del agua desalada mediante gravedad, eliminando así la necesidad de instalación de una bomba.

## **3.4.10. Salmuera**

Es el flujo de rechazo de las membranas que presenta una alta concentración en sales. Si se vierte al mar puede producir impactos sobre el medio que pueden afectar de manera muy negativa a los organismos marinos. Para evitar que el flujo de rechazo afecte de manera directa al medio se puede realizar el vertido mediante emisario submarino. En este método la tubería de descarga cuenta con una serie de difusores que propician la dispersión de la salmuera. También se puede realizar el vertido mediante dilución previa donde la salmuera se retiene en un depósito y se diluye mediante la adición de agua procedente del mar.

Cabe destacar que se puede evitar el impacto que produce la salmuera mediante sistemas que le realizan una revaloración o haciendo uso de métodos como del de inyección profunda.

### **3.5 Energía eólica**

Es la energía proveniente del viento, que genera energía cinética por efecto de las corrientes del aire. Mediante la acción de esta energía sobre equipos de aprovechamiento del recurso eólico, mejor llamados aerogeneradores, se puede obtener energía eléctrica que puede ser aprovechada por el ser humano. La energía eólica es actualmente la energía más viable tanto en el ámbito técnico como en el económico en comparación al resto de energías renovables. En comparación a las energías tradicionales, la energía eólica presenta las siguientes ventajas:

- Es una energía renovable, es decir, no se agota dado que su origen se debe a procesos atmosféricos relacionados con la radiación de Sol. Tiene una alta disponibilidad a lo largo del globo.
- No produce ningún impacto ambiental ya que no genera ninguna clase de contaminante.
- Se puede instalar en zonas que no sean aptas para otro uso, como las zonas desérticas.
- Permite reducir el uso de combustibles fósiles, reduciendo así la dependencia energética que existe hacia ellos.
- No produce alteraciones en recursos hídricos dado que no hace uso de ellos.

Sin embargo esta tecnología también presenta ciertos inconvenientes como la alta variabilidad tanto en velocidad como en dirección del recurso eólico. Produce contaminaciones acústicas en zonas próximas a su aprovechamiento, puede producir impactos paisajísticos y sobre la fauna, sobre todo en las aves. Y se requieren grandes extensiones de terreno para su implantación.

Pero si se hace un balance de los aspectos positivos y negativos que ésta brinda, su utilización supone una alternativa muy factible para sustituir las energías tradicionales y esto se ve reflejado en la potencia instalada a nivel global, que incrementa con el paso de los años. Actualmente hay instalada una potencia eólica de

539,123 MW según los datos del Global Wind Energy Council en todo el mundo, siendo China, Estados Unidos, Alemania, India y España los primeros productores mundiales.

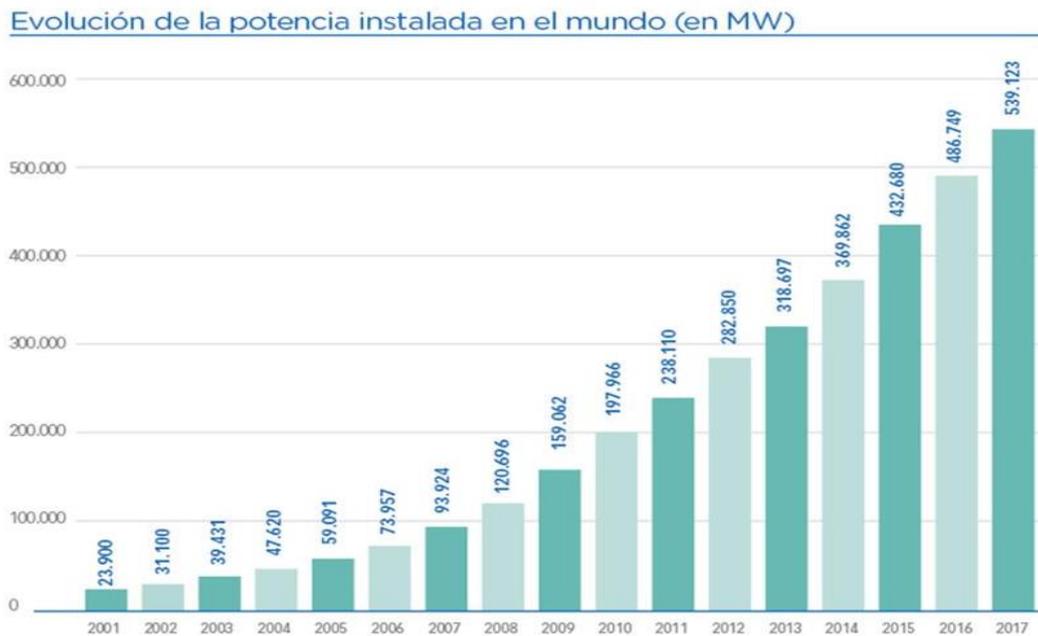
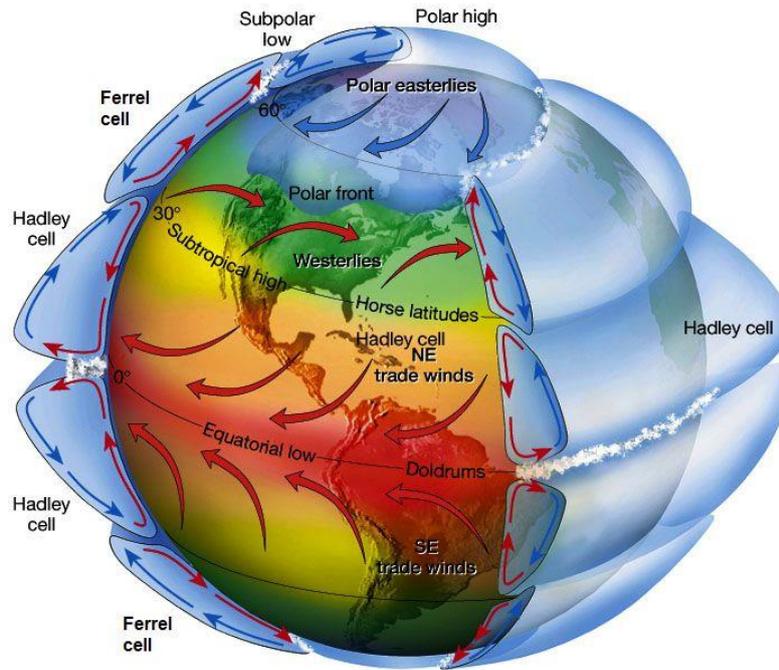


Figura 27: Evolución de la potencia instalada en el mundo (Fuente: [www.aeolica.org](http://www.aeolica.org))

### 3.5.1. El viento

El viento se da por la diferencia de temperaturas que provoca la radiación solar sobre las distintas partes del globo terrestre. Este efecto se amplifica en la zona ecuatorial provocando un movimiento ascendente de las masas de aire. Éstas se elevan y se trasladan hacia mayores latitudes mientras que a su vez se sustituye por aire más fresco procedente de zonas más frías. Éste fenómeno en combinación a otros factores como la rotación de la Tierra que produce el efecto Coriolis y la distribución de los continentes o mares provoca la formación de circulaciones de aire permanentes.



*Figura 28: Movimiento de las masas de aire en la Tierra (Fuente: [www.tutiempo.net](http://www.tutiempo.net))*

### 3.5.2. Aerogenerador

Un aerogenerador es un dispositivo capaz de convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. Actualmente, el tipo de aerogenerador más utilizado para producción eléctrica es el de eje horizontal con tripala.

El funcionamiento del aerogenerador es tal que en primer lugar incide el viento a una cierta velocidad sobre las palas, esto provoca que se ejerza una fuerza sobre ellas. Esa fuerza brinda un par que posibilita el movimiento de un eje que se encuentra en el interior del aerogenerador. Este a su vez está conectado a una caja de cambios que permite incrementar la velocidad de rotación del eje. Cuando se alcanza cierta velocidad se puede comenzar a impulsar el generador que es el encargado de producir la energía eléctrica.

Los elementos básicos que conforman un aerogenerador son los que se muestran en la figura siguiente:

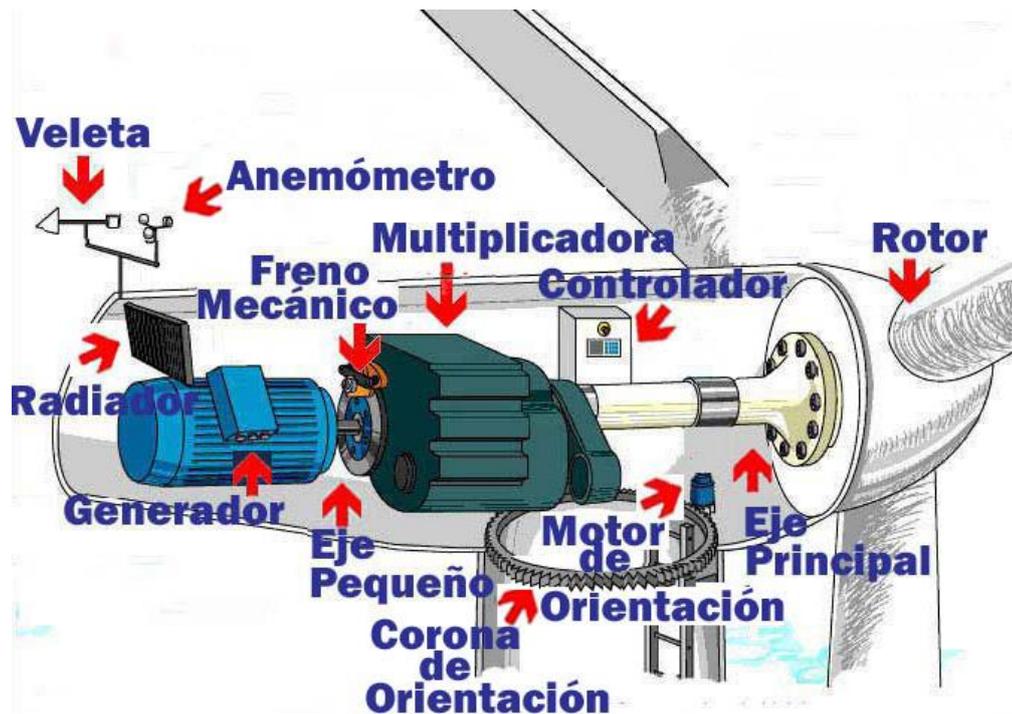


Figura 29: Esquema de los distintos elementos que conforman un aerogenerador (Fuente: [triple97.wordpress.com](http://triple97.wordpress.com))

A continuación se describirá cada uno de ellos:

**Góndola:** tiene la función de alojar todos los elementos mecánicos y eléctricos del aerogenerador.

**Torre:** es elemento encargado de soportar la góndola y el rotor. Se busca que sea lo más alta posible dado que a medida que aumenta la altura también lo hace la velocidad.

**Rotor:** está formado por las palas y elemento que las une, el buje. Se encarga de convertir la energía cinética en energía mecánica.

**Eje principal o de baja velocidad:** transfiere el movimiento de rotación a la multiplicadora.

**Multiplicador:** se trata de un sistema de engranajes que es capaz de aumentar la velocidad proveniente del eje principal con el fin de transmitirla al eje de alta velocidad (eje pequeño).

**Eje de alta velocidad:** está conectado directamente al aerogenerador, le transmite la velocidad proveniente de la multiplicadora.

Freno hidráulico: cuando se supere el límite de velocidad de giro se acciona para detener el funcionamiento del aerogenerador y evitar posibles daños a los elementos que lo conforman.

Generador: transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

Radiador: controla la temperatura de los elementos tanto mecánicos como electrónicos del aerogenerador.

Controlador: monitoriza todos los parámetros de funcionamiento del aerogenerador. Está conectado a la veleta por lo que cuando se alcance un valor superior a la velocidad mínima de operación del aerogenerador, lo pone en funcionamiento.

Anemómetro: mide la velocidad del viento.

Veleta: indica la dirección en la que sopla el viento.

Corona de orientación: permite girar a la góndola sobre si misma en un ángulo de 360 grados. Se utiliza para orientar el aerogenerador en la dirección de máxima velocidad o para desalinearlo.

## 4. Normativa y referencias

### 4.1 Disposiciones legales y normativa aplicable

- Plan Hidrológico de Tenerife. Consejo Insular de Aguas de Tenerife.
- Real Decreto 6/2015, de 30 de enero, por el que se aprueba el Reglamento que regula la instalación y explotación de los Parques Eólicos en las Islas Canarias.
- Plan Insular de Ordenación del Territorio de Tenerife. Cabildo de Tenerife.
- Reglamento y normas de presentación de los trabajos de fin de grado de la Escuela Superior de Ingeniería Civil e Industrial de la Universidad de La Laguna.
- Ley 4/2017, de 13 de julio, del Suelo y de los Espacios Naturales Protegidos de Canarias.
- Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.
- Plan Energético de Canarias 2007 (PECAN). Consejería de Industria, Comercio y Nuevas Tecnologías.

- UNE 157001:2002. Criterios generales para la elaboración de proyectos.

## 4.2 Bibliografía

- Agüera Soriano, José. *Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas*. 5ª edición actualizada. Madrid: Ciencia 3 S.L., 2002.
- Medina San Juan, José Antonio. *Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis inversa*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1999.
- Veza, José Miguel. *Introducción a la desalación de aguas*. Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canarias, Servicio de Publicaciones, 2002.
- Villarrubia López, Miguel (2011). *Ingeniería de la energía eólica* (primera edición). Barcelona: Marcombo, S.A.
- Toray: [www.toraywater.com](http://www.toraywater.com)
- Centro Canario del Agua: [www.fcca.es](http://www.fcca.es)
- Agricultura y desarrollo rural en Tenerife: [www.agrocabildo.org](http://www.agrocabildo.org)
- Consejo Insular de Aguas de Tenerife: [www.aguastenerife.org](http://www.aguastenerife.org)
- Gobierno de Canarias: [www.gobiernodecanarias.org](http://www.gobiernodecanarias.org)
- Cabildo de Tenerife: [www.tenerife.es](http://www.tenerife.es)
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente: [www.magrama.gob.es](http://www.magrama.gob.es)
- Puertos del Estado: [www.puertos.es](http://www.puertos.es)
- Instituto Tecnológico de Canarias: [www.itccanarias.org](http://www.itccanarias.org)
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía: [www.idae.es](http://www.idae.es)
- Instituto Canario de Estadística: [www.gobiernodecanarias.org/istac/](http://www.gobiernodecanarias.org/istac/)
- Instituto Español de Oceanografía: [www.ieo.es](http://www.ieo.es)
- Instituto Nacional de Estadística: [www.ine.es](http://www.ine.es)
- Energy Recovery: [www.energyrecovery.com](http://www.energyrecovery.com)
- The Wind Power: [www.thewindpower.net](http://www.thewindpower.net)
- Grafcan: [www.grafcan.es](http://www.grafcan.es)
- Goolzoom: [www.goolzoom.com](http://www.goolzoom.com)
- Grupo Sectorial de Tuberías Plásticas de ANAIP: [www.asetub.es](http://www.asetub.es)
- Flowtite: [www.flowtite.com](http://www.flowtite.com)
- KSB: [www.ksb.com](http://www.ksb.com)

- Grundfos: [es.grundfos.com](http://es.grundfos.com)
- Lowara: [www.lowara.com](http://www.lowara.com)
- Flowserve: [www.flowserve.com/en](http://www.flowserve.com/en)
- Enercon: [www.enercon.de](http://www.enercon.de)
- Nordex: [www.nordex-online.com](http://www.nordex-online.com)
- Senvion Wind Energy Solutions: [www.senvion.com](http://www.senvion.com)
- EWT: [ewtdirectwind.com](http://ewtdirectwind.com)
- Unison: <http://www.unison.co.kr>
- Aquasalud: [www.aquasalud.com](http://www.aquasalud.com)
- Lenntech: [www.lenntech.com](http://www.lenntech.com)
- Repositorio institucional de la Universidad de La Laguna: <http://www.riull.ull.es>

### 4.3 Programas de cálculo y herramientas empleadas

- Software para el dimensionado de membranas “TorayDS2” facilitado por el fabricante Toray Industries.
- Hoja de Excel para el dimensionado del sistema de recuperación de energía (intercambiador de presión), proporcionada por el fabricante Energy Recovery Inc.
- Microsoft Office Word 2016.
- Microsoft Office Excel 2016.
- Aplicación online para la selección de bombas del fabricante KSB.
- Aplicación online para la selección de bombas del fabricante Grundfos.
- Aplicación online para la selección de bombas del fabricante Lowara.
- Aplicación online para la selección de bombas del fabricante Flowserve.
- Aplicación online de estimación de la energía producida por un aerogenerador proporcionado por el Instituto Tecnológico de Canarias.
- Goolzoom.
- AutoCAD.
- Aplicación online de cálculo de la densidad de agua facilitada por la Universidad de Michigan.

## 5. Definiciones y abreviaturas

En este apartado se hace referencia a los conceptos más relevantes del documento. Los cuales son vitales para su correcta comprensión y que pueden llevar a confusiones o equivocaciones.

### 5.1. Definiciones

- *Permeado o agua producto*: agua desalada obtenida del proceso de ósmosis inversa.
- *Conversión*: Porcentaje que relaciona la cantidad de agua desalada con el agua de alimentación del proceso.
- *Rechazo de salmuera o salmuera*: flujo de agua rechazado por las membranas de ósmosis que presenta un alto contenido en sales.
- *Consumo específico*: parámetro que relaciona el consumo energético de la planta con cada metro cúbico de agua producto obtenida.
- *Eficiencia*: relación entre la potencia ideal de un equipo y la potencia que produce operando en condiciones reales.

### 5.2. Abreviaturas

- EDAM: Estación desaladora de agua de mar.
- TDS: Sólidos Totales Disueltos.
- SDI: Índice de Densidad de Sedimentos.
- MSF: Destilación súbita multietapa.
- MED: Destilación multiefecto.
- ED: Electrodiálisis.
- CV: Compresión de vapor.
- OI: Ósmosis inversa.
- IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía.
- ITC: Instituto Tecnológico de Canarias
- PHT: Plan Hidrológico de Tenerife.

- PIOT: Plan Insular de Ordenación de Tenerife.
- CIATF: Consejo Insular de Aguas de Tenerife.

## 6. Requisitos de diseño

En el siguiente apartado se van a comentar los requisitos previos a tener en cuenta en el desarrollo del estudio y los datos de partida impuestos por el cliente. También se tendrán en cuenta aspectos derivados de la legislación, de estudios realizados o del propio emplazamiento debido a las condiciones que presente su entorno ambiental y socio-económico.

### 6.1 Datos del peticionario

El presente estudio de un sistema de desalación alimentado mediante energía eólica ha sido encomendado por la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna. Dicho estudio tendrá que ceñirse a las siguientes premisas impuestas por el peticionario.

- ❖ El núcleo de desalación funcionará con tecnología de desalación mediante osmosis inversa.
- ❖ El recurso renovable que generará la energía demanda por la planta será energía eólica.
- ❖ A la hora de seleccionar el emplazamiento de la planta se estudiará si la necesidad hídrica puede ser abastecida por el recurso eólico presente en la zona.
- ❖ La producción de la planta se impondrá teniendo en consideración que su capacidad debe ser pequeña o media.
- ❖ La capacidad de producción de permeado se tiene que fijar en función de las necesidades que se deseen cubrir, siempre y cuando se respete el apartado anterior.
- ❖ La calidad del permeado tiene que ser tal que el cultivo no se vea afectado negativamente por algún elemento forme parte del permeado.

Con lo que estas premisas se tomarán como las consideraciones iniciales para comenzar con la realización del estudio de la planta desaladora.

## 6.2. Emplazamiento

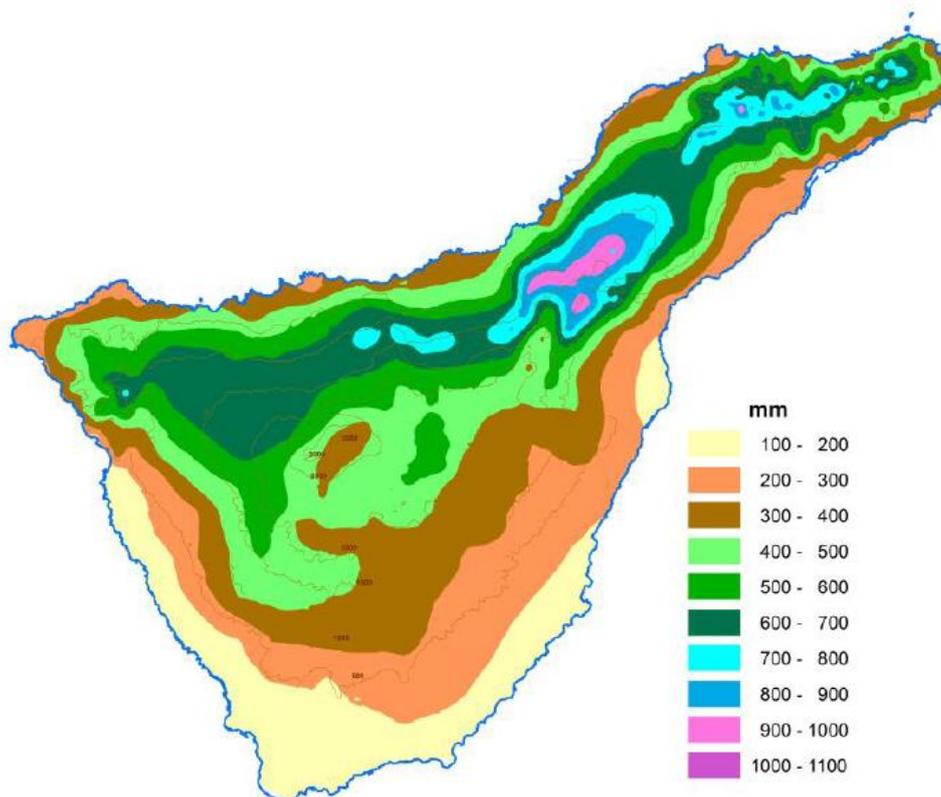
El emplazamiento de la planta desaladora es un factor vital ya que tiene que estar localizada en un lugar donde se tenga que cubrir una demanda de agua real a la vez que en dicho lugar exista un recurso eólico que sea capaz de producir la energía que requiere la planta. Siendo estos los factores principales también hay que cuidar otros como la cercanía de la planta al mar para reducir costes y energía consumida por el sistema encargado de la captación, ya que implica una reducción en el consumo específico, algo que favorece al sistema encargado de producir la energía ya que el recurso eólico tiene sus limitaciones y se pueden evitar situaciones en las que la planta tenga que utilizar energía facilitada por la red general.

Observando lo comentado previamente, a continuación se impondrán las condiciones a tener en cuenta a la hora de seleccionar el lugar de emplazamiento de la planta.

- La planta tiene que estar situada en un lugar donde exista una demanda de agua importante en relación con el tamaño que presenta la planta.
- Evitar la cercanía de la planta con otras instalaciones desaladoras que tengan el mismo fin.
- El sistema de aprovechamiento de la energía eólica tiene que estar situado en un lugar donde se alcance el mayor potencial eólico respetando la cercanía de este a la planta desaladora y además que no haya grandes estructuras a su alrededor para evitar posibles turbulencias del viento.
- El emplazamiento debe respetar el plan de ordenación del suelo del lugar donde se vaya a instalar.
- Se buscará un lugar que esté alejado lo suficiente de núcleos de población cercanos para evitar posibles perturbaciones en la vida de sus habitantes.

Una vez impuestas estas condiciones se debe fijar el lugar de estudio para la instalación desaladora. Como el peticionario de este proyecto forma parte de la Universidad de La Laguna y el proyecto se va a desarrollar en dicha universidad se ha decidido que se buscará el emplazamiento de la planta en la isla de Tenerife.

En un primer momento se debe comprobar si la isla tiene zonas donde exista una demanda de agua que la planta sea capaz de cubrir además de una cantidad de recurso eólico lo suficientemente grande como para poder alimentar a la planta en su totalidad. Como ya se comentó previamente las Islas Canarias utilizan los recursos hídricos subterráneos para cubrir las demandas agua debido a la imposibilidad del uso del agua de mar sin recibir tratamiento alguno tanto para consumo humano como para agrícola. Por lo que es vital que dichos recursos se vean renovados durante todo el año gracias a las precipitaciones, pero la frecuencia con la que se dan esas precipitaciones varía de manera importante según la zona de la isla. En el caso de la isla de Tenerife las precipitaciones se dan en menor medida en la vertiente meridional con respecto a la septentrional. En la siguiente figura se puede observar de manera clara dicha diferencia.



*Figura 30: Precipitación convencional media (1945-2010) (Fuente: PHT)*

En la zona sur de la isla las precipitaciones se encuentran por debajo de los 100mm anuales, esto implica que aunque en la vertiente septentrional reciba una gran cantidad de precipitaciones a lo largo del año y puede elevar y renovar la cantidad de agua subterránea que presenta la isla, si la demanda general de la isla es bastante alta,

esto puede provocar una situación de sobreexplotación, en la que existirán momentos en los que cubrir la demanda en su totalidad no será una opción, y aspectos como la necesidad hídrica de los cultivos se dejarán de lado para cubrir la demanda que presente el agua de consumo humano.

Con relación a la demanda de aguas subterráneas, a continuación se muestra que lo comentado de manera condicional es la situación real que presenta la isla, su dependencia de dicho recurso provoca que la extracción se realice de manera continua y frecuente disminuyendo de manera drástica su cantidad. A continuación se muestra de qué manera se realiza la extracción en toda la isla.

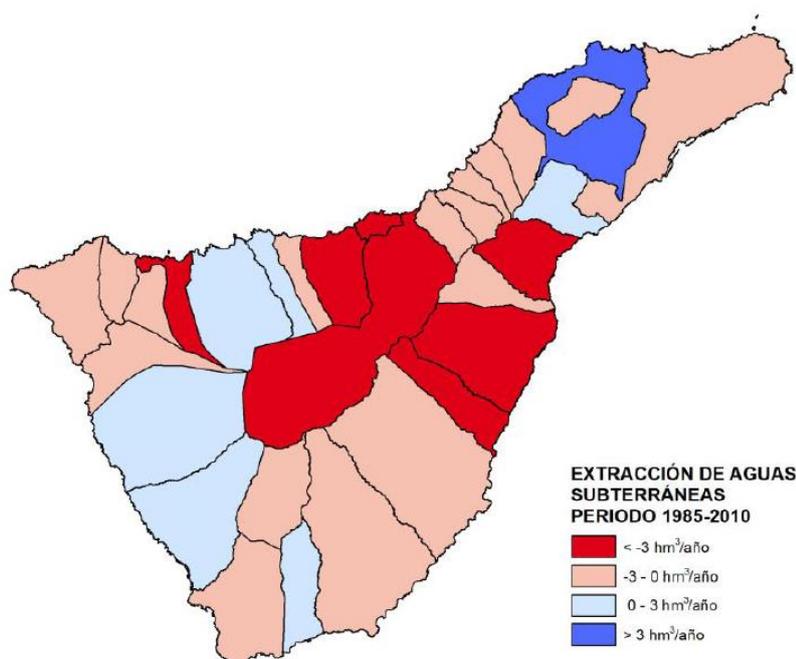


Figura 31: Extracción aguas subterráneas (1985-2010) (Fuente: PHT)

Como consecuencia de ello, claramente el estado de las aguas subterráneas se habrá visto afectado de manera negativa.

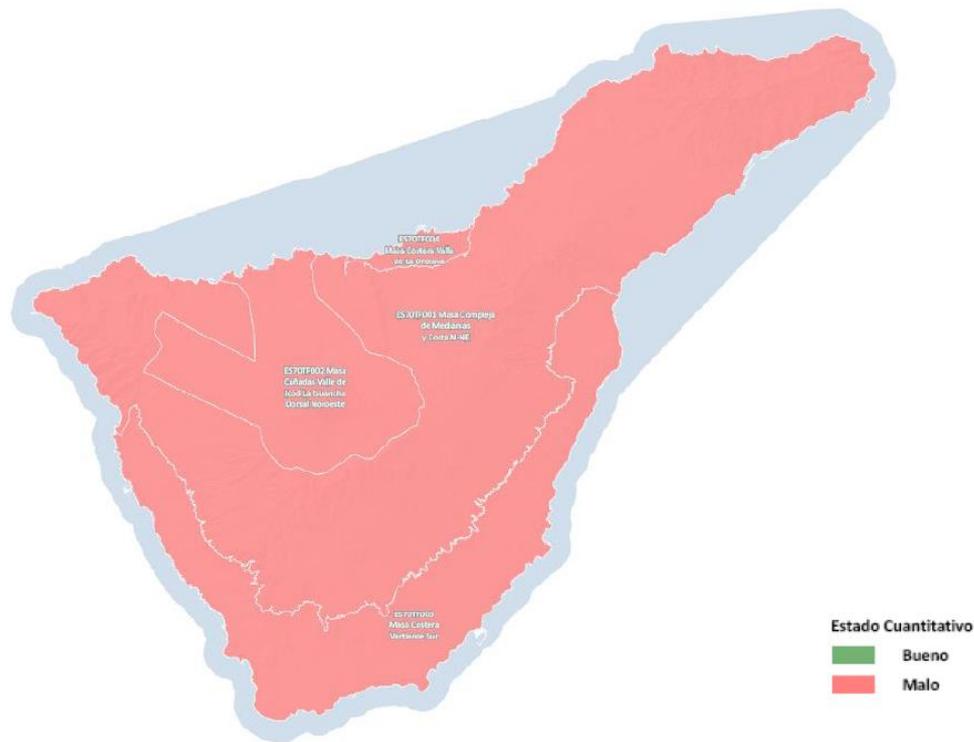
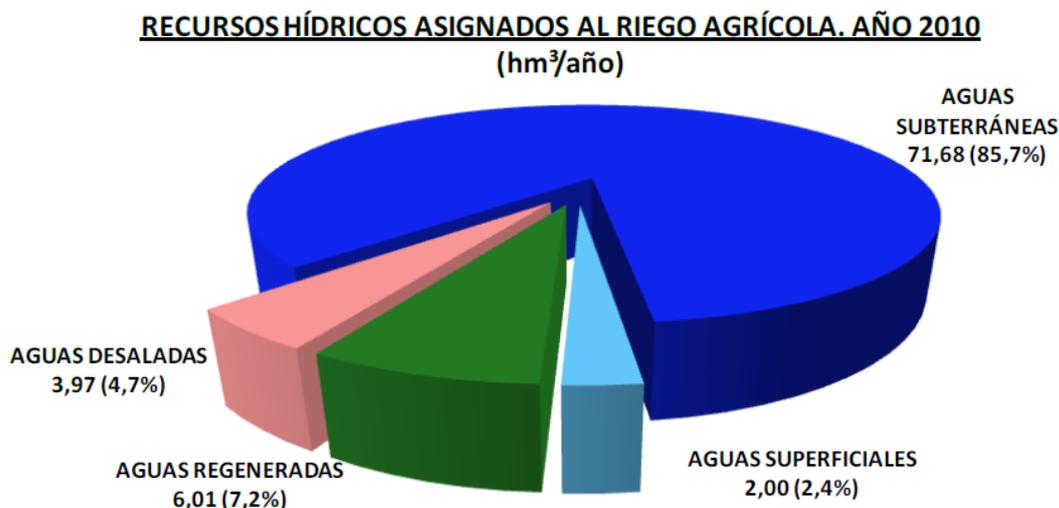


Figura 32: Estado cuantitativo de las masas de aguas subterráneas (Fuente: PHT)

Y observando la figura anterior se puede ver que el desgaste del agua subterránea ha sido tal que su estado en toda la isla se considera malo por lo que se requiere de manera inmediata la búsqueda de otras opciones para obtener recursos hídricos aptos para el uso humano, agrícola, etc. Y es destacable que el problema también radica en la forma en la que se dan las precipitaciones porque en el caso de la vertiente meridional la cantidad de precipitaciones extremas que se dan es incluso mayor que en la vertiente septentrional lo que implica que la tierra es incapaz de igualar su velocidad de filtración a la velocidad con la que precipita el agua lo que provoca que esta no pueda ser asimilada por el terreno, y por tanto la capacidad de renovación de las aguas subterráneas no es la que debería ser.



*Figura 33: Reparto de los recursos hídricos para riego agrícola (Fuente: PHT)*

El uso de aguas subterráneas para uso agrícola tiene un gran peso en comparación al resto de agua que se utilizan, esto provoca la situación comentada anteriormente, en el caso de que exista una demanda de otros sectores de mayor necesidad, los cultivos no verán cubierta su necesidad hídrica lo que puede producir enormes daños a la cosecha. Y aunque ya existan diversas instalaciones de desalación operativas en la isla, la mayoría utilizan gran parte de su agua producto para consumo humano y la parte restante se destina a cultivos.

Así que una vez analizada la situación que presenta la isla con relación a las precipitaciones, recursos hídricos y la dependencia de los cultivos de dichos recursos, se llega a la conclusión de que la planta desaladora se tiene que emplazar en la zona meridional de la isla.

Cumplida la condición de encontrar una zona que presente una demanda de recurso hídrico, a continuación se tiene que comprobar si en esa zona la cantidad de recurso eólico es suficiente como para generar potencia que la demanda EDAM.

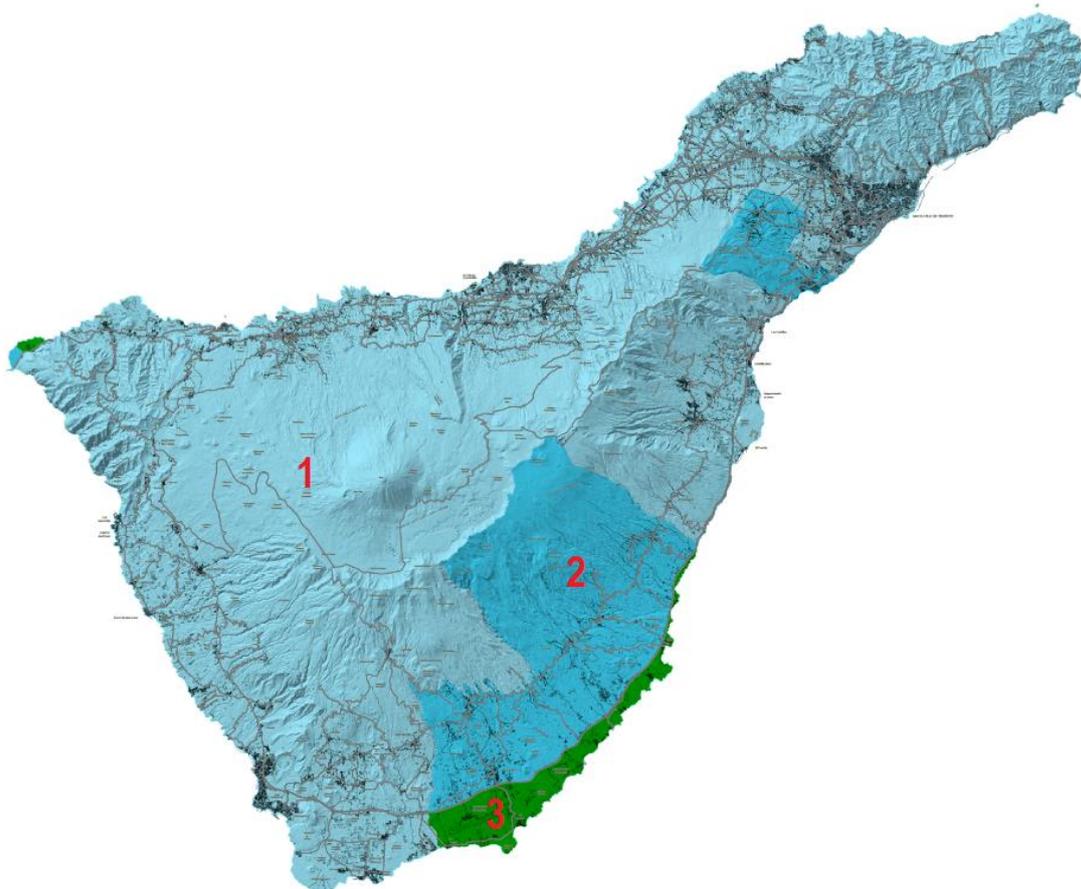


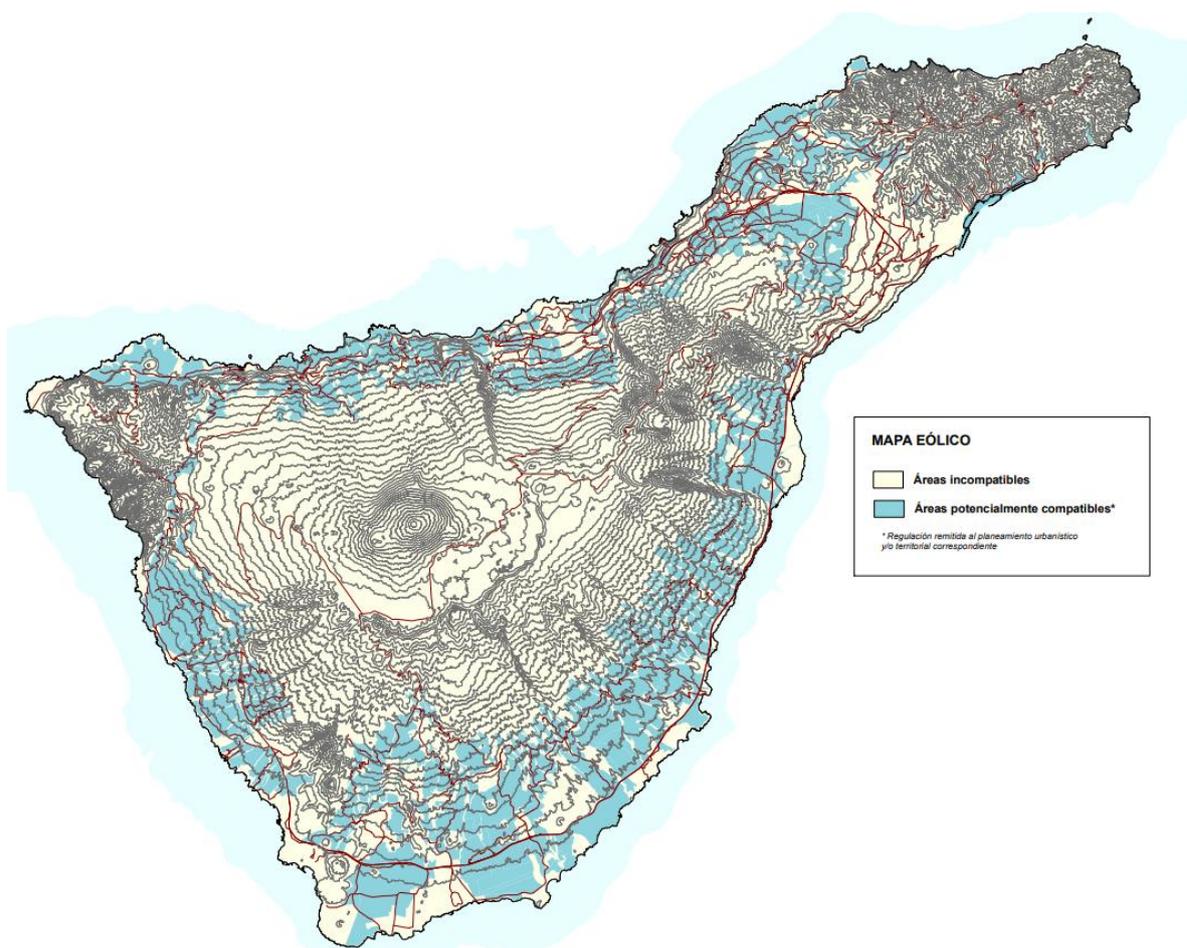
Figura 34: Índice de potencial eólico (Fuente: PHT)

En la figura anterior los colores hacen referencia los distintos potenciales eólicos que existen en toda la isla. En la tabla siguiente se indicará de manera numérica como cada color hace referencia a un índice potencial eólico diferente.

Índice de potencial eólico		Horas equivalentes h.e. (h)
Azul claro (1)	IPE 1	h.e. <2900
Azul intenso (2)	IPE 2	2900 < h.e < 3300
Verde (3)	IPE 3	3300 < h.e < 3700

Tabla 5: Valores de los índices de potencial eólico (Fuente: PHT)

Si se analiza la zona meridional de la isla observamos que las zonas de mayor índice de potencial eólico son las que se encuentran en la zona sur de los municipios de Granadilla de Abona, Arico y Fasnía, siendo la primera la que mayor superficie abarca. Por tanto esta serán las zonas que se tendrán en consideración para el emplazamiento ya que presentan unas horas equivalentes comprendidas entre las 3300 y 3700 horas.



*Figura 35: Mapa eólico, zonas de compatibilidad e incompatibilidad (Fuente: PIOT, 2011)*

Seguidamente se comprobará que las zonas designadas con alto potencial eólico se encuentran dentro de las áreas potencialmente compatibles de la isla. Para ello se hará uso de la figura anterior que corresponde al mapa de planteamiento urbanístico y territorial de la isla. Y como se puede observar, todas las zonas nombradas anteriormente son compatibles con dicho planteamiento por lo que son aptas para la instalación de sistemas de aprovechamiento del recurso eólico.

Como todas las zonas son aptas, para poder acotar la búsqueda del emplazamiento se analizará el crecimiento de la población y de la demanda de regadío dado que ambos van ligados a un aumento de la necesidad de los recursos hídricos tanto para abastecimiento humano como agrícola. Y como ya se comentó anteriormente, los recursos subterráneos están alcanzando una situación donde no son capaces de cubrir la demanda de todos los sectores por lo que construcción de una EDAM en un lugar que cumpla dichas condiciones es algo muy factible.

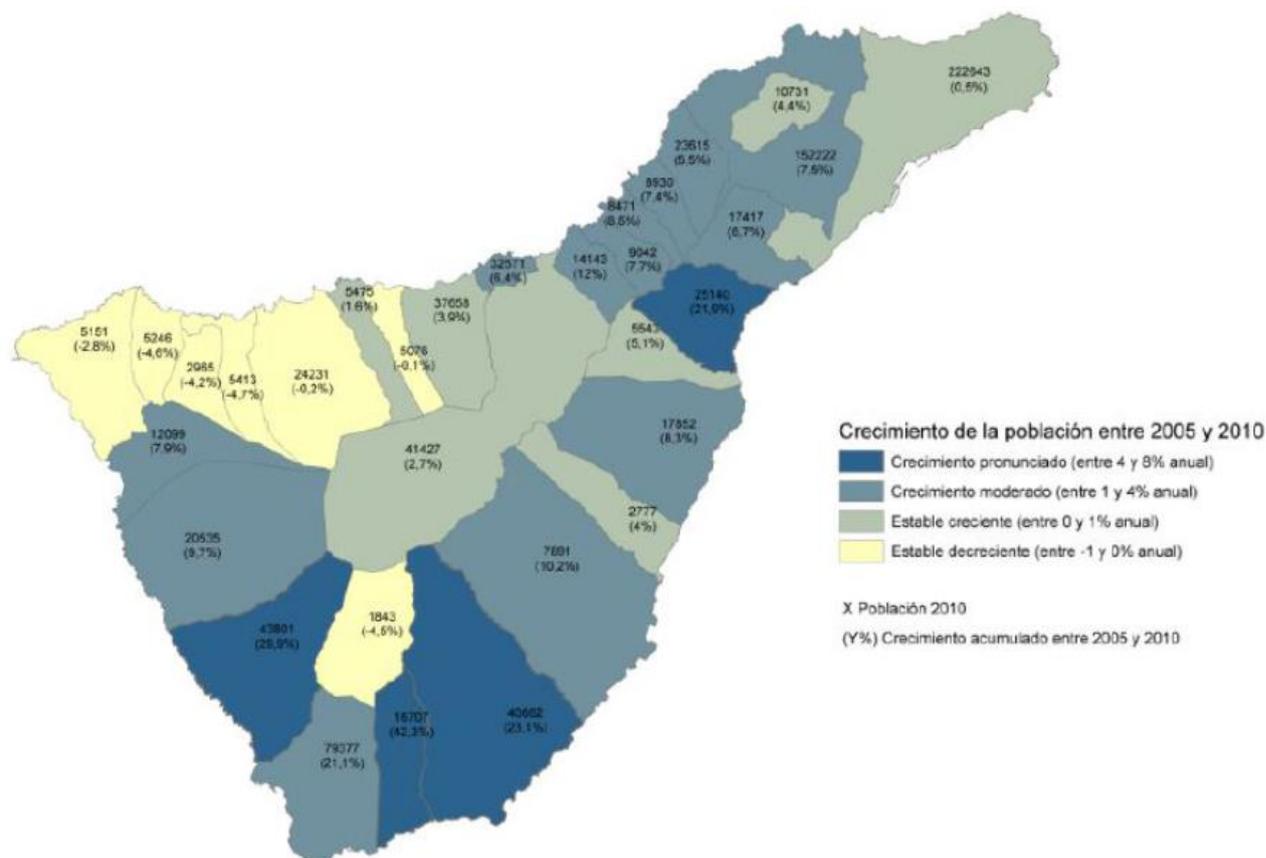


Figura 36: Crecimiento de la población de los distintos municipios de Tenerife (Fuente: PHT)

En vista de los datos mostrados en el mapa de crecimiento de población de la isla, se puede destacar al municipio de Granadilla de Abona sobre el resto ya que presenta un incremento de la población del 23,1% entre los años 2005 y 2010. Lo que implica que la demanda de recursos hídricos destinados a abastecimiento humano también aumente en proporción. A continuación habría que comprobar si la demanda de regadío en el municipio es alta puesto que supondría una situación idónea para la instalación de la EDAM.

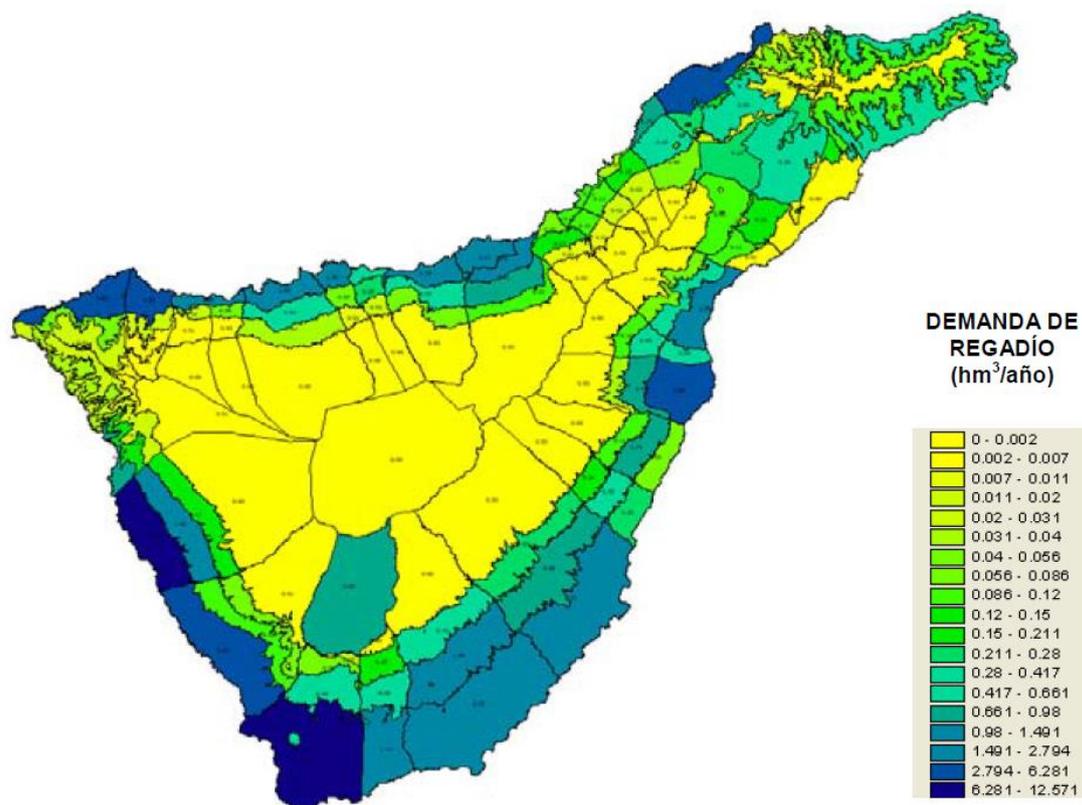


Figura 37: Demanda de regadío (Fuente: PHT)

Y como se puede ver en la figura anterior, la demanda de regadío de la zona costera del municipio es parcialmente alta. Así que el municipio presenta la situación comentada anteriormente en la que existe una demanda de recurso hídrico tanto para abastecimiento humano como agrícola. Y además con el incremento exponencial de la población, la demanda habrá aumentado de manera drástica. Esto también implica que si la demanda es alta y los recursos disponibles son incapaces de cubrirla, el precio del agua puede verse incrementando, además de que los propios cultivos se verán afectados negativamente porque sus necesidades hídricas no se verán cubiertas. De modo que el municipio de Granadilla de Abona será el elegido para el emplazamiento de nuestra EDAM ya que como se indica en el objeto del este proyecto la planta estará destinada únicamente para abastecer la demanda hídrica del sector agrícola. más específicamente del tomate. El excedente que ésta pudiera producir solo puede usarse en cultivos que sean capaces de tolerar su composición y en ninguna situación podrá

usarse para abastecimiento humano dado que el proceso de desalación no se ha dimensionado teniendo en cuenta el RD 140/2003.

En un primer momento se selecciona el municipio de Granadilla de Abona, pero antes de nada se comprobará si en el propio municipio o en zonas cercanas ya hay estaciones desaladoras en estado operativo. En la vertiente meridional actualmente hay 4 estaciones operativas:

Estaciones desaladoras	
EDAM 1	Estación desaladora de Fonsalía
EDAM 2	Estación desaladora de Granadilla
EDAM 3	Estación desaladora Adeje Arona
EDAM 4	Estación desaladora de Las Galletas

*Tabla 6: Estaciones desaladoras situadas en la vertiente sur de la isla (Fuente: Elaboración propia)*

En la imagen se establecen las localizaciones de cada una de ellas.



*Figura 38: Localización de las desaladoras en la isla (Fuente: Googlemaps)*

En el municipio se encuentra en funcionamiento una planta de desalación situada en el polígono industrial de Granadilla. Tiene una capacidad de producción de 14000 m<sup>3</sup>/día de agua producto destinada principalmente al abastecimiento humano aunque parte de ella se destina al sector agrícola.

En la localidad de Las Galletas, que forma parte del municipio de Arona se encuentra en estado operativo una planta desaladora con una capacidad de 4000 m<sup>3</sup>/día destinada a uso agrícola. Se encarga de cubrir parte de la demanda de más de un centenar de agricultores que forman parte de la Comunidad de Regantes de Las Galletas. Por tanto únicamente se distribuye su agua producto a las hectáreas cultivadas en el municipio donde se encuentra localizada.

Tanto la EDAM 1 como la 3 no suponen un inconveniente a la hora de seleccionar el emplazamiento debido a su lejanía con respecto a la zona que se está considerando.

En vista de la disposición de las desaladoras y del uso que se le da al agua producto se decide que la zona más factible para su instalación es la situada entre El Médano y Los Abrigos debido a su cercanía al mar y a superficies cultivadas bajo invernadero.

Para culminar la selección del emplazamiento, una vez acotada la zona donde se puede emplazar la EDAM se tiene que definir el lugar exacto. Partiendo de la premisa de ser un lugar muy próximo al mar y a las zonas de abastecimiento, al mismo tiempo que respeta los espacios protegidos y se encuentra alejado de núcleos de población. De manera que en primer lugar se comprobará que espacios protegidos hay por la zona.

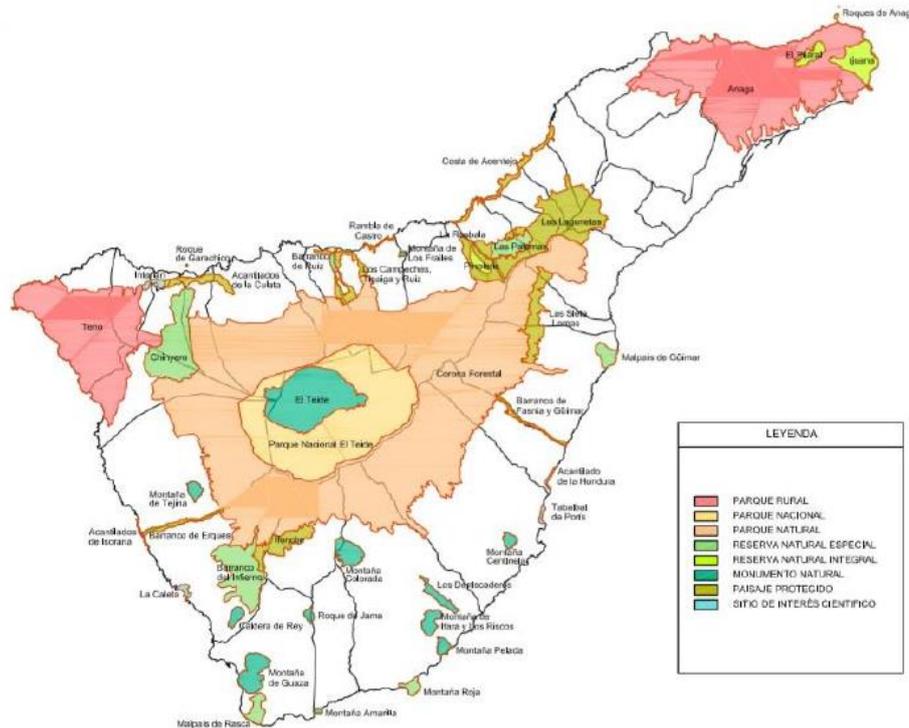


Figura 39: Espacios naturales protegidos (Fuente: PIOT,2011)

En la figura anterior se puede observar que hay un espacio natural que se encuentra justo en medio de ambas localidades, muy cercano al mar denominado Montaña Roja que se condiera una reserva natural integral. Existe otro espacio algo más alejado de la zona denomindo Montaña Pelada considero un monumento natural.

Por último se analizará la Ordenación Territorial de la zona para imponer en que lugar existe la posibilidad de construir la EDAM.

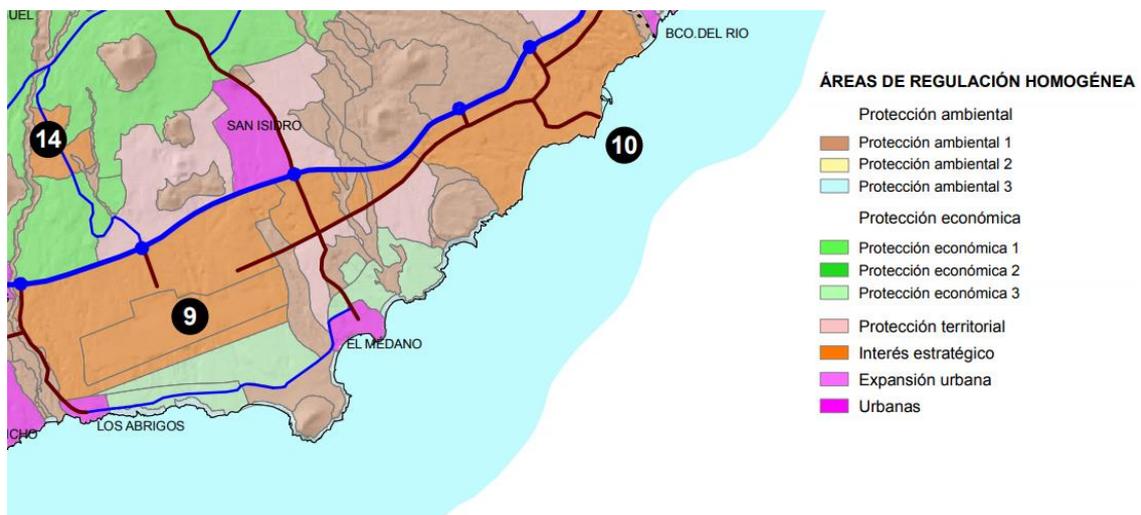


Figura 40: Usos del suelo (Fuente: PIOT,2011)

Como se puede observar hay dos zonas consolidadas como suelo urbano que hacen referencia al núcleo de población de ambas localidades por lo que nos viable el emplazamiento de la EDAM debido a la cercanía con núcleos de población, lo que podría ocasionar problemas a la hora de elegir el lugar de instalación del sistema de aprovechamiento del recurso renovable. Justo en la zona media se encuentra la reserva natural de Montaña Roja, que al ser un espacio protegido no puede tenerse en cuenta para la implantación de la planta. Así que la única opción barajable sería la de protección económica 3 que se encuentra justo debajo de la zona de interés estratégico que hace referencia al Aeropuerto Tenerife Sur. Dentro de la misma habría que barajar que superficie tiene carácter urbanizable. Para ello se hará uso del visor online proporcionado por Grafcan que permite observar la categoría y subcategoría del suelo de acuerdo a los planteamientos vigentes en el Plan de Ordenación de la isla o en los del propio municipio.

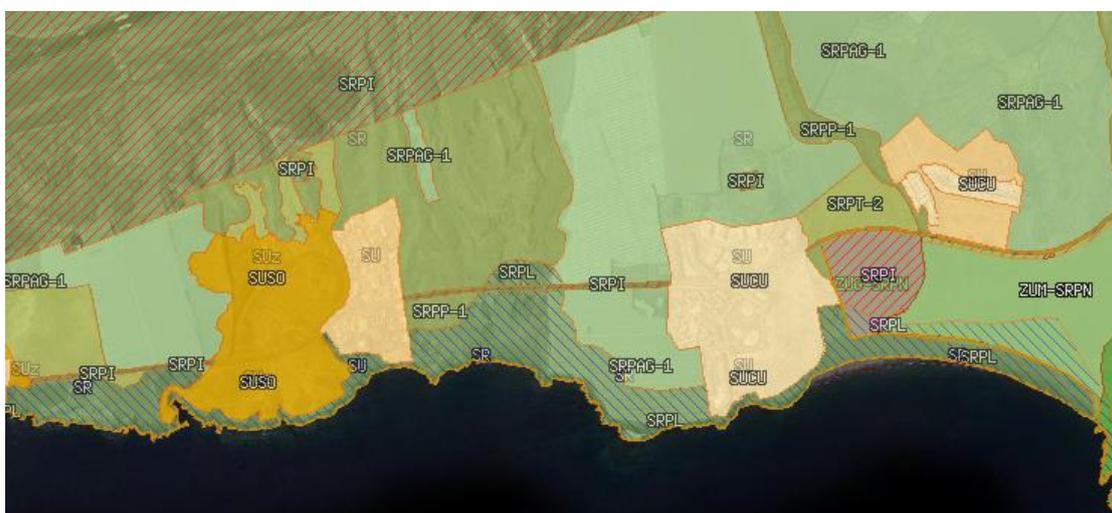


Figura 41: Ordenación del territorio (Fuente: Grafcan)

Si se analiza la figura anterior se puede llegar a la conclusión de que solo existe una zona que tenga carácter urbanizable, es la denominada SUSO (Suelo Urbanizable Sectorizado Ordenado). Con lo que dentro de esa zona se elegirá el emplazamiento de la EDAM.

Finalmente se decide que la parcela que se encuentra por debajo de la Avenida de Los Abrigos es la idónea para el emplazamiento de la EDAM. Esto se debe principalmente a que es una zona muy cercana al mar, lo que facilitaría el dimensionando del sistema de captación del agua de alimentación de la planta. También se encuentra próxima a grandes superficies cultivadas bajo invernadero. Presenta una distancia considerable con el núcleo de población más cercano evitando así posibles perturbaciones debidas principalmente al sistema de aprovechamiento del recurso renovable. Y está muy alejada de espacios naturales protegidos de manera que no ocasionará ningún impacto ambiental considerable en el medio que pueda repercutir de manera negativa en él.

A continuación se muestra la referencia catastral de la parcela elegida, en la que se indica su localización exacta, el tipo de suelo y su superficie.



DATOS DESCRIPTIVOS DEL INMUEBLE	
Referencia catastral	4816801CS4041N0000WJ III
Localización	AV ABRIGOS LOS (CANARIAS SO Suelo CANARIAS SOL PARC 2 38618 GRANADILLA DE ABONA (ABRIGOS LOS) (S.C. TENERIFE)
Clase	Urbano
Uso principal	Suelo sin edif.

PARCELA CATASTRAL	
Localización	AV ABRIGOS LOS (CANARIAS SO CANARIAS SOL PARC 2 GRANADILLA DE ABONA (ABRIGOS LOS) (S.C. TENERIFE)
Superficie gráfica	29.991 m <sup>2</sup>

Figura 42: Referencia catastral de la parcela elegida (Fuente: [www.sedecatastro.gob.es](http://www.sedecatastro.gob.es))

Y a modo de ejemplo representativo se impone como estará situado la EDAM dentro de la parcela



*Figura 43: Emplazamiento de la EDAM (Fuente: Grafcan)*

### 6.3. Capacidad de la planta

El cálculo de la demanda de regadío de un cultivo en particular puede ser una labor bastante compleja ya que como no existe un profundo conocimiento con relación al estado del terreno, o los invernaderos donde se realiza el ciclo de los cultivos o incluso el conocimiento exacto de otros parámetros que pueden afectar de manera significativa a la demanda hídrica se pueden obtener valores de esta que no son los óptimos para la situación estudiada. No obstante mediante la información facilitada por el Cabildo de Tenerife y la bibliografía recomendada se ha conseguido imponer una serie de condiciones que pueden permitir obtener un valor de demanda muy cercano al requerido en estos momentos en el municipio, sin embargo se vuelve a recalcar que este valor puede sufrir modificaciones debido a las suposiciones que se han realizado previamente a su determinación.

Para conocer la demanda hídrica que presentará el cultivo de tomate del municipio se seguirán las directrices facilitadas por el cabildo de Tenerife en la página AgroCabildo.

La propia página cuenta con una calculadora de dicha demanda pero para el caso del tomate se tiene que realizar manualmente. Para ello se hace uso de la siguiente expresión.

$$N_r = \frac{(ET_o * Kc) - P_{ef}}{0,85} \left( l/m^2 semana \right)$$

*Ecuación 1: Expresión de cálculo de la demanda hídrica*

Donde:

$ET_o$  se denomina evapotranspiración y es la combinación de dos procesos independientes que propician la pérdida de agua a causa de la evaporación de esta en la superficie del terreno y debido a la transpiración del cultivo. Se destaca que ambos procesos se dan de manera simultánea lo que dificulta su diferenciación. La evaporación se determina mediante la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo de cultivo debido a la sombra que proyecta el mismo sobre el suelo. Cuando el cultivo alcanza un nivel de desarrollo bastante avanzado, la transpiración pasa a ser el proceso con mayor peso. En este caso se hará uso de la evapotranspiración de referencia que permite trabajar con un valor de evapotranspiración que no depende del tipo y desarrollo del cultivo, ni de las prácticas de manejo ya que existe en un primer momento una gran disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración.

$Kc$  es el factor de cultivo que permite ajustar la evapotranspiración de referencia en función del tipo de cultivo, a la variedad y la etapa de desarrollo. Dentro de las etapas de desarrollo se pueden distinguir 4 periodos.

1. Desde la plantación hasta que comienza el crecimiento del cultivo.
2. Cuando el crecimiento del cultivo es tal que cubre prácticamente todo el terreno.
3. Desde el fin de la etapa anterior hasta que comienza a formarse la cosecha.
4. Desde la cosecha formada hasta su recolección.

$P_{ef}$  es la precipitación efectiva. En este caso como se ha hecho el estudio para invernaderos de cubierta impermeable a la lluvia, el único aporte de agua se realizará mediante riego por lo que el valor de la precipitación efectiva será 0.

Como en el caso de estudio se trabaja con aguas salinas se recomienda que la demanda hídrica se incremente en un 5% como valor mínimo de partida. Se establecerá un incremento del 10%.

Y con relación a la evapotranspiración, en invernaderos se debe suponer que su valor se encuentra entre el 60 y 80% de la del aire libre. En el presente caso de estudio se tomará 80%.

### 6.3.1 Condiciones de estudio

En el presente estudio mediante las tablas facilitadas en el libro “Evapotranspiración del cultivo” y en la guía de “información técnica de planificación de cultivos hortícolas” se ha decidido que durante todo el año se realizarán dos ciclos de cultivo de tomate completos con una duración de 6 meses cada uno.

- Se toma el primer mes como la etapa 1 ya que su duración suele variar entre 30 o 35 días según la región o el tipo de tomate.
- El segundo mes se impone como la etapa 2.
- El tercer mes en gran parte está condicionado por la etapa 3 pero a finales de este se podría comenzar con la recolección de los primeros tomates.
- Los 3 meses restantes se utilizarán exclusivamente para la recolección de tomate.

Para la obtención de los valores de evapotranspiración se ha usado el listado de estaciones meteorológicas que facilita el Cabildo. Se estudiaron las dos que se encuentran en el municipio de Granadilla de Abona, que se encontraban localizadas en lugares muy próximos por lo que se seleccionó la que se encontraba en el Charco del Pino. Se recogieron todos los valores obtenidos por dicha estación cada mes y se hizo la media para cada uno de ellos. Se debe remarcar que este proceso se realizó con los valores obtenidos en el año 2017 y 2018 ya que la propia estación no facilita el dato de la evapotranspiración en las tablas resumen de años anteriores. Así pues los valores calculados pueden variar en pequeña medida con respecto a los de años anteriores.

La siguiente tabla recoge los valores obtenidos evapotranspiración:

Estación meteorológica: valores de evapotranspiración	
Mes	ETo
Enero	19,62
Febrero	17,38
Marzo	23,51
Abril	23,33
Mayo	20,75
Junio	27,07
Julio	36,31
Agosto	36,80
Septiembre	30,27
Octubre	26,32
Noviembre	19,92
Diciembre	20,22

Tabla 7: Valores de evapotranspiración por mes (Fuente: [www.agrocabildo.org](http://www.agrocabildo.org))

Ahora se definen los distintos valores de coeficiente de cultivo que presenta el tomate durante su ciclo de cultivo. Estos datos están recogidos en el libro “Evapotranspiración del cultivo” y son los siguientes.

Coeficiente de cultivo kc	
Periodo	Kc
1	0,6
2	0,85
3	1,1

4	0,6
---	-----

Tabla 8: Coeficiente de cultivo del tomate (Fuente: Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos)

Para relacionar cada mes con su coeficiente de cultivo correspondiente se establece que el ciclo de cultivo comienza en enero.

### 6.3.2 Determinación de la demanda hídrica

Ahora que se conocen todos los parámetros necesarios se puede calcular la necesidad hídrica que se requiere en cada mes. La expresión final de cálculo es la siguiente:

$$N_r = 1,10 * \frac{(0,80 * ET_o * Kc) - P_{ef}}{0,85} \left( l/m^2 semana \right)$$

Y para saber la necesidad hídrica requerida en todo el municipio en primer lugar se tiene que cambiar las unidades de m<sup>2</sup> a hectáreas y los litros a m<sup>3</sup> ya que la entrada de datos en el software de dimensionado de membranas es con dichas unidades.

$$N_r = 1,10 * \frac{(0,80 * ET_o * Kc) - P_{ef}}{0,85} * \frac{10^{-3} m^3}{1l} * \frac{10000 m^2}{1 ha} \left( m^3/ha semana \right)$$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Necesidad hídrica	
Mes	Nr (m <sup>3</sup> /ha semana)
Enero	121,87
Febrero	152,94
Marzo	267,74
Abril	144,92

Mayo	128,89
Junio	168,15
Julio	225,55
Agosto	323,84
Septiembre	344,72
Octubre	163,49
Noviembre	123,74
Diciembre	125,60

Tabla 9: Necesidad hídrica por semana (Fuente: Elaboración propia)

Ahora que se tiene la necesidad de cada mes necesitamos saber el número de hectáreas de tomate bajo invernadero que hay en el municipio de Granadilla de Abona. Para ello se ha hecho uso del mapa de cultivos del municipio facilitado por el Gobierno de Canarias. Es destacable que se trata del cultivo cuya superficie cultivada es la mayor con respecto a otras superficies destinadas a un único tipo de cultivo. La superficie bajo invernadero es la mostrada a continuación.

Mapa de cultivos Granadilla de Abona	
Hectáreas bajo invernadero (ha)	118,04

Tabla 10: Hectáreas de tomate bajo invernadero (Fuente: [www.gobierodecanarias.org](http://www.gobierodecanarias.org))

Y por último se multiplica dicho valor de hectárea por cada necesidad hídrica y se calcula el valor requerido por día.

Necesidad hídrica	
Mes	Nr (m <sup>3</sup> /día)
Enero	2055,16

Febrero	2579,07
Marzo	4514,82
Abril	2443,77
Mayo	2173,52
Junio	2835,53
Julio	3803,40
Agosto	5460,87
Septiembre	5813
Octubre	2756,97
Noviembre	2086,58
Diciembre	2118,01

*Tabla 11: Necesidad hídrica por día (Fuente: Elaboración propia)*

Como se puede observar según el periodo en el que se encuentre el cultivo las necesidades hídricas del mismo varían de manera considerable. Esto puede ser un problema a la hora de realizar el dimensionado de los distintos sistemas de la planta ya que por ejemplo habrá que buscar bombas que sean capaces de trabajar en los rangos de caudales requeridos, y en el caso del núcleo de desalación esto supondría cambios continuos en la presión de entrada a las membranas y variaciones en el caudal de permeado obtenido. Así pues se llega a la conclusión de que se tiene que buscar un caudal fijo que sea capaz de satisfacer las necesidades de cada mes, pero claramente dicha necesidad no es la misma por lo que una posible solución sería almacenar el exceso de agua en un depósito para poder usarla en otra época del año. La construcción de dicho depósito no se contempla en el presente estudio ya que esto tendría que ser tarea de la empresa que se encarga de la distribución del agua, y además la propia empresa podría tener a su disposición varios depósitos donde poder almacenar el exceso de agua

comentado. No obstante, en el presente estudio se baraja esa opción y se determinará el tamaño que debería de presentar el depósito.

Si se observan los últimos meses del año, la necesidad demandada no es muy alta por lo que para evitar la producción de un mayor exceso se decide realizar una parada en el mes de diciembre. De modo que la producción de cada mes se tiene a que ajustar a esa condición.

### 7.3.3 Cálculo de la producción

En primer lugar se calcula la necesidad de riego por mes para más tarde calcular la producción teórica en base a ella.

Necesidad hídrica	
Mes	Nr (m <sup>3</sup> /mes)
Enero	63709,89
Febrero	72214,04
Marzo	139959,35
Abril	73313,20
Mayo	67379,22
Junio	85065,93
Julio	117905,51
Agosto	169286,90
Septiembre	174389,88
Octubre	85466,07
Noviembre	62597,47
Diciembre	65658,20

Tabla 12: Necesidad hídrica por mes (Fuente: Elaboración propia)

Necesidad hídrica	
Nr (m <sup>3</sup> /año)	1176945,65

Tabla 13: Necesidad hídrica anual (Fuente: Elaboración propia)

Y ahora para calcular la producción se toma la necesidad anual y se divide por el total de días que va a estar operativa la planta.

$$Q_{diario} = 1176945,65 \text{ m}^3/\text{año} * \frac{1 \text{ año}}{(365 - 31)\text{día}} = 3523,79 \text{ m}^3/\text{día}$$

Este sería el supuesto caudal de permeado que debería de producir la planta de desalación para satisfacer las necesidades impuestas teniendo en cuenta la parada en el mes de diciembre. Sin embargo, se recuerda que este valor es estimado debido a que el cálculo de la evapotranspiración se realizó con una muestra de datos muy pequeña. Debido a esto se decide aumentar el caudal de permeado diario a 3700 m<sup>3</sup>/día con el fin de tener en cuenta las posibles variaciones que pueda sufrir el factor previamente comentado.

Producción EDAM	
Q diario (m <sup>3</sup> /día)	3700

Tabla 14: Producción EDAM (Fuente: Elaboración propia)

Ahora que se conoce el caudal que producirá la planta desaladora, se puede estimar el aporte de agua que se realizaría cada mes al depósito de agua. Para ello se calcula la producción total de agua en un mes y se le resta la necesidad hídrica.

Agua aportada al depósito	
Mes	Agua aportada (m <sup>3</sup> )
Enero	50990,11
Febrero	31385,96
Marzo	-25259,35
Abril	37686,80

Mayo	47320,78
Junio	25934,07
Julio	-3205,51
Agosto	-54586,90
Septiembre	-63389,88
Octubre	29233,93
Noviembre	48402,53
Diciembre	-65658,20

Tabla 15: m<sup>3</sup> de agua apartada al depósito cada mes (Fuente: Elaboración propia)

El signo negativo indica que la producción de dicho mes no es la suficiente como para cubrir la necesidad hídrica y por tanto se necesita usar parte del agua que se encuentre almacenada en el depósito.

Se tomará como mes de inicio de aporte de agua el primer mes del año, enero y se estudiará la cantidad máxima que este mismo llega a almacenar y si es capaz de cubrir la demanda de cada mes.

Agua en el depósito al final de cada mes	
Mes	Agua depósito (m <sup>3</sup> )
Enero	50990,11
Febrero	82376,07
Marzo	57116,72
Abril	94803,53
Mayo	142124,31
Junio	168058,38

Julio	164852,87
Agosto	110265,97
Septiembre	46876,09
Octubre	76110,02
Noviembre	124512,56
Diciembre	58854,35

*Tabla 16: m3 de agua almacenada en el depósito al final de cada mes (Fuente: Elaboración propia)*

A la vista de los resultados obtenidos se puede asegurar que con la producción diaria fijada se puede cubrir la demanda de manera satisfactoria. La capacidad del tanque se podría fijar con el mayor valor de agua que se encuentra alojada en el depósito pero a finales de año todavía existe un excedente de agua que tendría que permanecer en el depósito por lo que su capacidad debería de ser mayor. Además es remarcable que dicho excedente puede ir a más cada año por lo que se podrían buscar otras opciones para darle uso, como el riego de otros cultivos de la zona que sean tolerantes al valor de boro que presenta el agua producto como pueden ser la cebolla, la patata, el melón o el pepino cuyas hectáreas en total suman un valor a tener cuenta dentro el municipio por lo que lo hace una opción bastante viable. Por ello se decide fijar la capacidad del depósito en 180000 m<sup>3</sup>.

## 6.4. Datos de partida

Definido el emplazamiento y la capacidad de la planta, se estudiarán los datos necesarios para comenzar con el diseño de la instalación. Se requiere la temperatura, la composición del agua de alimentación y los valores límite que debe respetar el agua producto para que sea apta para su uso.

### 6.4.1. Temperatura del agua de alimentación

La temperatura del agua de alimentación es un factor de gran peso que afecta al funcionamiento de las membranas, debido a que la solubilidad de ciertas sales que se forman parte del agua depende directamente de la temperatura (cuanto mayor sea, menor riesgo de precipitación existe), y si estas llegan a precipitar puede poner en riesgo la integridad de las membranas. Por otro lado el aumento de la temperatura también favorece la actividad biológica, causante del ensuciamiento de las membranas. Y por último también influye en la viscosidad del agua y en la dilatación de los materiales que conforman las membranas.

Para obtener la temperatura mínima y máxima del agua de alimentación se ha hecho uso de la tabla facilitada por Puertos del Estado que ha sido elaborada gracias a los datos recogidos por una boya que se encuentra al sur de la isla en una zona muy próxima al emplazamiento de la planta desaladora.

Boya de Tenerife Sur 1998-2018				
Mes	Ts Mín. (°C)	Año	Ts Máx. (°C)	Año
Enero	18,2	2009	21,6	2011
Febrero	17,9	2012	21,2	2010
Marzo	17,8	2018	21,3	2010
Abril	18,3	2009	22,4	2016
Mayo	18,8	2009	23,3	2017
Junio	19,3	2018	23,9	2009
Julio	20,2	2013	24,5	2017
Agosto	21,2	2001	25,3	2004
Septiembre	21,9	2002	28,7	2014
Octubre	22,2	2012	25,7	2015

Noviembre	21,1	2008	24,6	2015
Diciembre	18,9	2008	23,0	2017

*Tabla 17: Valores máximos y mínimos de temperatura según mes (Fuente: Elaboración propia. Puertos del Estado)*

A continuación se realiza la media de ambos parámetros y se obtiene una temperatura mínima de 19,65 °C, mientras que la temperatura máxima es de 23,79 °C. Y si se realiza la media de ambas se obtiene un valor de 21,72 °C. Como los valores obtenidos varían en intervalo entre los 18 °C y 24 °C, y son medidos sobre la superficie del agua, se decide tomar el valor de 19 °C como temperatura de trabajo ya que la captación se realiza mediante pozos cerrados por lo que la temperatura será más baja que la superficial y más estable.

#### **6.4.2. Composición del agua de alimentación**

La composición del agua juega un papel determinante a la hora de realizar el proceso de dimensionado de las membranas ya que influye de manera crítica en parámetros de funcionamiento de estas como puede ser la presión de entrada a las membranas, en el tiempo de lavado o sustitución de estas, e incluso a la hora de dimensionar los pretratamientos. Otro factor importante es el pH que presenta el agua ya que si su valor es alto se propicia la aparición de incrustaciones de sales, mientras que si su valor es bajo se puede dar lugar a la corrosión, por lo que se tiene que ajustar de manera muy precisa antes y después del proceso de desalación para evitar posibles daños en equipos de la instalación y para que el agua producto sea apta para su uso.

En relación al análisis químico del agua se empleará el facilitado por la planta desaladora de Santa Cruz de Tenerife puesto que se encuentra próxima al emplazamiento de la planta bajo estudio. Seguidamente se muestra la composición que presenta el agua de alimentación.

<b>Composición del agua</b>	
<b>Iones</b>	<b>Mg/L</b>
Calcio	431
Magnesio	1470

Potasio	451
Sílice	1,1
Sodio	11870
Bromo	0,5
Bicarbonatos	141,5
Cloruros	21280
Fluoruros	0,862
Nitratos	0,7
Sulfatos	3148
Bario	0,017
Boro	5,23
Cobalto	0,002
Cobre	0,002
Cromo total	0,006
Estroncio	10
Hierro total	0,025
Manganeso	0,003

Tabla 18: Composición química del agua de mar (Fuente: Elaboración propia. Desaladora de Santa Cruz de Tenerife)

Y también se incluyen sus características físico-químicas.

Conductividad a 25°C ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	54767
pH	8
Sólidos en suspensión (mg/L)	4

Tabla 19: Características físico-químicas (Fuente: Elaboración propia. Desaladora de Santa Cruz de Tenerife)

#### 6.4.3. Límites establecidos para el agua producto

La planta que se encuentra bajo estudio presenta un caudal producto de 3700 m<sup>3</sup>/día destinado a cubrir la necesidad hídrica que presenta el tomate u otros cultivos si se da el caso. Por lo que el agua producto tiene que presentar una composición que se encuentre por debajo de los límites establecidos. En este caso no existe una normativa que determine los límites que tiene que respetar el agua desalada para consumo

agrícola, y se descarta el uso de la normativa vigente para el agua de abastecimiento humano, RD 140/2003 ya que presenta valores muy restrictivos en comparación con los recomendados por la bibliografía para el agua de consumo agrícola. Así pues los valores recomendados son los que se facilitan a continuación.

Para el tomate específicamente se tienen que respetar los siguientes límites:

Contenido de boro (mg/l)	< 2,1
TDS (mg/l)	1040 - 3200

*Tabla 20: Composición agua producto (Fuente: Elaboración propia. Dpto. Producción Agraria. Área Edafología y Química Agrícola. Universidad Politécnica de Cartagena)*

Y los valores frecuentes que debe respetar el agua de regadío se muestran en la tabla siguiente:

	Parámetros de calidad	Símbolo	Unidad	Intervalo usual en agua de riego
1	Salinidad			
	Contenido de sales			
	Conductividad eléctrica	CEa	μS/cm	0 – 3000
		CEa	dS/cm	0 – 3
	Materia disuelta total	MDT	mg/L	0 – 2000
	Cationes y aniones			
	Calcio	Ca <sup>++</sup>	mg/L	0 – 400
	Magnesio	Mg <sup>++</sup>	mg/L	0 – 60
	Sodio	Na <sup>+</sup>	mg/L	0 – 900
	Carbonatos	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	mg/L	0 – 3
	Bicarbonatos	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0 – 600
	Cloruros	Cl <sup>-</sup>	mg/L	0 – 1100
	Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	mg/L	0 – 1000
2	Diversos			
	Boro	B	mg/L	0 – 2
	pH	pH	--	6,5 – 8,5
	Tasa de absorción de sodio	TAS, SAR	--	0 – 15

*Figura 44: Valores habituales para el agua de regadío (Fuente: José Miguel Veza)*

## 7. Análisis de soluciones

En el siguiente apartado se analizan las diversas opciones de diseño tenidas en cuenta a la hora de dimensionar los distintos sistemas de la planta y la solución adoptada. Todos los aspectos tratados están explicados de manera detallada en los Anexos de cálculo del presente estudio.

## **7.1. Sistema de captación de agua de mar**

La instalación desaladora como tal comienza con la toma de captación del agua de alimentación. La captación se suele realizar de dos formas, mediante toma abierta o cerrada. Esto influye de manera drástica a la hora de dimensionar tanto el pretratamiento del agua como en el dimensionado de las bombas que transportan el agua de alimentación a la planta.

### **7.1.1. Toma de agua cerrada (pozos)**

Esta es la opción más favorable ya que debido a la permeación del caudal de agua través del terreno se consigue que su nivel de limpieza sea mayor. Esto implica que tanto el índice de turbidez (NTU) y de colmatación (SDI) sean bajos reduciendo así la necesidad de implantación de más pretratamientos. La actividad biológica y orgánica es prácticamente nula. Y el valor de temperatura se mantiene más estable. Sin embargo, también presenta algunos factores negativos como la aparición en concentraciones importantes de elementos como el hierro, sílice, flúor, aluminio u otros elementos, e incluso nitratos o pesticidas debido a la cercanía de la planta desaladora con zonas donde se realiza actividad agrícola.

### **7.1.2. Toma de agua abierta (superficial)**

En la captación mediante toma abierta el agua de alimentación presenta un alto contenido de sólidos en suspensión que tienden a tener mucha variabilidad, al igual que el oxígeno disuelto, y la actividad biológica y orgánica es mucho mayor. Además existen amplios márgenes de variación en referente a la composición química y temperatura del agua. Por lo que este tipo de toma se tienen en consideración cuando el terreno es incapaz de permeabilizar el caudal necesario para instalar la toma cerrada. La captación se realiza mediante escollera o torres sumergidas.

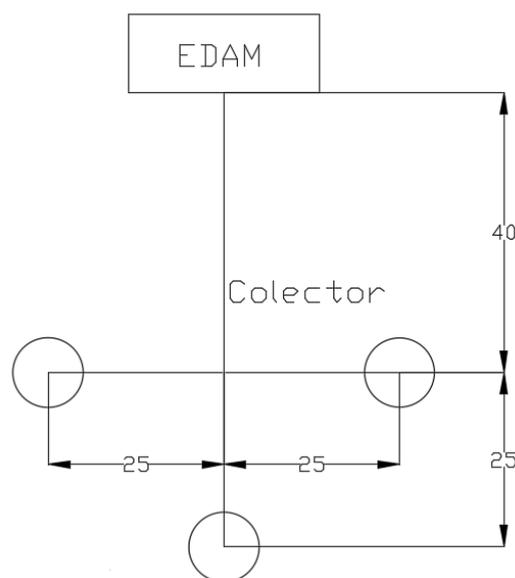
### **7.1.3. Solución adoptada para la captación de agua de mar**

En vista de las consideraciones expuestas se opta por la captación de toma cerrada mediante pozo ya que se consigue una mayor calidad de agua inicial reduciendo así los posibles pretratamientos que se requieran.

Se decide que la opción óptima es la implantación de tres pozos de captación, de los cuales dos estarán operando de manera continua y el tercero se mantendrá en reserva. Esto permite mantener la planta en continuo funcionamiento si se da el caso de que uno de los pozos no se encuentre operativo debido a mantenimiento, avería en la bomba de captación u otras situaciones que no permitan asegurar el caudal que debe captar dicho pozo. También permite reducir el riesgo de sobreexplotación con el fin de aumentar la vida útil de los pozos.

La captación se estructura de forma que los pozos se encuentren en forma de cruz unidos en un mismo punto al colector, dicho punto se encuentra a una distancia de 40 metros con respecto al emplazamiento de la EDAM. Los pozos se dispondrán a una distancia de 25 metros con respecto al colector principal, se colocan a una misma distancia para facilitar el cálculo de las pérdidas de carga de las tuberías. Con respecto a la profundidad de los pozos, una vez determinada la altura a la que se encuentra la EDAM, el valor máximo de bajamar y las pérdidas debidas a la filtración y por el cono de succión durante la aspiración de la bomba, se impone que su profundidad será de 40 metros, asegurando que las bombas de captación tengan siempre una columna de agua por encima de ellas ya que se tratan de bombas sumergibles.

El siguiente esquema permite ver de manera clara la estructura que seguirán los pozos:



*Figura 45: Esquema de estructuración de los pozos (Fuente: Elaboración propia)*

Y aquí se puede ver su disposición con respecto al emplazamiento de la EDAM:



*Figura 46: Disposición de los pozos con respecto a la EDAM (Fuente: Grafcan)*

## 7.2. Pretratamiento y Postratamiento

La realización de pretratamientos al agua de alimentación es vital para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos de la instalación así como el propio núcleo de desalación. Ya que la presencia de elementos distintos a las sales que se encuentran disueltas en el agua puede producir ensuciamientos. Dichos ensuciamientos se pueden dar de tres formas: incrustaciones, ensuciamiento de origen biológico y por materia particulada.

Para obtener un agua de alimentación óptima para el proceso se realizarán tanto pretratamientos físicos como químicos.

### 7.2.1. Pretratamiento físico

Como se comentó en el apartado 7.1.1 si la captación se realiza mediante pozos, el agua tendrá un nivel de limpieza mucho más alto por lo que no se requiere la instalación de pretratamiento físico muy estricto. Teniendo en consideración esto, la bibliografía consultada recomienda el uso de filtros de arena y de cartucho como

medidas de retención de las partículas que puedan acompañar el agua para evitar su llegada al núcleo de desalación y poder ocasionar daños a las membranas.

El primer filtrado se realiza mediante **filtros de arena**. Estos filtros son generalmente de presión y pueden ser verticales u horizontales. Los verticales alcanzan una calidad de filtrado mayor y más homogénea pero tienen el inconveniente de que su superficie de filtrado es limitada por lo que en instalaciones de gran tamaño se suele optar por los horizontales. En el presente caso de estudio debido a la capacidad que presenta la planta se harán uso de filtros de arena de tipo vertical.

La segunda etapa de filtrado se realizará mediante **filtros de cartucho** que tienen un nivel de filtración mínimo de 5 micras, valor impuesto por los fabricantes de membranas.

Así pues una vez consultado los fabricantes de filtros, se impone que cuando el agua de alimentación pasa esta etapa de pretratamiento la **pérdida de carga** asociada será de **2 bar**. Dicho valor podría ser menor pero para tener una mayor seguridad a la hora de dimensionar la bomba de captación se decide imponer el valor más desfavorable.

### 7.2.2. Pretratamiento químico

Por otro lado el pretratamiento químico tiene la misión de evitar la precipitación de sales minerales u óxidos metálicos en la superficie de las membranas. Se realizarán los pretratamientos siguientes para ajustar la composición química del agua.

- **Desinfección:** proceso de esterilización del agua para eliminar la actividad biológica. Se hace uso de hipoclorito sódico en dosis no muy constantes.
- **Decloración:** las membranas de poliamida no toleran el cloro residual u otros agentes oxidantes que pueden estar en la composición del agua de alimentación. Por lo que una vez finalizado el proceso de desinfección se aplica bisulfito sódico ya que se trata de un agente reductor que es capaz de eliminar estos elementos.
- **Regulación de pH:** se realiza mediante la dosificación de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) en concentraciones del 96-98% antes del filtro de cartucho para evitar la precipitación de carbonatos cálcicos en las membranas. Como se trata de un líquido altamente

corrosivo se recomienda que en instalaciones pequeñas se sustituya por ácido clorhídrico (HCl) con concentración de 100%.

- **Antiincrustante:** se deben controlar las sales poco solubles como el sulfato cálcico, sulfato de bórico, sulfato estróncico y fluoruro cálcico para evitar su precipitación sobre la membrana. Para ello se hará uso de un dispersante o antiincrustante compatible con la membrana. Su aplicación debería realizarse después del paso del agua por los filtros de arena y antes de los filtros de cartuchos para evitar que el primer filtrado retenga parte del dispersante, y en caso de que parte de este no se acabe de disolver, el segundo filtrado lo retiene para evitar su entrada en las membranas.

### 7.2.2. Postratamiento

En el anexo 1 se puede observar de manera detallada la composición que tiene el agua una vez se ha realizado el proceso de desalación. El agua producto obtenida del proceso se encuentra por debajo de los límites recomendados por la bibliografía, aunque hay un elemento que no se encuentra dentro del intervalo recomendado, el pH. También hay otros elementos que se deben corregir para estabilizar el agua como la baja alcalinidad y la pobre concentración de calcio.

**La estabilización se realizará a salida del bastidor de membranas mediante la adición de productos químicos.** Generalmente se emplea NaOH (sosa caústica) que permite estabilizar el pH del agua pero no garantizan que no sea corrosiva. Por lo que se agregará un inhibidor de corrosión para proteger todos los elementos que forman parte del sistema de distribución.

Así pues mediante esta adición **se busca aumentar el pH desde el valor que presenta el agua producto, 5,150 hasta un valor mínimo de 6,5.** Se tendrá en cuenta una **pérdida de carga** por este proceso de **2 bar**.

### 7.3. Bastidor de ósmosis inversa

En este apartado se explicará el proceso seguido para definir el modelo de membranas a utilizar en el bastidor, el número de etapas, la conversión, el número total de membranas y la configuración que se impondrá en los bastidores. En el presente estudio se estudiarán los modelos ofrecidos por el fabricante Toray Industries y el

proceso de dimensionado de los bastidores se realizará mediante el software facilitado por ellos, denominado TorayDS2.

### **7.3.1. Elección del modelo de membranas**

Antes de comenzar con el dimensionado del bastidor se tiene que elegir qué modelo o modelos son adecuados para la capacidad y uso que presenta la planta desaladora.

El fabricante Toray Industries cuenta con diferentes tipos de membranas destinadas a agua de mar.

En primer lugar tenemos la gama estándar que presenta dos series, la TM 800C que es capaz de operar con valores de presión no muy altos aportando a su vez un alto rechazo y la TM800M que opera con valores de presión mucho más altos y obteniendo también un alto rechazo.

Después tenemos la gama de grandes cuales, en la que se puede diferenciar dos series, TM800E y TM800R que se utilizan en situación donde se requiera obtener un alto caudal de permeado manteniendo un valor de rechazo óptimo. Por otro lado está la gama de ahorro energético que únicamente tiene una serie la TM800V que consigue disminuir el consumo específico garantizando un rechazo aceptable. Y por último está la gama de alto rechazo que tiene una sola serie, la TM800K cuyos modelos tienen la tasa de rechazo más alta de todas las que brinda el fabricante.

Ahora que se conocen las características de todas las gamas, se decide realizar en un primer momento el dimensionado con la gama de ahorro energético TM800V ya que el agua producto no está sujeta a unos límites muy restrictivos, y como esta gama brinda un rechazo aceptable se comprobará si los resultados obtenidos están por debajo de dichos límites. Esto permitiría aprovechar la característica principal que presentan estas membranas, que es la reducción del consumo específico del proceso de desalación. En caso de que esta gama sea incapaz de trabajar con las condiciones impuestas se buscarán otras opciones ofertadas por el fabricante.

La serie TM800V cuenta con tres modelos. Antes de realizar el dimensionado con cada uno de ellos se comprobará su área de membrana y el flujo de permeado que son capaces de producir.

Modelo	Diámetro	Área de membrana	Flujo medio de permeado
	inch	(ft <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> /día)
TM810V	4	87	7,2
TM820V-400	8	400	34,1
TM820V-440	8	440	37,5

Tabla 21: Modelos de la serie TM800V (Fuente: Toray Industries)

De los tres modelos se descarta el TM810V por tener un diámetro inferior a ocho pulgadas, además de que su área de membrana es muy pequeña y el flujo que es capaz de producir también por lo que para estar a la misma altura que los otros dos modelos habría que instalar un mayor número de membranas, que se traduciría en un aumento de los costes de la instalación. Así pues se realiza el dimensionado con los modelos restantes. Las dimensiones de tubo que contiene las membranas son de las mismas dimensiones.

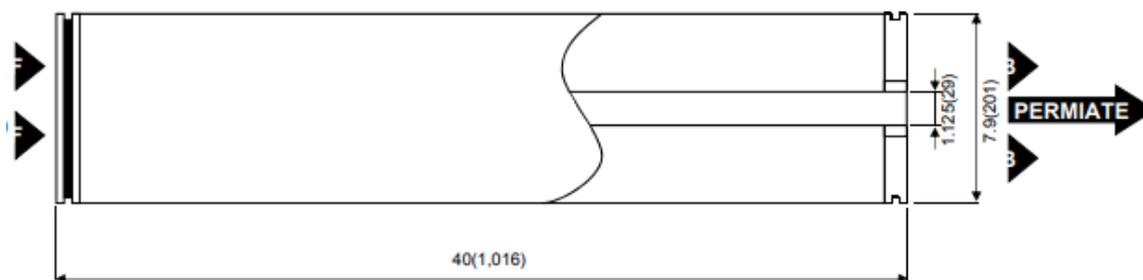


Figura 47: Dimensiones de las membranas TM800V-400 y 440 (Fuente: Toray Industries)

### 7.3.2. Número de etapas

Se considera como etapa cada una de las unidades de producción que son alimentadas desde una fuente única (bomba de alta presión). De forma más explicativa se puede considerar una etapa como el conjunto de tubos de presión dispuestos de forma paralela que son alimentados por una única bomba. En plantas desaladoras de agua de mar se suele estudiar la opción de una o dos etapas.

La opción de dos etapas se suele utilizar cuando se quiere alcanzar factores de conversión mayores, lo que se traduce en la obtención de un mayor caudal de

permeado. Pero la problemática que presenta la doble etapa es que al pasar el agua de alimentación de una membrana a otra, se va incrementando la salinidad, y el rechazo de sales de la membrana no varía por lo que empeora la calidad. En el caso de incrementar aún más el número de etapas la calidad del permeado será cada vez peor.

Con lo que observando la capacidad de producción de la planta desaladora, que no es muy elevada y el modelo de membranas con el que se va a realizar el dimensionado, que sacrifica calidad de agua con el fin de reducir el consumo específico del proceso de desalación, se decide que lo óptimo es trabajar con **una única etapa**, que permite obtener un permeado de mayor calidad lo que equilibra la tasa de rechazo de las membranas seleccionadas, que es algo menor en comparación al resto de modelos que ofrece el fabricante.

### 7.3.3 Conversión

Es la relación expresada en porcentaje del caudal de permeado que es capaz de producir el proceso de desalación a partir de un determinado caudal de alimentación. Su valor puede variar dentro de unos límites muy concretos. A medida que dicho porcentaje aumenta se obtiene un mayor valor de caudal de permeado. No obstante las membranas tienen un porcentaje fijo de rechazo, por lo que cuanto menor sea el caudal de rechazo más concentración tendrá éste. Es decir, que la conversión está limitada por el coeficiente de solubilidad de las sales que se encuentran en el rechazo ya que si se supera dicho coeficiente las sales empiezan a precipitar provocando la obstrucción de los poros de las membranas.

Por lo que para definir el valor de conversión se decide seguir las recomendaciones de la bibliografía que impone que para plantas desaladoras de agua de mar un valor de **45% de conversión** es un valor óptimo de operación.

### 7.3.4. Selección de la configuración y número total de membranas

Ahora que se conoce el modelo y los datos de entrada se puede usar el software de membranas facilitado por el fabricante. Con relación al número de membranas por tubo de presión se estudiarán las opciones de 6 y 7 membranas por tubo con cada modelo, el software no indica el número óptimo de tubos a colocar por configuración por lo que su valor se obtendrá mediante un proceso iterativo hasta poder definir el

núcleo de desalación sin ninguna clase de error o advertencia. Una vez hecho esto se han obtenido para cada modelo y configuración la siguiente cantidad de membranas.

Modelo	Nº de tubos de presión (6 membranas)	Total membranas	Nº de tubos de presión (7 membranas)	Total membranas
TM820V-400	46	276	41	287
TM820V-440	42	252	38	266

*Tabla 22: Número total de tubos de presión y membranas por configuración (Fuente: Elaboración propia)*

Y también se ha comprobado la calidad de agua producto en función de la cantidad de Boro y TDS y el consumo específico, también a modo complementario se ha tenido en cuenta la presión de alimentación de las membranas.

#### Configuración con 6 elementos por tubo de presión

Modelo	Nº de tubos de presión	Presión de alimentación (bar)	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )	TDS (mg/l)	Boro (mg/l)
TM820V-400	46	60,31	1,814	22,1	1,122
TM820V-440	42	60,08	1,806	231,3	1,160

*Tabla 23: Configuraciones estudiadas imponiendo 6 elementos por tubo de presión (Fuente: Elaboración propia)*

#### Configuración con 7 elementos por tubo de presión

Modelo	Nº de tubos de presión	Presión de alimentación (bar)	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )	TDS (mg/l)	Boro (mg/l)
TM820V-400	41	59,73	1,795	221,5	1,122
TM820V-440	38	58,95	1,769	240,6	1,19

*Tabla 24: Tabla 7: Configuraciones estudiadas imponiendo 7 elementos por tubo de presión (Fuente: Elaboración Propia)*

Realizado el dimensionado se observó que todas las configuraciones se encuentran por debajo de límites impuestos por lo que se podría barajar el uso de cualquiera de ellas. No obstante la configuración de 7 tubos con el modelo TM820V-440

presenta el consumo específico más bajo aunque la misma configuración con el otro modelo tiene un valor cercano y una calidad de agua mayor. Pero pensando en los costes de inversión iniciales y en los de mantenimiento, la primera opción tiene un menor número de tubos de presión y de membranas que a larga puede suponer un ahorro significativo. Y aunque la calidad del agua sea relativamente peor, sigue teniendo un estado muy bueno para el riego de los cultivos. Por consiguiente la configuración elegida para la instalación bajo estudio es la que utilizaba el modelo **TM820V-440** con **38 tubos de presión y 7 membranas por tubo**.

## **7.4. Selección del sistema de recuperación de energía**

En este apartado se realizará una comparativa de las distintas opciones que existen referentes al aprovechamiento del rechazo del proceso de desalación, y una vez elegido, se realizará el dimensionado del mismo para observar cómo afecta su incorporación al proceso de desalación.

### **7.4.1. Sistema de recuperación de energía**

En primer lugar se hará una breve descripción de las distintas tecnologías que se pueden utilizar para el sistema de recuperación. En este caso se estudiarán 3 y se comprobará cuál consigue reducir en mayor medida el consumo específico del proceso de desalación.

#### **Turbina Pelton**

Este tipo de turbina de impulsión utiliza una rueda giratoria que convierte la energía potencial de un fluido que tiene una alta presión en energía cinética, es decir, aumentado de manera drástica la velocidad que presenta el fluido. Se instala a la salida del bastidor de membranas donde se coloca un colector de alta presión que transporta el rechazo hasta la turbina.

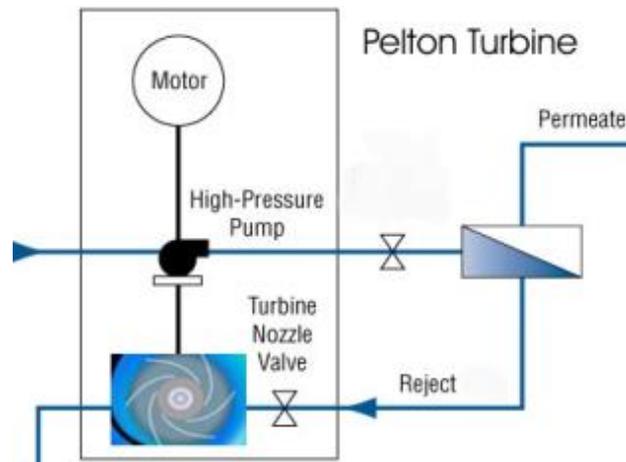


Figura 48: Esquema de funcionamiento turbina Pelton (Fuente: Toray Industries)

### **Turbo-charger**

Combina en una sola unidad bomba y turbina, pero al contrario de otras turbinas destinadas a la recuperación de energía que transforman la energía de presión o cinética en energía mecánica para servir de apoyo a una bomba o motor, este equipo es capaz de transmitir la energía de un fluido a otro fluido distinto. Se instala después de la bomba de alta presión para elevar la presión del fluido a la requerida por el bastidor de membranas, mientras que se aprovecha de la presión proveniente del rechazo del proceso realizado por dicho bastidor.

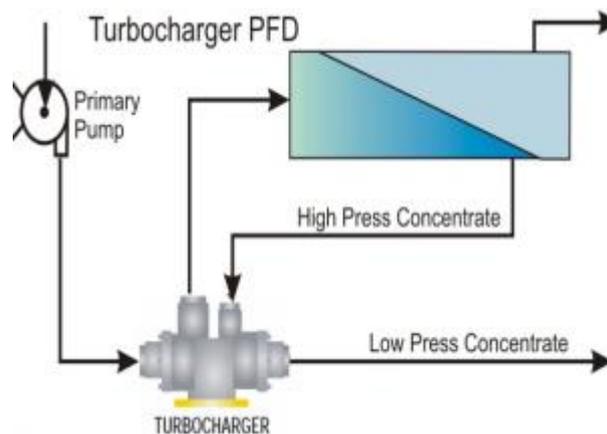


Figura 49. Esquema de funcionamiento turbo-charger (Fuente: Toray Industries)

### **Intercambiador de presión**

Los intercambiadores de presión también denominados recuperadores isobáricos son capaces de transferir la presión del flujo de rechazo proveniente del proceso de desalación al flujo que proviene del mar, es decir, comparte la misma

alimentación que la bomba de alta presión pero se dividen en dos flujos distintos independientes, y una vez se transfiere la presión, el flujo del intercambiador se une con el de la bomba de alta presión para entrar de manera combinada en el bastidor de membranas. Hoy en día el sistema más utilizado gracias al alto rendimiento que alcanzan.

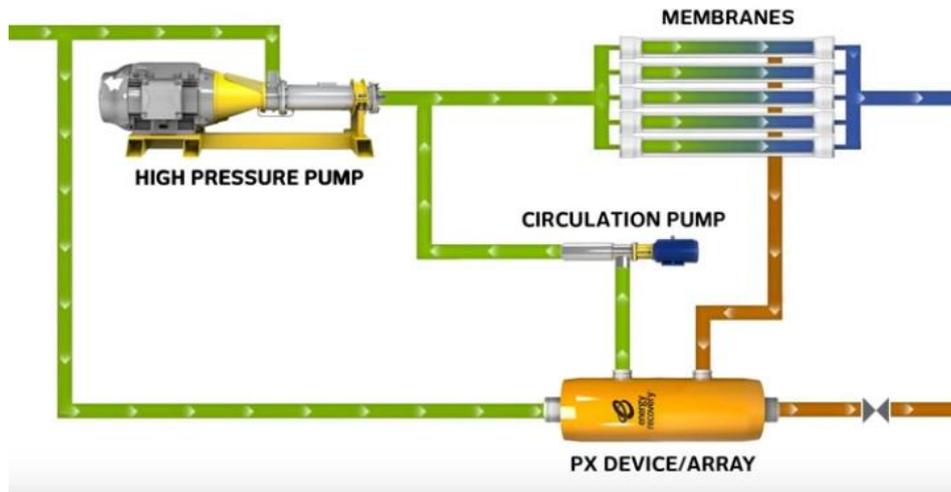


Figura 50: Esquema de funcionamiento intercambiador de presión (Fuente: Energy Recovery)

### 7.4.2. Comparativa entre los sistemas de recuperación de energía

Para realizar la comparativa entre los distintos equipos se ha hecho uso del software de dimensionado de membranas ya que tiene la posibilidad de incluir en la simulación los distintos sistemas de recuperación y por tanto se podrá obtener los distintos consumos específicos.

Para el proceso de cálculo se utilizará la configuración de tubos de presión y membranas seleccionada en el apartado anterior y se impondrá un rendimiento de la bomba de alta presión de 100%. Y para los rendimientos y parámetros de cada uno de los equipos se utilizarán los recomendados por el software.

Recuperador de energía	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )
Sin recuperación	3,669
Turbina Pelton	2,491
Turbo-charger	2,262
Intercambiador de presión	1,769

*Tabla 25: Comparativa de recuperadores de energía (Fuente: Toray DS2)*

En vista de los resultados obtenidos, el sistema que es capaz de hacer trabajar al núcleo de desalación de manera más eficiente es el intercambiador de presión. Con lo que será la opción elegida para el sistema de recuperación de energía.

### 7.4.3. Dimensionado del sistema de recuperación de energía

Para realizar el dimensionado del intercambiador de presión se tiene que elegir antes con que fabricante se va a trabajar. En este caso se ha seleccionado la empresa Energy Recovery que facilita una hoja de Excel para determinar que modelo de intercambiador y configuración a utilizar. En dicha hoja se tienen que introducir los siguientes datos obtenidos mediante el software de dimensionado del núcleo de desalación:

Caudal de permeado (m <sup>3</sup> /día)	3700
TDS de alimentación (mg/l)	38879
TDS de permeado (mg/l)	240,6
Presión de alimentación de las membranas (bar)	58,95
Presión de rechazo (bar)	57,94
Factor de conversión (%)	45,00
Temperatura (°C)	19

*Tabla 26: Datos de entrada del software (Fuente: Elaboración propia. TorayDS2)*

Una vez introducidos, la propia hoja selecciona el modelo más apropiado y impone el número de intercambiadores a instalar. El modelo seleccionado es el **PX-Q300** y se recomienda la instalación de 3 intercambiadores. Sin embargo como cada uno de los intercambiadores estaba trabajando muy cerca de su caudal límite se decide operar con una configuración de **4 intercambiadores** que disminuye el caudal unitario y aumenta la eficiencia del conjunto.

Los resultados obtenidos en el primer dimensionado no indican de manera fiel las condiciones de operación del sistema de recuperación ya que a estas alturas del estudio todavía no se había dimensionado ni la bomba de alta presión ni la bomba booster.

<b>PX Technology Performance</b>	
PX unitary flow	47,1 m3/hr
Salinity Increase at membranes	2,8%
Volumetric mixing VM	5,9%
Lubrication flow (LF) per PX array	1,6 m3/hr
LF as % of concentrate flow	0,9%
HP DP	0,5 bar
LP DP	0,5 bar
RO Specific Energy **	1,78 kWh/m3
Efficiency	97,65%

Figura 51: Resultados del primer dimensionado del intercambiador de presión (Fuente: Energy Recovery)

<b>Eficiencia de intercambiadores (%)</b>	97,65
<b>Caudal bomba booster (m3/h)</b>	186,8
<b>Presión de entrada bomba booster (bar)</b>	57,5
<b>Caudal bomba de alta presión (m3/h)</b>	155,8

Tabla 27: Datos de interés para el dimensionado de bombas de la instalación (Fuente: Elaboración propia. Energy Recovery)

Con lo que cuando se finalizó el proceso de dimensionado y selección de bombas se recalcularon los intercambiadores de presión manteniendo el mismo modelo y configuración. Se obtuvieron los siguientes resultados

<b>PX Technology Performance</b>	
PX unitary flow	47,1 m3/hr
Salinity Increase at membranes	2,8%
Volumetric mixing VM	5,9%
Lubrication flow (LF) per PX array	1,6 m3/hr
LF as % of concentrate flow	0,9%
HP DP	0,5 bar
LP DP	0,5 bar
RO Specific Energy **	2,28 kWh/m3
Efficiency	97,65%

Figura 52: Resultados del segundo dimensionado del intercambiador de presión (Fuente: Energy Recovery)

Y mediante el software de membranas se realizó el primer y segundo dimensionado del intercambiador para comparar resultados:

Método cálculo	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )
Primer dimensionado	1,769
Segundo dimensionado	2,246

Tabla 28. Consumos específicos obtenidos del software de membranas (Fuente: TorayDS2)

## 7.5. Sistema de tuberías

La planta desaladora cuenta con diversos sistemas de conducción de agua formados por tuberías. Tendríamos las tuberías de captación, el colector principal que une los tres pozos y los conecta con la planta, las tuberías de distribución y las que forman parte del sistema de rechazo de salmuera. Para poder realizar el dimensionado de cada una de las bombas de los diversos sistemas se tiene que calcular las pérdidas de carga que van asociadas a las tuberías. La determinación de estas se calculará mediante las expresiones correspondientes (en el anexo 2 se puede observar el proceso de cálculo paso a paso).

### 7.5.1. Material de las tuberías

Es importante remarcar que todas las tuberías de la planta se han dimensionado teniendo en cuenta que están fabricadas de **PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio)** gracias a sus características que se enumerarán a continuación:

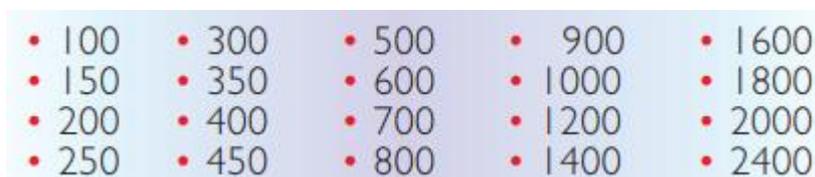
- Alta resistencia mecánica
- Alta resistencia a la corrosión
- Alta ligereza en comparación a otros materiales como el acero o el hormigón que pueden llegar a pesar entre 4 o 10 veces más.
- Vida útil casi ilimitada lo que implica que la necesidad de mantenimiento es baja.
- Superficie interior lisa (reducción de las pérdidas de carga y evita la acumulación de lodos).

Ahora se requiere un fabricante que ofrezca tuberías de este material, para ello se ha consultado la página web del Grupo Sectorial de Tuberías Plásticas (AseTUB) que tiene una herramienta online de búsqueda de empresas que utiliza como criterios de búsqueda la aplicación que van a tener las tuberías y su material. Tras la búsqueda se

obtuvieron tres empresas, de las cuales se eligió Amiblu que trabaja con productos del fabricante Flowtite, que destaca mundialmente por ser la mayor empresa distribuidora de tuberías y accesorios de PRFV.

Y por último se necesitaba saber con qué diámetros comerciales trabaja esta empresa ya que mediante el criterio de Bonet explicado en el anexo 2, se elegirán los diámetros inmediatamente superiores a los obtenidos mediante este criterio.

Por lo que se accedió a su página web y se buscó el catálogo correspondiente a las tuberías fabricadas de PRFV y se obtuvo el siguiente listado de diámetros comerciales.



• 100	• 300	• 500	• 900	• 1600
• 150	• 350	• 600	• 1000	• 1800
• 200	• 400	• 700	• 1200	• 2000
• 250	• 450	• 800	• 1400	• 2400

Figura 53: Diámetros comerciales de tuberías (Fuente: Flowtite)

### 7.5.2. Tubería de captación

Sabemos que la tubería de captación va desde la profundidad de cada pozo hasta la unión con el colector principal, la profundidad del pozo es de 40 metros y la parte restante de la tubería que hace de unión con el colector mide 25 metros. Con lo que cada **tubería de captación tendrá una longitud de 65 metros**.

Para el cálculo del diámetro de esta tubería se hará uso del criterio de Bonnet, en el que tendremos en cuenta la mitad del caudal de alimentación ya que la captación se realizará mediante dos pozos que estarán siempre en estado operativo. El diámetro teórico obtenido es de 247mm, por lo que **se selecciona el diámetro comercial inmediatamente superior, que es 250mm**.

### 7.5.3. Colector principal

El colector une el punto de unión de los tres pozos con la entrada de la planta de desalación, es decir, con la bomba de alta presión. En este recorrido es donde podemos encontrar los pretratamientos previos a la entrada del proceso de desalación para evitar que el agua de alimentación dañe los equipos.

Con relación a la diferencia de cotas entre los dos puntos que une el colector se supondrá que el terreno es totalmente horizontal, sin pendiente alguna por lo que la diferencia será nula. **La longitud del colector es de 40 metros** y mediante el criterio de Bonnet se obtiene un diámetro teórico de 326mm por lo que **se usará el diámetro comercial inmediatamente superior cuyo valor es 350mm.**

#### **7.5.4. Tuberías de distribución**

Las tuberías que conforman el sistema de distribución se encargan de transportar el caudal de permealdo de la planta desaladora hacia un depósito de cabecera, que puede distribuir el agua hacia las zonas de cultivo o como se comentó en el apartado de cálculo de producción de la planta desde ese depósito se transporta el agua producto a un depósito más grande que almacene parte del agua o a varios depósitos que tenga la empresa distribuidora de agua.

El depósito regulador se colocó en una zona con cierta altitud con el fin de poder realizar el abastecimiento de agua mediante trasvase de gravedad, en concreto hay una **diferencia de cota de 30 metros entre la planta desaladora y el depósito de cabecera.** Mediante la herramienta Goolzoom se obtuvo tanto la diferencia de cota entre la desaladora y el depósito, y la longitud del tramo de tuberías.



Figura 54: Recorrido de la tubería de distribución hasta el depósito de regulación (Fuente: Elaboración propia. Goolzoom)

Se intentó realizar una conducción lo más lineal posible, cuya longitud es de 1400 metros pero como el terreno presenta irregularidades se decidió aumentar **la longitud del conjunto de tuberías de distribución a 1600 metros**.

Mediante el criterio de Bonnet calculado con el caudal de permeado se obtuvo que el diámetro teórico es de 237mm y nuevamente **se usará el diámetro comercial inmediatamente superior, que tiene un valor de 250mm**.

#### 7.5.5. Tubería del sistema de rechazo de salmuera

Esta tubería se encarga de transportar el rechazo producido por el proceso de desalación hacia un emisario submarino. El emisario se impuso en la isobata más cercana a la costa que se encuentra a una distancia lineal de la planta de 777 metros y 50 metros de profundidad como se puede observar en la figura 54. Como se desconoce el estado del fondo marino **se aumenta la distancia a 950 metros y la diferencia de cota entre la planta y el emisario es de 60 metros**.

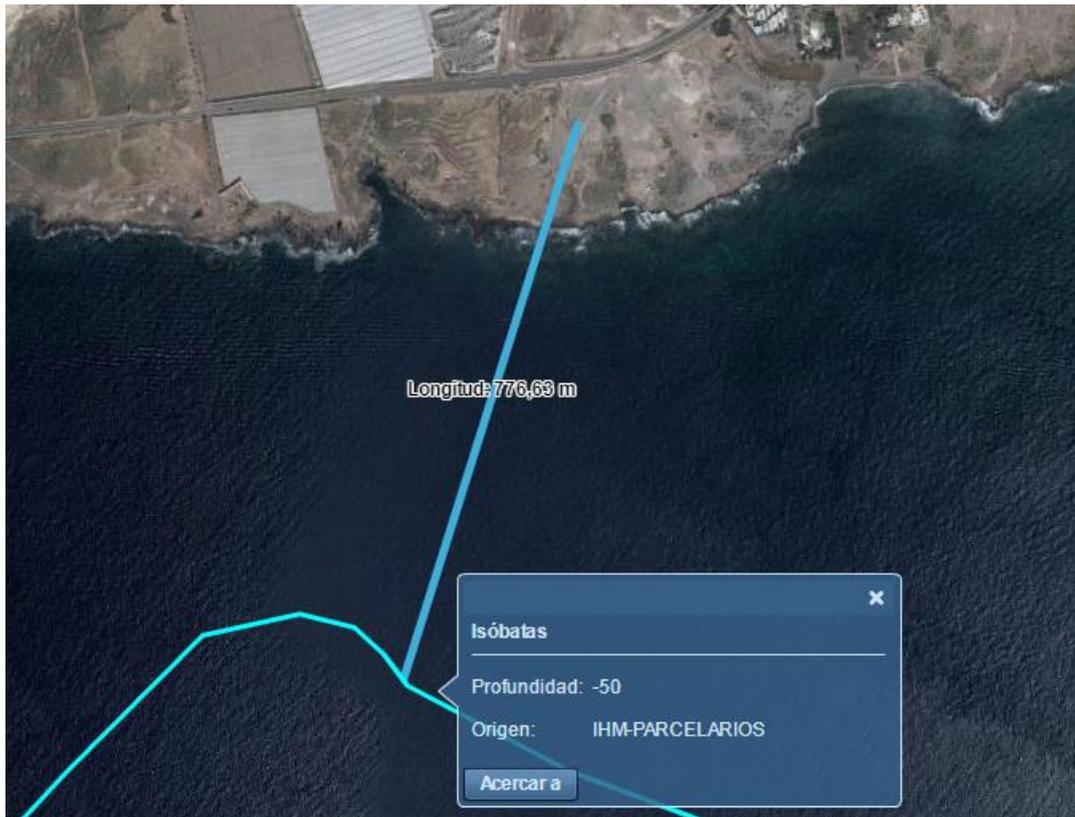


Figura 55: Distancia y profundidad a la que se encuentra el emisario submarino (Fuente: Instituto Español de Oceanografía)

Nuevamente se aplica el criterio de Bonnet y se calcula el diámetro teórico. El valor del caudal de rechazo se puede obtener mediante la expresión que relaciona el caudal de permeado y el factor de conversión o del propio software de membranas. El diámetro obtenido es 256mm, por lo que **se toma el diámetro comercial de 300mm**.

#### 7.5.6. Resumen de los sistemas de tuberías

En este apartado se realizará una tabla resumen que recoja todas las longitudes y diámetros obtenidos para cada una de las tuberías.

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Diferencia de cota (m)
Captación	65	250	40
Colector	40	350	0
Distribución	1600	250	30
Rechazo	950	60	60

Tabla 29: Resumen de datos obtenidos sobre las tuberías (Fuente: Elaboración propia)

## 7.6. Depósito de regulación y de cabecera.

La EDAM contará con un total de dos depósitos, uno de regulación ubicado en la propia instalación y otro de cabecera emplazado en la localización definida en el apartado 7.5.4. de este estudio. El primero almacena el permeado una vez se ha realizado la etapa de postratamiento, para más tarde enviarlo a la sala de bombeo donde se impulsa hasta el segundo depósito. Sus capacidades varían en función de los requerimientos impuesto a cada uno de ellos. El de regulación no requiere de un gran tamaño ya que como su propio nombre indica tiene la función de regular, mientras que el de cabecera depende de las necesidades hídricas de los cultivos de la zona y de la existencia de otros depósitos para almacenar el excedente de agua que no se utilice. Para determinar su capacidad se han estudiado las capacidades de los depósitos de la EDAM de Granadilla que tiene un caudal de permeado de 14000 m<sup>3</sup>/ día. Su depósito de regulador es de 7000 m<sup>3</sup> y el de cabecera de 10000 m<sup>3</sup>. Por lo que siguiendo estas directrices se decide en un primer momento imponer una capacidad de 1850 m<sup>3</sup> para el depósito regulador y 3000 m<sup>3</sup> para el de cabecera, aunque esta último puede variar en función de las condiciones previamente nombradas.

## 7.7. Dimensionado de las bombas de la instalación

Para el dimensionado de las bombas en primer lugar se tiene que calcular la altura manométrica que debe alcanzar el fluido. Una vez conocida, haciendo uso de ella, del caudal y la temperatura se podían consultar los diversos fabricantes de bombas seleccionados para obtener las curvas características y así imponer los modelos de bombas destinado a cada sistema de la EDAM. La expresión de cálculo de la altura es la que se facilita a continuación:

$$H_b = \frac{p_f - p_i}{\gamma} + \frac{v_f^2 - v_i^2}{2g} + (z_f - z_i) + \sum Hr$$

*Ecuación 2: Expresión de la altura manométrica de una bomba*

En ella se observa que hay un término referido a las pérdidas de carga, el cual se tiene que calcular atendiendo a las condiciones que presente cada sistema de la

instalación, para observar el procedimiento de cálculo de cada una de las pérdidas de carga asociadas a cada sistema ir al Anexo II de este estudio.

También se tuvo en consideración la altura mínima de aspiración ( $NPSH_r$ ) de cada bomba y se comprobó que la altura neta de aspiración disponible ( $NPSH_d$ ) era siempre superior para asegurar que no se produciría el fenómeno de cavitación.

### 7.7.1. Selección de la bomba booster

Para el dimensionado de la bomba booster se tuvo en cuenta que:

- La diferencia de cota es tal que todos los elementos de la instalación se encuentran a la misma altura por lo que su valor es cero.
- Las pérdidas de carga en este caso tienen un valor tan bajo que no influyen de manera drástica en comparación al resto de términos de la expresión.

Por lo que cuando se calculó la altura manométrica de la bomba, las presiones de entrada y salida fueron los únicos condicionantes a la hora de determinarla, considerando también el peso específico del fluido de trabajo. Su valor es el siguiente:

Altura manométrica (m)	14,36
Caudal bomba booster (m <sup>3</sup> /h)	186,8
Temperatura del agua (°C)	19

Tabla 30: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas booster (Fuente: Elaboración propia)

Ahora con el punto de operación se estudian las diversas curvas características de las bombas facilitadas por los fabricantes y se selecciona la que opera de manera más eficiente.

Fabricante	Modelo	Rendimiento (%)	Potencia (kW)
KSB	MCPK150-125-315	81,1	15
Grundfos	NB 100-250/274	72,1	15
Lowara	NSCF 125-250/110/P45VCC4	85,25	11

Tabla 31: Tabla resumen de los modelos de bomba booster (Fuente: Elaboración propia)

Se selecciona el modelo **NSCF 125-250/110/P45VCC4** de **Lowara** al tener un menor rendimiento y consumo de potencia. Con relación a la cavitación, la altura neta

de aspiración disponible estaba muy por encima del valor mínimo por lo que no hay riesgo de cavitación.



Figura 56: Imagen del modelo NSCF 125-250/110 del fabricante Lowara ([www.lenntech.com](http://www.lenntech.com))

### 7.7.2. Selección de la bomba de alta presión

La bomba de alta presión de la planta tendrá que ser capaz de operar bajo el punto de operación impuesto. Se fijó su presión de entrada en 2 bar para evitar el fenómeno de la cavitación pero se realizará la comprobación de todas formas. Se volverán a consultar los mismos fabricantes.

Altura manométrica (m)	564,74
Caudal bomba alta presión (m <sup>3</sup> /h)	155,8
Temperatura del agua (°C)	19

Tabla 32: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de alta presión (Fuente: Elaboración propia)

En este caso Grundfos no fue capaz de suministrar un modelo capaz de trabajar bajo estas condiciones por lo que quedó descartado. Y se decidió añadir un fabricante más a la comparativa de bombas.

Fabricante	Modelo	Rendimiento (%)	Potencia (kW)
KSB	Multitec CA 100-8.1	75,59	355
Grundfos	-	-	-
Lowara	MPAE100A/10/BF3550/W25VDCC4	74,4	355
Flowserve	3X10DMX-F	77,7	350

Tabla 33: Tabla resumen de los modelos de bomba de alta presión (Fuente: Elaboración propia)

Se selecciona el modelo **3X10DMX-F** de **Flowserve** al presentar mayor rendimiento y menor potencia.



*Figura 57: Imagen del modelo 3X10DMX-F del fabricante Flowserve (Fuente: [www.flowserve.com](http://www.flowserve.com))*

### 7.7.3. Selección de la bomba de captación

Como el sistema de captación se realiza mediante pozo se tiene que trabajar con la premisa de que la bomba tiene que ser sumergibles ya que trabajarán de forma continua con una columna de agua por encima de ellas. El caudal de operación de las bombas será la mitad del caudal de alimentación debido a la utilización de dos pozos de captación. A la hora de calcular la altura manométrica de la bomba se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- Como consecuencia del paso del fluido por una etapa de pretratamiento se añade una caída de presión de 2 bar
- La presión de entrada a la bomba de alta presión tiene que ser de 2 bar
- La presión de entrada de la bomba será la de la superficie libre del líquido dentro del pozo
- Al tratarse de una bomba sumergible y no tener tubería de aspiración, se evita que se exista algún riesgo de cavitación.
- Como accesorios dentro del sistema de captación se ha tenido en cuenta un codo de 90°, una válvula de pie con colador, y la unión de la tubería de captación y colector que se estudiará como un empalme en T.

Así pues las pérdidas de carga obtenidas y el punto de operación de la bomba son los que se muestran a continuación:

Tubería	H <sub>r</sub> (m)	H <sub>r(acc)</sub>	H <sub>r</sub> total (m)
Captación	0,2009	0,1711	0,372
Colector	0,0855	-	0,0855

Tabla 34: Pérdidas de carga en el sistema de captación (Fuente: Elaboración propia)

Altura manométrica (m)	80,12
Caudal bomba de captación (m <sup>3</sup> /h)	171,36
Temperatura del agua (°C)	19

Tabla 35: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de captación (Fuente: Elaboración propia)

Se estudiarán los modelos facilitados por los fabricantes elegidos. En el caso de Grundfos para la búsqueda de bombas sumergibles no dejaba imponer el fluido de trabajo ni la aplicación deseada por lo que se optó por no tenerlo en cuenta a la hora de realizar la comparativa de bombas.

Fabricante	Modelo	Rendimiento (%)	Potencia (kW)
KSB	UPA 250C-150	80,10	60
Grundfos	-	-	-
Lowara	Z10220 3/2B-L8W	81,40	60

Tabla 36: Tabla resumen de los modelos de bomba de captación (Fuente: Elaboración propia)

Se selecciona el modelo **Z10220 3/2B-L8W** de **Lowara** al tener un menor rendimiento ya que ambos modelos presentan la misma potencia.



Figura 58: Imagen del modelo Z10220 3/2B-L8W del fabricante Lowara (Fuente: [www.xylect.com](http://www.xylect.com))

#### 7.7.4. Selección de la bomba previa al postratamiento

Su objetivo es aumentar la presión del flujo de permeado de las membranas antes de realizarse el postratamiento con el fin de evitar la cavitación. Se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- La salida del flujo permeado y la etapa de postratamiento se encuentran a la misma altura.
- La presión de salida de la bomba será de 2 bar para hacer frente a las pérdidas de carga del postratamiento y evitar así la cavitación.
- No se tendrán en cuenta las pérdidas asociadas a tuberías o accesorios ya que en el alcance se impone que estos elementos no contemplan.

las condiciones de operación de la bomba serán las siguientes:

<b>Altura manométrica (m)</b>	20,42
<b>Caudal bomba de captación (m<sup>3</sup>/h)</b>	154,16
<b>Temperatura del agua (°C)</b>	19

*Tabla 37: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de pre-postratamiento (Fuente: Elaboración propia)*

Después de consultar los diversos fabricantes se obtuvieron los modelos que más rendimiento presentaban.

Fabricante	Modelo	Rendimiento (%)	Potencia (kW)
<b>KSB</b>	-	-	-
<b>Grundfos</b>	NB 100-250/274 EUP A-F2-A-E-BQQE	75,2	11
<b>Lowara</b>	NSCF 100-315/110/P45VCC4	78,9	11

*Tabla 38: Tabla resumen de los modelos de bomba de pre-postratamiento (Fuente: Elaboración propia)*

Como ambos modelos tienen la misma potencia se selecciona el que mayor rendimiento presenta. Por lo que se hará uso del modelo **NSCF 100-315/110/P45VCC4** de **Lowara**. Con relación a la cavitación no habrá riesgo alguno.



*Figura 59: Imagen del modelo NSCF 100-315/110/P45VCC4 del fabricante Lowara (Fuente: [www.xylect.com](http://www.xylect.com))*

### 7.7.5. Selección de la bomba de distribución

Para el sistema de distribución se ha tenido en consideración una segunda bomba como reserva en caso de que se produzca una avería en la que se encuentre operativa. Las pérdidas de carga que irán asociadas a la bomba son las debidas al sistema de tuberías, y como se desconoce que accesorios son necesarios y su cantidad, se decide que estas pérdidas serán un 3% de las primarias.

Tubería	H <sub>r</sub> (m)	H <sub>r(acc)</sub>	H <sub>r total</sub> (m)
Distribución	4,0656	0,1219	4,1875

Tabla 39: Tabla 32: Pérdidas de carga en el sistema de distribución (Fuente: Elaboración propia)

El punto de operación en el que debe de trabajar la bomba seleccionada es el siguiente:

Altura manométrica (m)	34,1875
Caudal bomba distribución (m <sup>3</sup> /h)	154,16
Temperatura del agua (°C)	19

Tabla 40: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de distribución (Fuente: Elaboración propia)

Se consultan los mismos fabricantes que el apartado anterior. En este caso no se ha dado ningún problema la hora de realizar la búsqueda de los modelos por lo que se podrá realizar la comparativa con todos los fabricantes.

Fabricante	Modelo	Rendimiento (%)	Potencia (kW)
KSB	Multitec A125/2-10.2.30.81	79,61	22
Grundfos	NB 80-315/334	77,1	22
Lowara	NSCF 80-160/220/W25RCC4	80	22

Tabla 41: Tabla 26: Tabla resumen de los modelos de bomba de distribución (Fuente: Elaboración propia)

Como los tres modelos tienen la misma potencia, se selecciona el modelo **NSCF 80-160/220/W25RCC4** de **Lowara** al tener mayor rendimiento. Con relación a la cavitación,

se ha comprobado mediante la curva característica de la bomba que no hay riesgo ninguno.



*Figura 60: Imagen del modelo NSCF 80-160/220/W25RCC4 del fabricante Lowara (Fuente: [www.xylect.com](http://www.xylect.com))*

#### **7.7.6. Selección de la bomba de rechazo**

En un primer momento, el sistema de rechazo de la planta desalación debería operar sin la necesidad de una bomba ya que el trasvase de agua se realiza por la acción de la gravedad. Sin embargo esta premisa habría que comprobarla mediante la determinación del balance de energía correspondiente, en él se ha tenido cuenta la diferencia de cota entre la planta y el emisario, la diferencia de presiones y las posibles pérdidas debidas a accesorios. Al calcular el balance se ha determinado que la altura que debería de elevar la bomba en el supuesto caso es de -23,818m.

Este resultado es indicativo de que ***no existe necesidad ninguna de instalar una bomba de rechazo en la planta*** ya que la diferencia de cota existente es tal que permite el trasvase de la salmuera por gravedad.

#### **7.8. Resultados obtenidos de las bombas y consumo específico**

Ahora que se conocen los consumos y rendimientos de las bombas de los sistemas que conforman la planta, se recalcula el consumo con el sistema de recuperación de energía y se puede comparar con el resultado obtenido en el software de membranas ya que tiene la posibilidad de añadir recuperadores isobáricos. Además también se determinará el consumo específico total de la instalación.

En primer lugar con el software de dimensionado del bastidor de membranas, TorayDS2, se realizó nuevamente la simulación añadiendo el sistema de recuperación de energía y usando los rendimientos de las bombas seleccionadas. Y después mediante la hoja de cálculo de Energy Recovery y manteniendo la misma configuración de intercambiadores de presión se determinó nuevamente el consumo específico. En la siguiente tabla se pueden observar los resultados obtenidos:

Herramienta de cálculo	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )
Energy Recovery	2,28
TorayDS2	2,246

Tabla 42: Comparativa de consumos específicos finales (Fuente: Elaboración propia)

Es importante destacar que en ambos consumos específicos solo se tienen en cuenta los equipos que forman parte del núcleo de desalación (bomba booster y bomba de alta presión).

A modo de recordatorio se realizará una tabla que recoge todos los datos de las bombas y en ella también se incluirá el consumo específico de cada una de ellas. El consumo se determinará teniendo en cuenta la premisa de que los equipos trabajan de manera ininterrumpida durante las 24 horas el día.

Bomba	Modelo	Consumo (kW)	Consumo específico (kW/hm <sup>3</sup> )
Captación	Z10220 3/2B-L8W	120	0,78
Alta presión	3X10DMX-F	350	2,27
Booster	NSCF 125-250/110/P45VCC4	11	0,071
Pre-postratamiento	NSCF 100-315/110/P45VCC4	11	0,071
Distribución	NSCF 80-160/220/W25RCC4	22	0,14

Tabla 43: Consumo específico de cada bomba (Fuente: Elaboración propia)

Y ahora agrupamos cada bomba a su sistema correspondiente:

Sistema	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )
Captación	0,78

Núcleo de desalación	2,34
Pre-postratamiento	0,071
Distribución	0,14
<b>Total</b>	<b>3,33</b>

Tabla 44: Consumo específico total de todos los sistemas de la instalación (Fuente: Elaboración propia)

Y se obtiene que el núcleo de desalación presenta un consumo específico de 2,34 kWh/m<sup>3</sup>, muy cercano a los calculados previamente.

Para la totalidad de la planta de desalación, el **consumo específico alcanza un valor de 3,33 kWh/m<sup>3</sup>**. Y su **consumo total es de 514 kW**. En relación con la disponibilidad de la planta se impone que la misma estará operativa durante todo el año menos el mes de diciembre, por lo comentado en el apartado de cálculo de la capacidad de la planta. Así que **su consumo anual es de 4120224 kWh**.

## 7.9. Alternativas de gestión de la salmuera

Aunque en la EDAM se utilizó el método de rechazo mediante emisario submarino, existen otras alternativas que podrían implantarse, las cuales crearían la posibilidad de revalorizar la salmuera y obtener de ella productos de alto valor comercial, reduciendo en gran medida su vertido al mar, y por consiguiente, su impacto ambiental. Las alternativas propuestas son las siguientes y se estudiará su viabilidad teniendo en cuenta las condiciones que presenta la EDAM bajo estudio, si se quiere saber en profundidad el funcionamiento de cada tecnología ver el apartado de alternativas localizado en el anexo II.

### 7.9.1. Tratamiento de salmuera mediante un sistema de vertido cero

De todas las propuestas es la más viable gracias a fácil adaptación a cualquier volumen de producción de salmuera, además de ser la más respetuosa con el medio ambiente. El tratamiento se divide en varias etapas: primero se obtiene el flujo de rechazo, luego se realiza una serie de evaporación al vacío y por último se aplica cristalización. De la totalidad del proceso se obtiene sales que pueden revalorizarse y agua de alta calidad a la que se le puede dar el mismo uso que el permeado.

### **7.9.2. Inyección profunda**

No es un método que aproveche la salmuera como tal dado que es un proceso de vertido, que si realiza de la forma correcta permite verter el residuo en el subsuelo a través de un pozo profundo sin producir ningún impacto ambiental. Se tiene que tener un cocimiento amplio del terreno donde se vayan a emplazar los pozos y además debe de cumplir con una serie de condiciones.

### **7.9.3. Balsas de evaporación**

Consiste en almacenar la salmuera en una balsa para que mediante el proceso de evaporación se consiga reducir su contenida en agua, reduciendo su volumen y aumento su concentración de sales. Una vez finalizado se aplica la cristalización para obtener las sales en estado sólido. Su implantación requiere de zonas áridas además de grandes extensiones de terreno y existe riesgo de contaminación de acuíferos cercanos.

### **7.9.4. Uso de la salmuera para producir zumos concentrados**

Tecnología en desarrollo que permite utilizar la salmuera para producir zumos concentrados. Se sustituye el proceso actual que se realiza por medio de aportación de actual por un proceso de ósmosis inversa donde el agua del zumo pasa a través de la membrana y la adquiere la salmuera lo que provoca una reducción de su concentración de sales. Se requiere de una fábrica que se encuentre próxima a la EDAM y además que cuente con esta tecnología.

## **7.10. Dimensionado del sistema eólico**

Ahora que se conoce la potencia que demanda la planta, se realiza un análisis del recurso eólico del emplazamiento para saber la orientación y la intensidad de viento con el fin de escoger el aerogenerador que mejor se ajuste a la situación.

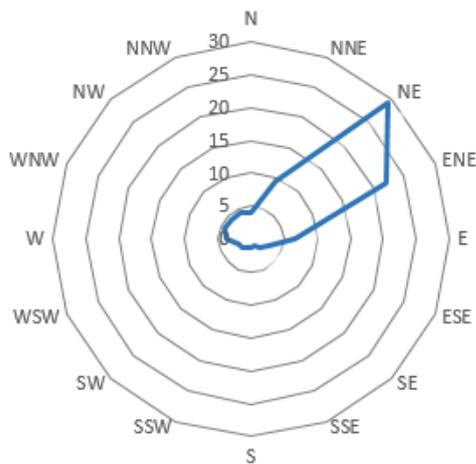
### **7.10.1 Determinación del recurso eólico**

En primer lugar se estudiarán las condiciones eólicas del emplazamiento. Para ello se buscará el emplazamiento en el mapa eólico facilitado por el IDAE. En este caso no hay datos en el lugar exacto donde va instalada la planta por lo que se tomarán los del lugar más próximo.

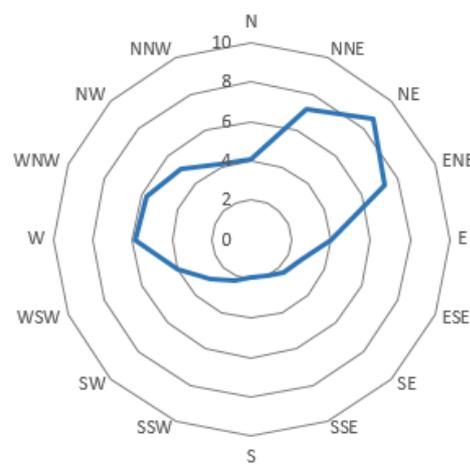
En los datos que se facilitan tenemos la frecuencia y velocidad con la que sopla el viento en todas las direcciones, así como los parámetros de forma y escala de la distribución de Weibull.

A partir de las frecuencias y velocidades se construirán las rosas de los vientos correspondientes que nos permitirán decidir que orientación es la óptima para el aerogenerador.

*Rosa de los vientos de frecuencia*



*Rosa de los vientos de velocidades*



*Figura 61: Rosas de los vientos de frecuencias y velocidades (Fuente: Elaboración propia)*

Observando ambas rosas se llega a la conclusión de que **la dirección Nordeste presenta la mayor frecuencia de soplo y velocidad** en comparación al resto de direcciones. Así que el aerogenerador se orienta en dicha dirección para conseguir el máximo aprovechamiento del recurso eólico.

Como también se facilitaron los parámetros de escala y forma de la distribución de Weibull en cada dirección, se realizó el promedio de ambos y mediante la expresión de la distribución se construyó la gráfica. Donde se puede apreciar que **el valor de velocidad más común está entre los 2 m/s y 6 m/s**.

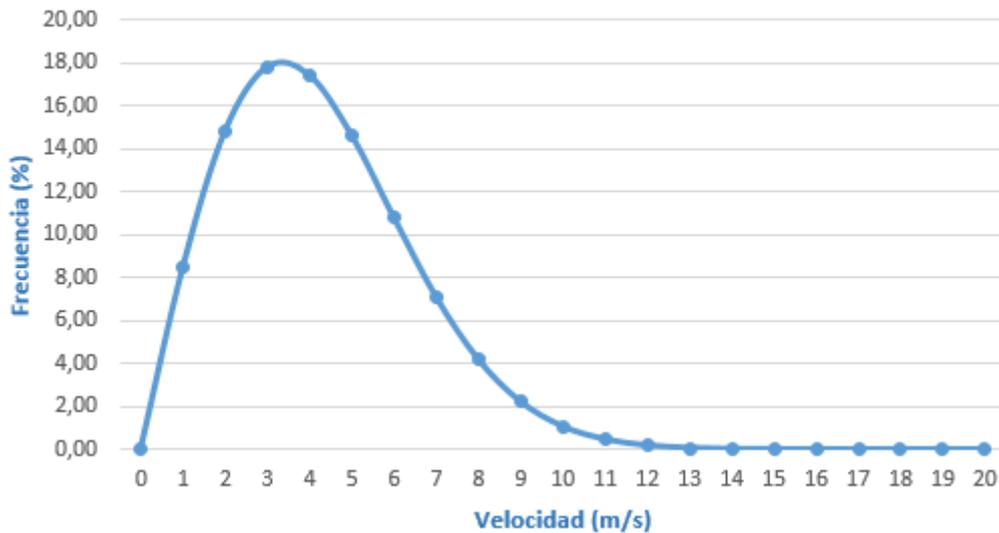


Figura 62: Gráfica de distribución de velocidades (Fuente: Elaboración propia)

### 7.10.2 Emplazamiento del aerogenerador

Ahora que se conoce el recurso eólico de la zona mediante la herramienta del ITC que permite estimar la energía producida por un aerogenerador podemos estudiar diversos emplazamientos imponiendo sus coordenadas con el fin de saber en cuál de ellos se puede producir una mayor potencia. Las premisas que se tuvieron en cuenta para elegir esos tres emplazamientos son las siguientes:

- Zonas que no se encuentran muy cercanas a núcleos de población con el fin de evitar ruidos u otras perturbaciones que puedan afectar a sus habitantes.
- Lugares donde no se generen cambios en la rugosidad del terreno debido a edificios u otras estructuras que podrían provocar turbulencias o reducciones en la velocidad del viento.
- Zonas lo más alejadas posible del aeropuerto Tenerife Sur con el fin de evitar interferencias con el tráfico aéreo.
- Se tendrá en cuenta una altura de estudio de 60 metros por lo comentado en el punto anterior.
- El estudio se realizará con un mismo modelo de aerogenerador.

Y se decidió que estas 3 zonas serían las estudiadas para la instalación del aerogenerador:



*Figura 63: Diversos emplazamientos para instalar el aerogenerador (Fuente: Elaboración propia. Grafcan)*

Se llegó a la conclusión de que la zona tres es la que presenta mayor velocidad además de mayor energía anual generada por lo que será el lugar de emplazamiento del aerogenerador.

### 7.10.3 Selección del aerogenerador

Una vez conocido el emplazamiento, se tiene que seleccionar que aerogenerador permite alcanzar una mayor potencia respetando el límite de altura impuesto. Antes de hacer uso de la base de datos del ITC se hizo una consulta de que modelos seguían en el mercado haciendo uso de la base de datos que facilita la página web “The Wind Power”. Se comprobó que la mayoría ya no se fabricaban ya que existían nuevos modelos que los sustituyen, por lo que se decidió utilizar los pocos que seguían en el mercado, y mediante la introducción de datos manuales en la herramienta del ITC se añadieron algunos modelos nuevos. Según los cálculos realizados, **la demanda energética anual de la EDAM será de 4120224 kWh**. Para la selección del aerogenerador se tendrá en cuenta que éste sea capaz de generar una potencia mayor a la requerida (se podrán estudiar configuraciones de 2 aerogenerador pero habrá que tener en cuenta diversos factores), el déficit o exceso de energía que genera y su factor de carga, que se evalúa de la siguiente forma:

Factor de carga	Calificación
FC < 20%	Inaceptable
20% < FC < 25%	Aceptable
25% < FC < 30%	Bueno
30% < FC < 40%	Muy bueno
40% < FC < 50%	Excelente
FC > 50%	Extraordinario

Tabla 45: Calificación factores de carga (Fuente: Elaboración propia)

Así pues lo modelos estudiados son los siguientes:

Modelo	Potencia anual estimada (kWh)	Exceso o déficit energético (kWh)	Exceso o déficit energético (%)	Factor de carga (%)	Calificación
D4-46	2941133,4	-1179090,6	-28,6	27,98	Bueno
D6-60	5293265,8	1173041,8	28,5	48,34	Excelente
D6 62	5546896	1426672	34,6	50,65	Extraordinario
E70	4552773,6	432549,6	10,5	22,60	Aceptable
N90	5627307,7	1507083,7	36,6	25,70	Bueno
MM82	4642956,2	522732,2	12,7	25,85	Bueno
D 900/61	5724129	1603905	38,9	36,30	Muy bueno
<b>U57</b>	<b>4576988,8</b>	<b>456764,8</b>	<b>11,1</b>	<b>34,83</b>	<b>Muy bueno</b>
E-48	3780117,4	-340106,6	-8,3	26,97	Bueno
E-44	3469946,6	-650277,4	-15,8	22,01	Aceptable
E-53	4333948,2	213724,2	5,2	30,92	Muy bueno

Tabla 46: Resultados obtenidos en el proceso de dimensionado del aerogenerador (Fuente: Elaboración propia)

Después de realizar el análisis correspondiente se decide seleccionar el modelo **U57 de 750 kW del fabricante Unison en una configuración de dos aerogeneradores**. Su producción anual será de 4576988,8 kWh que está por encima de la demanda de la EDAM lo que implica que produzca un excedente del 11,1%. No obstante estos valores no son finales ya que habrá que estudiar la nueva disposición de los dos aerogeneradores.



*Figura 64: Imagen del modelo de aerogenerador U57 del fabricante Unison (Fuente: Unison)*

Como se comentó previamente, si se elegía una configuración de dos aerogeneradores se tendría que tener cuenta ciertos aspectos. Estos están recogidos en el Decreto 6/2015, de 30 enero que regula la instalación y explotación de parques eólicos en Canarias. Dichos aspectos son los siguientes:

- ❖ Como norma general la distancia mínima entre dos aerogeneradores de una misma línea no será inferior a dos diámetros de rotor.
- ❖ la distancia entre un aerogenerador y un núcleo habitado no será inferior a 250 metros para aerogeneradores de potencia inferior a 900 kW y a 400 metros para aerogeneradores de potencia superior.

En cuanto a la distancia mínima, el diámetro del rotor del modelo elegido es de 57m por lo que la **distancia mínima entre ambos tiene que ser de 114m**. Y como su potencia es inferior a 900 kW **la distancia al núcleo de población más cercano no puede ser inferior a 250 metros**. Así que la disposición más adecuada para los aerogeneradores es la que se muestra en la siguiente figura:

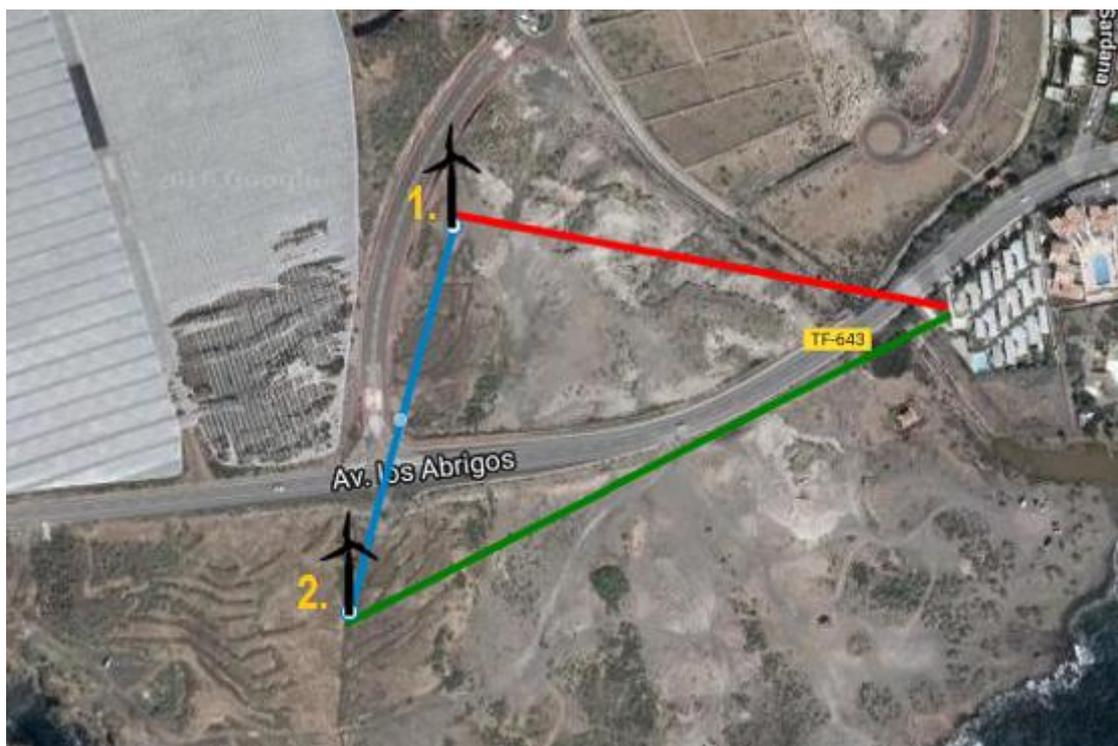


Figura 65: Disposición de los aerogeneradores (Fuente: Elaboración propia. Goolzoom)

La distancia entre ambos aerogeneradores es de 218 metros que está muy por encima de la distancia mínima impuesta. La distancia del aerogenerador 1 con respecto al núcleo de población más cercano es de 268 metros mientras que la del aerogenerador 2 es 364 metros. Con lo que se cumplan las condiciones impuestas por el decreto y se da por apta la disposición de los aerogeneradores.

Conocidos el emplazamiento exacto de cada aerogenerador, se realiza el procedimiento de cálculo de la potencia generada por el aerogenerador 1 y se recalculo el factor de carga y el exceso que presenta esta configuración.

Aerogenerador	Potencia anual estimada (kWh)	Exceso o déficit energético (kWh)	Exceso o déficit energético (%)	Factor de carga (%)	Calificación
1.	2194105,2	363375,6	8,8	33,40	Muy bueno
2.	2288494,4			34,83	Muy bueno

Tabla 47: Exceso de la configuración de dos aerogeneradores (Fuente: Elaboración propia)

Se observa una pequeña disminución en la producción del aerogenerador 1 pero se siguen manteniendo unas buenas condiciones de operación por lo que se mantiene la configuración propuesta.

## 7.11. Abastecimiento de la EDAM

El abastecimiento se realizará mediante la combinación de energía eólica y energía aportada por la red distribución general. Se ha tomado esta decisión considerando la continuidad de funcionamiento de la planta bajo un régimen estacionario. Dado que el recurso eólico no es uniforme y sufre muchas variaciones impidiendo el correcto funcionamiento de la planta en caso de que esta solo estuviera alimentada por dicho recurso, que no es el caso. El apoyo auxiliar de la red permite cubrir el déficit que puede tener el recurso renovable garantizando siempre el correcto funcionamiento de la EDAM. Ahora, si se da el caso de que el recurso eólico es muy alto y se produce un excedente, esta configuración sólo permite dos opciones. O verter la energía a la red que puede ser factible debido a lo comentado en la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico que brinda prioridad de vertido a las fuentes renovables, pero que a su vez presenta un gran inconveniente y es que el vertido sólo se puede realizar si hay demanda en la red, en caso contrario se restringe el vertido. Cuando se da esta situación la única posibilidad es desalinearse el aerogenerador para reducir la energía que esté produciendo.

## 7.12. Sistema de aprovechamiento energético

Al estar la planta abastecida mediante un recurso que no presenta una uniformidad a lo largo del tiempo, se darán situaciones donde el recurso eólico será tal que la producción de energía por parte de los aerogeneradores será mayor que la demanda, y por tanto se producirá un excedente que se podría aprovechar en el caso que se decidiera mediante diversos métodos.

**Bombeo hidráulico:** cuando exista excedente de energía, se destina a bombear agua de un embalse a otro que se encuentre a una cota superior, almacenando así la energía eléctrica en forma de energía potencial. Cuando existe demanda energética se libera el agua para realizar el trasvase al primer embalse a través de una turbina que se encarga de generar energía eléctrica.

**Aire comprimido:** el exceso de energía eléctrica se utiliza para alimentar una serie de compresores que se encargan de comprimir aire. Cuando exista un pico de demanda

eléctrica se hace pasar el aire por un conjunto de turbinas que generarán la energía eléctrica.

**Hidrógeno:** consiste en la producción de hidrógeno a partir del agua. Para ello se hace uso de la energía en exceso para realizar el proceso de electrolisis que separa las moléculas del agua obteniendo así sus elementos fundamentales, hidrógeno y oxígeno. Una vez separado, el hidrógeno se almacena. Y cuando se den situaciones donde el recurso eólico sea incapaz de cubrir la demanda de EDAM, se extrae la energía eléctrica que almacena. La extracción se realiza mediante pilas de combustible de hidrógeno en las cuales se almacena la energía eléctrica en forma de energía química, y para dar lugar a la transformación se hace combustionar el hidrógeno mediante oxígeno para dar lugar a energía eléctrica, agua y calor.

Con los sistemas de almacenamiento previamente nombrados se podría cubrir la demanda de energía en situaciones en las que exista un déficit de recurso eólico. Sin embargo, estos sistemas de almacenamiento pueden suponer un gran costo. Y por ejemplo en el caso de las pilas de hidrógeno es una tecnología en pleno desarrollo y en comparación al resto de métodos de almacenamiento, presenta costos de inversión bastante altos, entorno a los 2000 y 9000 €/kW. Por lo que en caso de hacer uso de estos sistemas habría que analizar si es más factible hacer uso de un equipo de almacenamiento de energía o usar otras alternativas como consumir energía directamente de la red en épocas de déficit y pagar el kWh que se consuma.

## 8. Resultados finales

En este apartado se describe la configuración final que tendrá el sistema de desalación mediante ósmosis inversa alimentado mediante energía eólica que produce 3700 m<sup>3</sup>/día de permeado destinado a uso agrícola.

### 8.1. Ubicación y finalidad de la planta

Después de realizar un análisis de los recursos hídricos de la isla de Tenerife y de determinar que el sur de la isla presenta una gran demanda de agua de regadío debido a la sobreexplotación de las aguas subterráneas se decide ubicar la planta de desalación

en el municipio de Granadilla de Abona, más específicamente en la parcela número 2 en la Avenida Los Abrigos. También se comprobó si el recurso eólico de la zona es suficiente como para poder alimentar a la plantar y si existe la posibilidad de poder instalar aerogeneradores.

El caudal de permeado que produce la planta está destinado a cubrir la demanda de regadío de los tomates cultivados bajo invernadero en el municipio. Aunque parte de este también se puede destinar a otros cultivos que sean tolerantes a las condiciones que presenta el agua. El agua producto en ningún momento podrá ser utilizada para consumo humano ya que el diseño de la planta se ha hecho exclusivamente para producir agua destinada a uso agrícola, la cual presenta menos restricciones en su composición en comparación con la de abastecimiento humano.

## **8.2. Sistema de captación y colector principal**

La captación del agua de alimentación se realizará mediante toma cerrada haciendo uso de tres pozos de captación. Dos de ellos estarán operando de manera ininterrumpida, captando la mitad del caudal de alimentación cada uno, y el restante se mantendrá en reserva. La profundidad de los pozos será de 40 metros y estarán dispuestos en cruz a una misma distancia del colector principal, 25 metros.

Se instalará una bomba en cada pozo, y estarán en funcionamiento dos de ellas. Se usará el modelo Z10220 3/2B-L8W de Lowara que presenta un rendimiento del 81,40% y un consumo de 60 kW. Son bombas sumergibles por lo que no existirá riesgo de cavitación al estar operando con una columna de agua por encima de ellas. Su misión es captar el agua de alimentación y llevarla a través de la tubería de captación y el colector principal hasta la entrada del núcleo de desalación, una vez se haya pasado por la etapa de pretratamiento.

Con relación a la red de tuberías estarán fabricadas de PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio). La tubería de captación tendrá un diámetro de 250 mm y una longitud de 65 metros (desde cada pozo hasta el punto de unión con el colector). En cambio el colector principal tendrá un diámetro de 300 mm y una longitud de 40 metros.

## 8.3. Pretratamiento

### 8.3.1. Pretratamiento físico

En este proceso de pretratamiento se realizarán dos etapas. Una primera etapa donde se utilizarán filtros de arenas de tipo vertical y en la segunda se hará uso de filtros de cartucho de filtración mínima de 5 micras.

### 8.3.2. Pretratamiento químico

Se realizarán varios pretratamientos para ajustar la composición química del agua.

- Desinfección para eliminar la actividad biológica.
- Decloración para eliminar el cloro residual u otros agentes oxidantes.
- Regulación de pH mediante HCL.
- Antiincrustante para evitar la precipitación de sales.

## 8.4. Núcleo de desalación

El núcleo de desalación se diseñó teniendo en cuenta las condiciones de la EDAM y calidad que debe presentar el agua producto, respetando siempre un equilibrio entre consumo energético y calidad del permeado. El núcleo en su totalidad está formado de los siguientes elementos:

- *Bastidor de membranas:* se ha seleccionado el modelo de membranas TM820V-440 de bajo consumo energético del fabricante Toray Industries ya que posibilitan la disminución del consumo específico del núcleo de desalación manteniendo una calidad de permeado aceptable. La configuración será de 38 tubos de presión y 7 membranas por tubo.
- *Bomba de alta presión:* Se eligió el modelo 3X10DMX-F del fabricante Flowserve ya que de todos los modelos estudiados, era el que presentaba un menor consumo (350kW) y mayor rendimiento (77,7%).
- *Recuperador de energía:* se seleccionó el modelo de intercambiador de presión PX-Q300 del fabricante Energy Recovery. La configuración elegida es de 4 unidades de dicho modelo. Este sistema también requiere la instalación de una bomba booster por lo que tras realizar la comparativa de distintos modelos se eligió el modelo

NSCF 125-250/110/P45VCC4 de Lowara que presenta un consumo de 11 kW y un rendimiento del 85,25%.

## 8.5. Postratamiento

Para cumplir con los valores finales del agua producto recomendados por la bibliografía se realizará una etapa de postratamiento una vez el permeado ha salido del núcleo de desalación. En dicha etapa se llevará a cabo la estabilización del agua a la salida del bastidor de membranas mediante la adición de productos químicos. Se empleará NaOH (sosa cáustica) pero no garantiza que el agua no sea corrosiva por lo que también se agregará un inhibidor de corrosión para proteger los elementos que forman parte del sistema de distribución.

## 8.6. Bomba previa al postratamiento

Para evitar que se produzca la cavitación cuando se realice el proceso de postratamiento se usará una bomba facilitada por el fabricante Lowara cuyo modelo es NSCF 100-315/110/P45VCC4, tendrá un rendimiento de 78,9% y un consumo de 11 kW.

## 8.7. Sistema de distribución

Para la distribución del agua producto se decidió instalar el depósito a una mayor cota que el resto de la zona, con el fin de facilitar el transporte del agua a los invernaderos o a otros depósitos de la zona mediante trasvase por gravedad. Para elevar el agua hasta dicho depósito se hará uso de la bomba NSCF 80-160/220/W25RCC4 facilitada por el fabricante Lowara, cuyo rendimiento es del 80% y su consumo es de 22 kW. El flujo de permeado irá través de un sistema de tuberías de 1600 metros fabricadas de PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio). El proveedor de dichas tuberías será Flowtite y tendrán un diámetro de 250mm.

## 8.8. Depósito de regulación y de cabecera

El depósito de regulación se ha ubicado en las propias instalaciones de la EDAM para almacenar el permeado una vez ha salido de la etapa de postratamiento, su capacidad será de 1850 m<sup>3</sup>. El de cabecera se ha emplazado en la zona designada en el apartado 7.5.4 y se impuso una capacidad de 3000 m<sup>3</sup> la cual está sujeta a cambios

debido a las condiciones que se puedan par con respecto al almacenamiento del excedente de la planta.

## **8.9. Rechazo de salmuera**

La salmuera se verterá al mar mediante un emisario submarino situado a 50 metros de profundidad, 60 metros teniendo en cuenta la cota del lugar de emplazamiento de la EDAM y a una distancia de 950 metros. No será necesaria la utilización de una bomba ya que la diferencia de cota posibilita el trasvase por gravedad. Las tuberías estarán fabricadas de PRFV y tendrán un diámetro de 300mm puesto que se usa los diámetros comerciales facilitados por el fabricante Flowtite, seleccionado para todos los sistemas de tuberías de la instalación.

## **8.10. Alternativas de gestión de la salmuera y solución adoptada**

Aunque en un primer momento no se decide implantar este tipo de tecnologías, si se diera el caso se define cual sería la opción más factible para la EDAM, se estudiaron las siguientes alternativas:

- Tratamiento de salmuera mediante un sistema de vertido cero.
- Inyección profunda.
- Balsas de evaporación.
- Uso de salmuera para producir zumos concentrados.

Una vez analizadas cada una de las opciones se llega a la conclusión de que el sistema de vertido cero sería el más idónea para la EDAM, dejando a un lado su viabilidad económica y periodo de amortización ya que se desconoce su costo. Esta alternativa está por encima de las demás porque permite revalorizar la totalidad del flujo de salmuera además de obtener agua de alta calidad, lo que implica que no exista vertido alguno de residuos al mar, reduciendo a cero su impacto ambiental.

## **8.11. Sistema de abastecimiento de la EDAM**

La demanda de energía que requiere la EDAM será cubierta mediante la instalación de dos aerogeneradores y la red de distribución eléctrica. Se hará uso del modelo U57 de 750 kW de la empresa Unison. La combinación de ambos

aerogeneradores consigue generar 4482600 kWh/año pero como se realiza una parada de la planta de un mes, su producción será algo menor. En el caso de que se consiguiera esa producción, una vez cubierta la demanda de la EDAM de 4120224 kWh/año habría un exceso del 8,8 %.

### **8.12. Sistema de aprovechamiento de energía.**

Principalmente no ha seleccionado un sistema de aprovechamiento concreto debido a que son sistemas que pueden encarecer en gran medida los costes de la instalación y es difícil saber si su implantación podría ser rentable con el transcurso del tiempo dado que se desconoce el coste total de la planta ya que se trata de un proyecto no ejecutable.

A pesar de ello se han propuesto diversos métodos que podrían utilizarse en EDAM bajo estudio para tratar el excedente de energía.

- Bombeo hidráulico.
- Aire comprimido.
- Almacenamiento de energía mediante hidrógeno.

## 9. Conclusiones

Tal y como aparece en el apartado de Objeto de este documento, este proyecto tiene como objetivo el diseño y dimensionado de los equipos que conforman un sistema de desalación de agua marina mediante ósmosis inversa. Además se incluyen los equipos que aprovechan el recurso eólico destinados a la generación de energía que demanda la planta. Se puede observar que existe una correlación entre el ámbito académico y el técnico, más concretamente entre los procesos y equipos que definen las tecnologías en las que se basa el estudio.

En referencia al ámbito académico, la realización de este proyecto ha permitido la demostración de las competencias y conocimientos adquiridos a lo largo del periodo cursado en el Grado de Ingeniería Mecánica, de forma más específica, los obtenidos de las asignaturas de “Ingeniería Fluidomecánica”, “Instalaciones y Máquinas Hidráulicas” y “Oficina Técnica y Proyectos”. También hay que considerar que, aunque el proyecto no es ejecutable y haya aspectos de éste que no se han trabajado con la profundidad esperada debido a la falta de medios disponibles para su realización, la redacción de la totalidad del documento técnico permite una experiencia bastante aproximada a la que tendría un ingeniero técnico que desarrollara un trabajo como proyectista. Esto se debe a que el desarrollo de un proyecto como es el que se está tratando requiere de un alto nivel de exigencia a la hora de buscar y sintetizar la información, de plantear diversas soluciones y de realizar de manera correcta y lógica el proceso de toma de decisiones con el fin de seleccionar la solución que mejor se adapte a la situación propuesta siempre respetando las premisas impuestas por el peticionario del proyecto.

Con relación al apartado técnico del proyecto, su realización se debe a la necesidad de integrar el proceso de desalación y el uso de energías renovables para reducir el uso de recursos hídricos convencionales a nivel mundial. El estudio se ha centrado en las Islas Canarias, donde el estado de dichos recursos comienza a ser bastante preocupante debido al gran aumento de la demanda y a la imposibilidad de renovación del principal recurso utilizado, el agua subterránea.

Esto conlleva que la tecnología de desalación mediante ósmosis inversa sea actualmente la solución principal para hacer frente a la demanda acaecida. Aun así, el

mayor problema a la hora de su aplicación real es el consumo energético, debido a que el archipiélago se abastece de energías no renovables, por lo que no se propicia un ambiente sostenible.

No obstante, esta tecnología se encuentra en proceso de desarrollo. Esto implica que favorecer su uso en el tiempo, permitirá encontrar modos más eficientes para obtener un permeado de buena calidad, lo cual se traduce en una reducción de costes y consumo de los equipos que conforman parte del proceso.

Un aspecto vital puede ser el uso de otras tecnologías para conseguir abastecer el consumo que presenta el proceso de desalación, como puede ser la utilización de sistemas de aprovechamiento de recursos renovables. Entre ellos destaca el eólico, que permite la transformación de energía mediante el uso de aerogeneradores capaces de autoabastecerse por completo, dejando atrás la dependencia a los combustibles fósiles. Se podrían incluir, además, otras tecnologías capaces de aprovechar el excedente de energía, como por ejemplo, la producción de hidrógeno, que supondría una mejora en la sostenibilidad del proceso en su totalidad.

Puede concluirse así, que la combinación del proceso de desalación mediante ósmosis inversa y el uso de las energías renovables, es una solución viable y plausible para la producción de agua mediante el uso de recursos naturales abundantes en la superficie terrestre como lo es el agua marina.

Se trata, pues, de una posibilidad para reducir el impacto ambiental futuro, ya que el archipiélago cuenta con una gran extensión de agua de mar disponible y es un entorno propicio para las energías renovables, teniendo zonas con alto recurso eólico.

## 9.1 Conclusions

As referred in the abstract of this document, the purpose of the project is the designment and the measurement of the hardware, which conform the desalination of seawater by inverse osmosis system. Furthermore, it includes those hardware's that use wind resources with the purpose of generating the energy required by the desalination station. The correlation between the academics and technical areas could be appreciated, specifically in the processes and hardware that defined the technologies used in this study.

Referencing the academical field, the realization of this project has allowed the demonstration of the competences and knowledge acquired throughout the time spent in the Mechanical Engineering Degree, specifically highlighting the learnings in subjects as "Ingeniería Fluidomecánica", "Instalaciones y Máquinas Hidráulicas" and "Oficina Técnica y Proyectos". There is also to consider that, although the project is not executable and there are issues that has not been worked in depth due to the lack of available resources for its realization, the composition of the entire technical document permits an experience, which does not differ much from the work of a technical engineer as project executor. The reason behind this fact is that the development of a project like the one with are dealing with is highly demanding in terms of searching and summarizing the information, evaluating diverse solutions and executing in a logical way the process of decision making with the purpose of selecting the solution that fits the most the situation that been set out, always having in mind the requirements imposed by the project petitioner.

Regarding the technical aspects of the project, the realization is due to the requirements of integrating desalination process and the use of renewable energies to reduce the use of hydrological resources in a global scale. The study is focus in The Canary Islands, where the actual state of water resources starts to be concerning of account of the rampant increase of the demand and the impossibility of renewing the main resource used, the underground water.

This leads to the desalination technology through inverse osmosis to be the primary solution to face the aforementioned demand. Nevertheless, the principal issue in terms of its real implementation is the energetic consumption, this being the result of the lack of renewable energies in the archipelago, resulting in a non-sustainable environment.

However, the technology is still in development stages. This implies that favoring its use throughout time will allow to find more efficient ways to obtain a good (better) quality of the produced water, which results in a reduction of costs and higher consumption of the hardware that make up the process

A fundamental aspect may be the use of other technologies to reach the levels of consumption that the desalination process represents, like the use of systems that exploit renewable resources. Wind resources play a big role, allowing the transformation of energy with wind turbines, capable of fully being self-sufficient, leaving behind the need of fossil fuels. Other technologies may be included, capable of making up for the surplus, such as hydrogen production, which may imply an improvement in the sustainability of the whole process.

It must therefore be concluded that the combination of the desalination process through inverse osmosis and the use of renewable energies is a feasible and viable solution for the production of water taking advantage of abundant natural resources in the Earth surface, like seawater.

It is a possibility of reducing future environmental impacts, keeping in mind the vast extension of seawater available in the archipelago and being this a propitious setting for renewable energies, having areas with plentiful of wind resources.

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

Grado en Ingeniería Mecánica

# **ANEXO I**

## **DIMENSIONADO DEL NÚCLEO DE MEMBRANAS**

**AUTOR:** Víctor Pérez Santana

**TUTOR:** Vicente José Romero Ternero







## ÍNDICE

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Datos de partida .....</b>	<b>1</b>
2.1. Composición del agua de mar .....	1
2.2. Temperatura del agua de alimentación.....	2
2.3. Composición del agua producto.....	4
<b>3. Selección de las membranas de ósmosis inversa.....</b>	<b>4</b>
<b>4. Dimensionado del núcleo de membranas.....</b>	<b>5</b>
4.1. Selección del modelo del núcleo de membranas .....	6
4.2. Configuraciones estudiadas y solución adoptada. ....	8
<b>5. Calidad de permeado obtenida .....</b>	<b>11</b>

## *Índice de figuras*

Figura 1. Interfaz del programa TorayDS2 que permite introducir la composición del agua de alimentación (Fuente: TorayDS2) .....	6
Figura 2. Selección de las membranas y configuración de los tubos de presión (Fuente: Toray Industries).....	8
Figura 3. Composición final del agua producto (Fuente: Toray Industries) .....	11
Figura 4. Valores habituales para el agua de regadío (Fuente: José Miguel Veza).....	12

## *Índice de tablas*

Tabla 1: Composición química del agua de mar (Fuente: Elaboración propia. Desaladora de Santa Cruz de Tenerife) .....	2
Tabla 2. Características físico-químicas (Fuente: Elaboración propia. Desaladora de Santa Cruz de Tenerife) .....	2
Tabla 3. Valores máximos y mínimos de temperatura según mes (Fuente: Elaboración propia. Puertos del Estado) .....	3
Tabla 4. Composición agua producto (Fuente: Elaboración propia. Dpto. Producción Agraria. Área Edafología y Química Agrícola. Universidad Politécnica de Cartagena) ....	4
Tabla 5. Modelos de la serie TM800V (Fuente: Elaboración propia. Toray Industries)....	7
Tabla 6. Configuraciones estudiadas imponiendo 6 elementos por tubo de presión (Fuente: Elaboración propia).....	9
Tabla 7. Configuraciones estudiadas imponiendo 7 elementos por tubo de presión (Fuente: Elaboración Propia).....	9
Tabla 8. Número total de tubos de presión y membranas por configuración (Fuente: Elaboración propia) .....	9



## 1. Introducción

En el presente anexo se va a plasmar de manera muy detallada el proceso desarrollado para dimensionar el sistema de ósmosis inversa requerido por la planta. Desde la imposición de las consideraciones previas hasta el procedimiento de cálculo del núcleo de membranas y la justificación de la elección de este.

En primer lugar, se tienen que imponer las condiciones que presenta el agua que se va a desalar y las condiciones futuras que tiene que tener la misma para el uso que se le va a dar. En este caso dependerá de la capacidad de los cultivos de soportar las distintas concentraciones de elementos químicos que presentará el agua producto.

Una vez hecho esto se seleccionará el fabricante de membranas, en este caso Toray Industries, y mediante el software que facilitan se dimensionará el núcleo de membranas más idóneo. Se estudiarán varias configuraciones con el fin de seleccionar la más idónea.

## 2. Datos de partida

### 2.1. Composición del agua de mar

Para el dimensionado de la desaladora de la cual se está realizando el estudio, se requiere el análisis de composición del agua de alimentación. Este mismo ha sido facilitado por la empresa que se encarga de la Desaladora de Santa Cruz de Tenerife.

Composición del agua	
Iones	Mg/L
Calcio	431
Magnesio	1470
Potasio	451
Sílice	1,1
Sodio	11870
Bromo	0,5
Bicarbonatos	141,5
Cloruros	21280

Fluoruros	0,862
Nitratos	0,7
Sulfatos	3148
Bario	0,017
Boro	5,23
Cobalto	0,002
Cobre	0,002
Cromo total	0,006
Estroncio	10
Hierro total	0,025
Manganeso	0,003

*Tabla 1: Composición química del agua de mar (Fuente: Elaboración propia. Desaladora de Santa Cruz de Tenerife)*

También se incluyen las características físico-químicas que influyen en el dimensionado de la instalación.

<b>Conductividad a 25°C (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>	54767
<b>pH</b>	8
<b>Sólidos en suspensión (mg/L)</b>	4

*Tabla 2: Características físico-químicas (Fuente: Elaboración propia. Desaladora de Santa Cruz de Tenerife)*

## 2.2. Temperatura del agua de alimentación

Para el dimensionado del núcleo también se requiere la temperatura ya que influye de manera significativa en algunos parámetros de la instalación. El valor de temperatura más idóneo sería el que presenta el agua en la localización donde se va a instalar la desaladora, para ello se tendría que realizar un estudio previo del agua, elemento que no incluye este proyecto. Para obtener valores de temperatura que no disten mucho del valor óptimo para el dimensionado se han utilizado los datos obtenidos por la boya de Puertos del Estado que brinda los valores máximos y mínimos de cada mes en el periodo de 1998-2018. Dicha boya se encuentra situada al sur de la isla de Tenerife, en una zona bastante próxima al emplazamiento de la desaladora.

Boya de Tenerife Sur 1998-2018				
Mes	Ts Mín. (°C)	Año	Ts Máx. (°C)	Año
Enero	18,2	2009	21,6	2011
Febrero	17,9	2012	21,2	2010
Marzo	17,8	2018	21,3	2010
Abril	18,3	2009	22,4	2016
Mayo	18,8	2009	23,3	2017
Junio	19,3	2018	23,9	2009
Julio	20,2	2013	24,5	2017
Agosto	21,2	2001	25,3	2004
Septiembre	21,9	2002	28,7	2014
Octubre	22,2	2012	25,7	2015
Noviembre	21,1	2008	24,6	2015
Diciembre	18,9	2008	23,0	2017

*Tabla 3: Valores máximos y mínimos de temperatura según mes (Fuente: Elaboración propia. Puertos del Estado)*

Conocidos los valores máximos y mínimos de cada mes se puede calcular la media que presenta la temperatura durante todo el año. La temperatura mínima media es de 19,65°C, mientras que la temperatura máxima media es de 23,79 °C, por lo que la temperatura media es de 21,72 °C.

Se puede observar que la temperatura varía en un intervalo aproximado entre los 18 °C y 24 °C, esto se debe principalmente a que estos valores hacen referencia a la temperatura superficial del agua la cual se ve afectada en mayor medida por las condiciones climáticas. Así pues teniendo en cuenta estos aspectos se ha decidido tomar como valor de temperatura de estudio 19 °C. La justificación de la utilización de dicho valor es la siguiente:

Como se comentó previamente en el estudio la alimentación de la desaladora se realizará mediante pozos de captación lo que conlleva que el agua tendrá una temperatura más baja que la superficial además de que será un valor más estable.

Desde el punto de vista energético cuanto menor sea la temperatura mayor será el valor de la presión debido al aumento de la viscosidad que se traduce en aumento del consumo específico. Esto implica que el dimensionado se realizará en la situación más desfavorable que puede presentar el proceso.

### 2.3. Composición del agua producto

Con relación a las características que debe presentar el agua una vez se ha realizado el proceso como no existe un reglamento que especifique los valores exactos se tendrá en cuenta que componentes del agua regadío afectan a la calidad del cultivo. Los factores más condicionantes son el boro y la cantidad total de sólidos disueltos (TDS), siendo más restrictivo el boro ya que los tomates son más sensibles a este elemento. Así pues, los valores recomendados son los siguientes:

Contenido de boro (mg/l)	< 2,1
TDS (mg/l)	1040 - 3200

*Tabla 4: Composición agua producto (Fuente: Elaboración propia. Dpto. Producción Agraria. Área Edafología y Química Agrícola. Universidad Politécnica de Cartagena)*

## 3. Selección de las membranas de ósmosis inversa

Como se comentó anteriormente se utilizarán membranas de la marca Toray Industries. Dicha marca ofrece los siguientes modelos de membranas destinados a agua de mar:

- Standard SWRO: serie TM 800C Y TM800M.
- High Flow SWRO: serie TM800E y TM800R.
- Low energy SWRO: serie TM800V.
- Highest rejection SWRO: serie TM800K.

La serie TM800C está destinada a trabajar con valores de presión no muy altos aportando a su vez un alto rechazo. Mientras que la TM800M permite trabajar con grandes presiones y brinda un alto rechazo.

Tanto la serie TM800E y TM800R se utilizan en casos donde se requiera producir un alto caudal de permeado manteniendo un valor de rechazo óptimo.

La serie TM800V posibilita una reducción del consumo específico garantizando un rechazo aceptable.

Y por último la serie TM800K cuyos modelos tienen la tasa de rechazo más alta de todas las que brinda el fabricante, aunque su único inconveniente es que sus caudales son algo más bajos que el resto de las series.

Una vez comentadas las características de cada modelo en el presente proyecto se realizará en un primer momento un dimensionado con la serie TM800V con el fin de reducir los costes de producción que va a tener en un futuro la planta. En dicho dimensionado se tendrá en cuenta las condiciones previamente impuestas y se estudiará si las condiciones finales obtenidas son adecuadas.

#### 4. Dimensionado del núcleo de membranas

Una vez se han impuesto los parámetros requeridos para el dimensionado se introducen los valores en el software de cálculo, TorayDS2.

En primer lugar, se establecen las unidades con las que se va a trabajar y seguidamente se fijan los datos de alimentación. El tipo de agua se establece como “Toma de pozo” ya que fue la opción elegida para la instalación. Se añaden los elementos referentes a la composición química, así como la temperatura.

The screenshot displays the TorayDS2 software interface for membrane system design. It is divided into several sections:

- Información sobre corriente:**
  - Tipo de agua: Toma de Pozo
  - Número de corrientes de ali.: 1
  - Corriente de la alimentación: 1
  - Porcentaje de la corriente en la: 100 %
- Parámetros de alimentación:**
  - Temperatura: 19 deg C
  - Caudal: 8222.22m3/day
  - pH: 7.00
  - TDS: 38810.288
  - Est nos: 55.667
- Balance:**
  - % Excess Cation: 0.142 %
  - Buttons: Carga / Revisión Análisis, Balance con NaCl, Equilibrar con MgSO4, AutoBalance (checked).
- datos de solubilidad:**

Especies	% Saturación en Alimentación	Conc.
CaSO4	24.42	% of Max solubilidad
BaSO4	69.97	% of Max solubilidad
SrSO4	19	% of Max solubilidad
PO4	0	% of Max solubilidad
SiO2	1.0	% of Max solubilidad
CaF2	0.7	% of Max solubilidad
- Iones:**
  - Cationes:**

Iones	mg/l	mEq / L	ppm de CaCO3
Ca	431.00	21.5070	1076.32
Mg	1470.00	120.9628	6053.58
Na	11870.00	516.3159	25839.03
K	451.00	11.5351	577.27
Ba	0.0170	0.0002	0.01
Sr	10.0000	0.2283	11.42
NH4			
Fe	0.03	0.0011	0.05
<b>Totales</b>	<b>14232.0470</b>	<b>670.5504</b>	<b>33557.6937</b>
  - Aniones:**

Iones	mg/l	mEq / L	ppm de CaCO3
HCO3	141.50	2.3190	116.06
CL	21280.00	600.2313	30038.58
SO4	3148.00	65.5413	3280.01
NO3	0.70	0.0113	0.56
F	0.86	0.0453	2.27
Br	0.50	0.0063	0.31
B	5.23	0.4838	24.21
SiO2	1.10	0.0183	0.92
PO4			
CO3	0.35	0.0117	0.59
CO2	16.30	0.3703	18.53
<b>Totales</b>	<b>24578.2408</b>	<b>668.6499</b>	<b>33462.5819</b>

*Figura 1: Interfaz del programa TorayDS2 que permite introducir la composición del agua de alimentación (Fuente: TorayDS2)*

En el siguiente paso se realiza la introducción del caudal de permeado que requiere la planta, en el presente proyecto es de 3700 m<sup>3</sup>/día y el factor de conversión del 45% ya que es el valor que suelen presentar las plantas de desalación de tamaños similares a la de estudio, e incluso la bibliografía recomienda el uso de dicha conversión gracias al equilibrio de costes y consumo que esta brinda, y una única etapa, dado que como se hace uso de unas membranas que sacrifican calidad de permeado por reducción de consumo, el imponer una única etapa permite obtener un permeado de mayor calidad equilibrando la tasa de rechazo del proceso.

La edad de las membranas se establece en 3 años ya que es el valor que recomienda el propio fabricante para un funcionamiento óptimo de las mismas.

Por otro lado, el factor de ensuciamiento se puede introducir de manera manual teniendo en cuenta la edad y el deterioro tanto del caudal como del rechazo de sales durante su funcionamiento. El software es capaz de imponer este valor en función del tipo de agua de alimentación por lo que lo realizará de forma automática.

Por último, se definirá el aumento del paso de sale al año que depende del material del que estén compuestas las membranas. En el caso de membranas de poliamida el rango de aumento anual varía entre el 5 y 15%, el fabricante recomienda establecer dicho valor entorno al 7%.

#### **4.1. Selección del modelo del núcleo de membranas**

Una vez definidos los parámetros de las membranas se pasa a seleccionar el modelo de membrana. Como se explicó anteriormente se hará uso de la serie TM800V que cuenta con tres modelos:

Modelo	Diámetro (inch)	Área de membrana (ft <sup>2</sup> )	Flujo medio de permeado (m <sup>3</sup> /día)
TM810V	4	87	7,2
TM820V-400	8	400	34,1
TM820V-440	8	440	37,5

*Tabla 5: Modelos de la serie TM800V (Fuente: Elaboración propia. Toray Industries)*

Únicamente se realizará el dimensionado de los núcleos de membranas que presenta un diámetro superior a ocho pulgadas ya que si se observa el modelo TM8010V se puede destacar que presenta un flujo medio de permeado bastante pequeño en comparación con el resto de las modelos, lo que supondría la instalación de un gran número de núcleos para satisfacer las necesidades de la planta.

Los modelos restantes presentan las mismas condiciones de operación únicamente se diferencian en el área que los propios núcleos presentan y el flujo medio de permeado que son capaces de producir. Como el fabricante no facilita los precios que presentan ambos núcleos en el mercado no se puede saber si el modelo TM820V-440 al tener más área de membrana supondrá un mayor costo que el otro modelo.

Con relación a la configuración de los tubos de presión se estudian los casos de 6 y 7 membranas por tubo y el número de tubos se ajusta en función de las condiciones de operación y del agua producto obtenida. Hay que destacar que el software que brinda el fabricante facilita muy poca información para realizar un primer dimensionado de los tubos por lo que mediante las hojas de identificación de los núcleos se establecen las condiciones de operación que brindan un funcionamiento óptimo de las mismas así como los valores de operación límites que son capaces de soportar.

- ❖ Presión máxima de operación: 83 bar.
- ❖ Temperatura máxima del agua de alimentación: 45°C.
- ❖ SDI máximo del agua de alimentación: 5.
- ❖ pH: 2-11.
- ❖ Pérdida de presión máxima por elemento: 10 bar.
- ❖ Pérdida de presión máxima por tubo: 34 bar.

En la siguiente figura se observa que en dicha pestaña se imponen los valores previamente comentados. Se indica las etapas y el total de estas, los elementos que se encuentran dentro de los tubos de presi3n y el ńmero que se va a instalar. Aś como la edad, el factor de ensuciamiento (impuesto por el software, y el aumento del paso de sales por ańo. Este procedimiento se repite para cada una de las configuraciones que se vaya a realizar.

seleccionar

Pasar: 1 Total de etapas: 1 Etapa actual: 1 Elementos Totales en E 266

Cajas de presi3n p... 38 Elementos por caja d... 7  Todos los elementos iguales  Todas las etapas de la misma

TM820V-440, SWRO 24,64 TM820V-440, SWRO 20,71 TM820V-440, SWRO 16,93 TM820V-440, SWRO 13,34 TM820V-440, SWRO 10,21 TM820V-440, SWRO 7,68 TM820V-440, SWRO 5,73

Informaci3n del Elemento

Low pressure SWRO element, high area

Elemento Edad: 3,00 Ańos Tipo de elemento: TM820V-440, SWRO

factor de ensuciam... 0,880 aumento del paso de s... 7,00 % anual 22.50%

tipo	TM820V-440, SWRO	Presi3n bar	Caudal m3/day
Diámetro, pulg...	Recuperaci3n...	Area	Rechazo sale...
8,000	8,000	40,88	99,8
			Caudal de Per...
			37,47
Presi3n ḿxima	Presi3n de Test	TDS de test	Grosor del espaciador
83,00	55,20	32000	28 mil

Factor de reajuste del FF y el SPT a los valores predefinidos segun la edad del tipo de agua  edad determina ensuciam  ¿Edad misma? Ver Diagrama de Flujo Ver Etapa

Result: Case 1, Rev 0, Feed:8222,2, Prod:3699,9 m3/day, TDS:231,8, 19,0 deg C, 266Elementos, 707,09 KW

Errores:  
Advertencias:

Figura 2: Selecci3n de las membranas y configuraci3n de los tubos de presi3n (Fuente: Toray Industries)

Cabe destacar que el dimensionado se realiza teniendo en cuenta el sistema de recuperaci3n de enerǵa. El cual permite reducir el consumo espećfico del proceso de desalaci3n. Se haŕa uso de intercambiadores de presi3n (si se desea conocer en mayor profundidad este equipo se puede consultar su dimensionado en el Anexo II). Como en un primer momento no se conocen sus parámetros de operaci3n, se utilizarán los recomendados por el software, y adeḿs se impondrá un rendimiento de la bomba de alta presi3n de 100%.

Tambi3n se tendŕa en cuenta que la presi3n de salida del permeado es de 0 bar.

## 4.2. Configuraciones estudiadas y solución adoptada.

### Configuración con 6 elementos por tubo de presión:

Modelo	N.º de tubos de presión	Presión de alimentación (bar)	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )	TDS (mg/l)	Boro (mg/l)
TM820V-400	46	60,31	1,814	221,1	1,122
TM820V-440	42	60,08	1,806	231,3	1,160

*Tabla 6: Configuraciones estudiadas imponiendo 6 elementos por tubo de presión (Fuente: Elaboración propia)*

### Configuración con 7 elementos por tubo de presión:

Modelo	N.º de tubos de presión	Presión de alimentación (bar)	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )	TDS (mg/l)	Boro (mg/l)
TM820V-400	41	59,73	1,795	221,5	1,122
TM820V-440	38	58,95	1,769	240,6	1,19

*Tabla 7: Configuraciones estudiadas imponiendo 7 elementos por tubo de presión (Fuente: Elaboración Propia)*

### Número total de tubos de presión y membranas para cada configuración y modelo:

Modelo	N.º de tubos de presión (6 membranas)	Total membranas	N.º de tubos de presión (7 membranas)	Total membranas
TM820V-400	46	276	41	287
TM820V-440	42	252	38	266

*Tabla 8: Número total de tubos de presión y membranas por configuración (Fuente: Elaboración propia)*

Observando los resultados obtenidos se puede concluir que ninguna de las configuraciones propuestas sobrepasa los límites establecidos para el agua producto por

lo que todas serían aptas para su instalación. No obstante, se elegirá la configuración óptima para la situación de trabajo teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Menor número de tubo de presión y membranas teniendo en cuenta la presión de alimentación obtenida así como la calidad del permeado. Con el fin de reducir los costes de inversión iniciales y los de mantenimiento a lo largo de los años, además de que al tener un menor número de tubos la altura de los bastidores disminuye lo que facilita las labores de mantenimiento.
- Se busca la configuración que presente un menor consumo específico para la instalación con el fin de que se de en menor medida situaciones donde se tenga que aportar energía eléctrica de la red para asegurar el funcionamiento de la planta debido a posibles discontinuidades en la producción de los aerogeneradores.

Finalmente después de haberse estudiado los parámetros previamente comentados y los aspectos impuestos se decidió que el modelo TM820V-440 con una configuración de **38 tubos de presión** y **7 membranas del mismo tipo** en su interior era el dimensionado que mejor se adaptaba a las necesidades de la planta de desalación. Esto se debe principalmente a:

- De todas las configuraciones propuestas es la que presenta un menor número de tubos de presión.
- En relación con el total de membranas, se comentó previamente que el fabricante no facilita el precio de las membranas, lo que dificulta saber si es más factible colocar un mayor número de membranas del modelo TM820V-400 o no. No obstante, la configuración elegida presenta tanto un menor número de tubos de presión como de membranas lo que puede disminuir los costes de instalación y mantenimiento de los bastidores de ósmosis. Además al requerirse una menor presión de alimentación el consumo propio de la instalación disminuirá. Y destacar que el consumo específico que presenta está por debajo del resto de configuraciones.
- La calidad del permeado no presenta grandes variaciones en las distintas configuraciones aunque la elegida es la más desfavorable. Sin embargo se encuentra muy por debajo de los límites establecidos para el agua producto.

## 5. Calidad de permeado obtenida

El software aparte de mostrarnos los datos de operación de núcleo de desalación, también facilitada la composición química del permeado obtenido del proceso.

Iones		Conc.	Producto
Ca	mg/L	782,9	0,800
Mg	mg/L	2.670	2,729
Na	mg/L	21.514	84,67
K	mg/L	816,3	4,498
Ba	mg/L	0.0309	3,16E-05
Sr	mg/L	18,166	0,0186
NH4	mg/L	0,0	0,0
Fe	mg/L	0,0545	0,0
HCO3	mg/L	256,5	1,520
CO3	mg/L	0,834	1,48E-05
CO2	mg/L	16,171	16,547
CL	mg/L	38,702	138,6
SO4	mg/L	5,718	6,513
NO3	mg/L	1,266	0,0079
F	mg/L	1,556	0,0097
Br	mg/L	0,906	0,0032
PO4	mg/L	0,0	0,0
SiO2	mg/L	1,994	0,0077
B (Boro)	mg/L	8,556	1,190
TDS	mg/L	70,493	240,6
Alimentar EC @25C / @19,00C	uS	90,718 / 79,315	500,9 / 432,2
pH	pH	7,232	5,150
Presión osmótica (DS1 / Pitzer)	bar	50,178 / 51,42	0,194 / 0,20

*Figura 3: Composición final del agua producto (Fuente: Toray Industries)*

Para reafirmar que la calidad del flujo de permeado es la correcta para el uso que se la va a dar, se comprobará que otros elementos de dicho flujo se encuentra dentro de los rangos recomendado por la bibliografía. Y mediante la siguiente figura se verifica que los valores obtenidos gracias a la configuración y modelo elegida se encuentran dentro de los rangos recomendados. Únicamente habría que destacar que el pH se encuentra por debajo del valor recomendado por lo que se tendría que imponer un post tratamiento con el fin del regular su valor y ajustarlo dentro del rango admisible por los cultivos.

	Parámetros de calidad	Símbolo	Unidad	Intervalo usual en agua de riego
1	Salinidad			
	Contenido de sales			
	Conductividad eléctrica	CEa CEa	$\mu\text{S}/\text{cm}$ $\text{dS}/\text{cm}$	0 – 3000 0 – 3
	Materia disuelta total	MDT	mg/L	0 – 2000
	Cationes y aniones			
	Calcio	Ca <sup>++</sup>	mg/L	0 – 400
	Magnesio	Mg <sup>++</sup>	mg/L	0 – 60
	Sodio	Na <sup>+</sup>	mg/L	0 – 900
	Carbonatos	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	mg/L	0 – 3
	Bicarbonatos	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0 – 600
	Cloruros	Cl <sup>-</sup>	mg/L	0 – 1100
	Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	mg/L	0 – 1000
2	Diversos			
	Boro	B	mg/L	0 – 2
	pH	pH	--	6,5 – 8,5
	Tasa de absorción de sodio	TAS, SAR	--	0 – 15

Figura 4: Valores habituales para el agua de regadío (Fuente: José Miguel Veza)

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

Grado en Ingeniería Mecánica

## **ANEXO II**

**DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE  
RECUPERACIÓN DE ENERGÍA Y  
DE BOMBAS. ALTERNATIVAS DE  
GESTIÓN DE LA SALMUERA**

**AUTOR:** Víctor Pérez Santana

**TUTOR:** Vicente José Romero Ternero





## ÍNDICE

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Primer dimensionado del sistema de recuperación de energía 1</b>	
<b>3. Dimensionado del sistema de captación .....</b>	<b>7</b>
3.1. Captación del agua de mar .....	7
3.2. Pozos de captación .....	8
3.3 Diámetros de las tuberías .....	11
3.4. Cálculo de las pérdidas de carga .....	14
3.4.1. Pérdidas de carga en las tuberías .....	14
3.4.2. Pérdidas de carga debidas a los accesorios de las tuberías.....	18
<b>4. Dimensionado del sistema de distribución.....</b>	<b>20</b>
4.1 Localización del depósito y red de tuberías .....	20
4.2. Depósito de regulación y cabecera .....	21
4.3. Diámetro de las tuberías de distribución.....	22
4.4. Cálculo de las pérdidas de carga .....	23
<b>5.Dimensionado del sistema de rechazo de salmuera .....</b>	<b>25</b>
5.1. Longitud y altura de la tubería de rechazo .....	25
5.2. Diámetro de la tubería de rechazo.....	26
5.3 Cálculo de las pérdidas de carga .....	27
5.3.1. Pérdidas de carga en las tuberías .....	27
5.3.2. Cálculo de las pérdidas de carga secundarias.....	28
5.3.3. Pérdidas de carga totales.....	29
<b>6. Dimensionado del pretratamiento.....</b>	<b>29</b>
6.1. Pretratamiento físico.....	29
6.2. Pretratamiento químico .....	30
<b>7. Dimensionado del postratamiento .....</b>	<b>31</b>
<b>8. Proceso de dimensionado de bombas.....</b>	<b>32</b>

---

8.1. Altura manométrica de la bomba .....	32
8.2. Cavitación .....	33
8.3. Dimensionado de la bomba booster .....	33
8.4. Dimensionado de la bomba de alta presión (BAP).....	42
8.5. Dimensionado de la bomba de captación.....	49
8.6. Dimensionado de la bomba previa al postratamiento .....	53
8.7. Dimensionado de la bomba de distribución .....	59
8.8. Dimensionado y selección de la bomba de rechazo .....	64
<b>9. Segundo dimensionado del sistema de recuperación de energía .....</b>	<b>65</b>
<b>10. Consumo específico de la planta .....</b>	<b>68</b>
10.1. Comparativa de los consumos específicos obtenidos referentes al núcleo de desalación.....	69
<b>11. Consumo anual de la planta.....</b>	<b>71</b>
<b>12. Alternativas de gestión de la salmuera .....</b>	<b>71</b>
12.1. Tratamiento de salmuera mediante un sistema de vertido cero .....	71
12.2. Inyección profunda.....	73
12.3. Balsas de evaporación .....	73
12.4. Uso de la salmuera para producir zumos concentrados.....	74
12.5. Comparativa de alternativas y solución adoptada .....	74

## Índice de figuras

Figura 1: Interfaz de la hoja de cálculo del sistema de intercambiadores de presión (Fuente: Energy Recovery) .....	2
Figura 2: Intercambiador de presión PX-Q300 (Fuente: Energy Recovery) .....	3
Figura 3: Interfaz de resultados de la hoja de cálculo del sistema de intercambiadores de presión (Fuente: Energy Recovery) .....	4
Figura 4: Esquema de funcionamiento del sistema de desalación junto con el de recuperación de energía (Fuente: TorayDS2) .....	5
Figura 5: Interfaz de entrada de datos del sistema de recuperación de energía (Fuente: TorayDS2) .....	6
Figura 6: Consumo específico obtenido mediante la simulación del software de membranas (Fuente: TorayDS2).....	6
Figura 7: Disposición de los pozos con respecto a la EDAM (Fuente: Grafcan) .....	9
Figura 8: Esquema de estructuración de los pozos (Fuente: Elaboración propia).....	9
Figura 9: Diferencia de cota entre la costa y el emplazamiento de la EDAM (Fuente: Goolzoom) .....	10
Figura 10: Valores de bajamares en el puerto de Santa Cruz de Tenerife (Fuente: Puertos del Estado) .....	10
Figura 11: Diámetros comerciales de tuberías (Fuente: Flowtite).....	13
Figura 12: Recorrido de la tubería de distribución hasta el depósito de regulación (Fuente: Elaboración propia. Goolzoom) .....	21
Figura 13: Distancia y profundidad a la que se encuentra el emisario submarino (Fuente: Instituto Español de Oceanografía) .....	25
Figura 14: Interfaz de la herramienta de cálculo de la densidad (Fuente: Universidad de Michigan).....	34
Figura 15: Interfaz de la herramienta "KSB EasySelect" (Fuente: www.ksb.com) .....	36
Figura 16: Imagen del modelo MCPK150-125-315 del fabricante KSB (Fuente: www.ksb.com).....	36
Figura 17: Curvas características obtenidas para la bomba MCPK150-125-315 (Fuente: www.ksb.com).....	37

Figura 18: Interfaz del buscador "Grundfos Webcaps" (Fuente: <a href="http://www.product-selection.grundfos.com">www.product-selection.grundfos.com</a> ).....	38
Figura 19: Imagen del modelo NB 100-250/274 del fabricante Grundfos (Fuente: Grundfos Webcaps).....	38
Figura 20: Curvas características obtenidas para la bomba NB 100-250/274 (Fuente: Grundfos Webcaps).....	39
Figura 21: Interfaz del buscador "Xylect" (Fuente: <a href="http://www.xylect.com">www.xylect.com</a> ) .....	40
Figura 22: Imagen del modelo NSCF 125-250/110 del fabricante Lowara ( <a href="http://www.lenntech.com">www.lenntech.com</a> ).....	40
<i>Figura 23: Curvas características obtenidas para la bomba NSCF 125-250/110 (Fuente: <a href="http://www.xylect.com">www.xylect.com</a>) .....</i>	<i>41</i>
Figura 24: Curvas características obtenidas para la bomba Multitec RO A 100-8.1 (Fuente: <a href="http://www.ksb.com">www.ksb.com</a> ).....	44
Figura 25: Imagen del modelo Multitec RO A 100-8.1 del fabricante KSB (Fuente: <a href="http://www.ksb.com">www.ksb.com</a> ).....	45
Figura 26: Imagen del modelo MPAE 100A/10/BF3550 del fabricante Lowara (Fuente: <a href="http://www.xylect.com">www.xylect.com</a> ).....	45
Figura 27: Curvas características obtenidas para la bomba MPAE100A/10/BF3550/W25VDCC4 (Fuente: <a href="http://www.xylect.com">www.xylect.com</a> ).....	46
Figura 28: Curvas características obtenidas para la bomba 3X10DMX-F (Fuente: Affinity) .....	47
Figura 29: Imagen del modelo 3X10DMX-F del fabricante Flowserve (Fuente: <a href="http://www.flowserve.com">www.flowserve.com</a> ) .....	48
Figura 30: Curvas características obtenidas para la bomba UPA 250C-150 (Fuente: <a href="http://www.ksb.com">www.ksb.com</a> ).....	51
Figura 31: Imagen del modelo UPA 250C-150 del fabricante KSB (Fuente: <a href="http://www.ksb.com">www.ksb.com</a> ) .....	52
Figura 32: Curvas características obtenidas para la bomba Z10220 3/2B-L8W (Fuente: <a href="http://www.xylect.com">www.xylect.com</a> ).....	52
Figura 33: Imagen del modelo Z10220 3/2B-L8W del fabricante Lowara (Fuente: <a href="http://www.xylect.com">www.xylect.com</a> ).....	53

Figura 34: Imagen del modelo NB 100-250/274 EUP del fabricante Grundfos (Fuente: Grundfos Webcaps) .....	55
Figura 35: Curvas características obtenidas para la bomba NB 100-250/274 EUP (Fuente: Grundfos Webcaps) .....	56
Figura 36: Curvas características obtenidas para la bomba NSCF 100-315/110/ P45VCC4 (Fuente: www.xylect.com) .....	57
Figura 37: Imagen del modelo NSCF 100-315/110/P45VCC4 del fabricante Lowara (Fuente: www.xylect.com) .....	58
Figura 38: Curvas características obtenidas para la bomba Multitec A125/2-10.2.30.81 (Fuente: www.ksb.com) .....	60
Figura 39: Imagen del modelo Multitec A125/2-10.2.30.81 del fabricante KSB (Fuente: www.ksb.com) .....	61
Figura 40: Imagen del modelo NB 80-315/334 del fabricante Grundfos (Fuente: Grundfos Webcaps) .....	61
Figura 41: Curvas características obtenidas para la bomba NB 80-315/334 (Fuente: Grundfos Webcaps) .....	62
Figura 42: Curvas características obtenidas para la bomba NSCF 80-160/220/W25RCC4 (Fuente: www.xylect.com) .....	63
Figura 43: Imagen del modelo NSCF 80-160/220/W25RCC4 del fabricante Lowara (Fuente: www.xylect.com) .....	63
Figura 44: Rendimientos de las bombas en el primer dimensionado de los intercambiadores de presión (Fuente: Energy Recovery) .....	66
Figura 45: Rendimientos de las bombas en el segundo dimensionado de los intercambiadores de presión (Fuente: Energy Recovery) .....	66
Figura 46: Comparativa de resultados de la hoja de cálculo del intercambiador de presión (Fuente: Energy Recovery) .....	67
Figura 47: Interfaz de entrada de datos del intercambiador de presión en el software de membranas (Fuente: TorayDS2) .....	70
Figura 48: Consumo específico final obtenido mediante la simulación del software de membranas (Fuente: TorayDS2) .....	70

Figura 49: Productos que se pueden extraer de la salmuera y sus posibles aplicaciones  
(Fuente: Recuperación de enerǵa de la salmuera, Tesis Doctoral, Belén Gutírrez Ĺpez.  
Svensson, M (2005)) ..... 72

## Índice de tablas

Tabla 1: Datos de entrada del software (Fuente: Elaboración propia. TorayDS2).....	3
Tabla 2: Datos de interés para el dimensionado de bombas de la instalación (Fuente: Elaboración propia. Energy Recovery) .....	5
Tabla 3: Longitudes de tubería del sistema de captación (Fuente: Elaboración propia)11	
Tabla 4: Diámetros comerciales de las tuberías del sistema de captación (Fuente: Elaboración propia) .....	14
Tabla 5: Valores de viscosidad cinemática (Fuente: Elaboración propia. Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas).....	14
Tabla 6: Factores de fricción de la tubería de captación (Fuente: elaboración propia) 15	
Tabla 7: Factores de fricción del colector (Fuente: Elaboración propia) .....	16
Tabla 8: Datos necesarios para calcular las pérdidas de carga de la tubería de captación (Fuente: Elaboración propia).....	17
Tabla 9:: Datos necesarios para calcular las pérdidas de carga del colector (Fuente: Elaboración propia) .....	18
Tabla 10: Coeficientes de pérdida de los accesorios (Fuente: Elaboración propia. Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas) .....	19
Tabla 11: Pérdidas de carga totales del sistema de captación (Fuente: Elaboración propia) .....	20
Tabla 12: Factores de fricción de red de tuberías de distribución (Fuente: Elaboración propia) .....	24
Tabla 13: Pérdidas de carga totales del sistema de distribución (Fuente: Elaboración propia) .....	25
Tabla 14: Factores de fricción tubería de rechazo (Fuente: Elaboración propia).....	28
Tabla 15: Pérdidas de carga totales del sistema de rechazo (Fuente: Elaboración propia) .....	29
Tabla 16: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas booster (Fuente: Elaboración propia) .....	35
Tabla 17: Tabla resumen de los modelos de bomba booster (Fuente: Elaboración propia) .....	42
Tabla 18: Datos de la bomba booster seleccionada (Fuente: Elaboración propia) .....	42

Tabla 19: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de alta presión (Fuente: Elaboración propia).....	43
Tabla 20: Tabla resumen de los modelos de bomba de alta presión (Fuente: Elaboración propia) .....	48
Tabla 21: Datos de la bomba de alta presión seleccionada (Fuente: Elaboración propia) .....	49
Tabla 22: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de captación (Fuente: Elaboración propia).....	50
Tabla 23: Tabla resumen de los modelos de bomba de captación (Fuente: Elaboración propia) .....	53
Tabla 24: Datos de la bomba de captación (Fuente: Elaboración propia) .....	53
Tabla 25: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de pre-postratamiento (Fuente: Elaboración propia).....	54
Tabla 26:Tabla resumen de los modelos de bomba de pre-postratamiento (Fuente: Elaboración propia) .....	58
Tabla 27:Datos de la bomba de pre-postratamiento seleccionada (Fuente: Elaboración propia) .....	58
Tabla 28: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de distribución (Fuente: Elaboración propia).....	59
Tabla 29: Tabla resumen de los modelos de bomba de distribución (Fuente: Elaboración propia) .....	64
Tabla 30: Datos de la bomba de distribución seleccionada (Fuente: Elaboración propia) .....	64
Tabla 31: Variación de los valores de rendimiento en la hoja de cálculo del intercambiador de presión (Fuente: Elaboración propia).....	67
Tabla 32: Potencia de las distintas bombas de la instalación (Fuente: Elaboración propia) .....	68
Tabla 33: Consumo específico de cada bomba (Fuente: Elaboración propia) .....	69
Tabla 34: Consumo específico total de todos los sistemas de la instalación (Fuente: Elaboración propia) .....	69
Tabla 35: Comparativa de consumos específicos obtenidos mediante diversos métodos de cálculo (Fuente: Elaboración propia).....	70

## 1. Introducción

El objetivo de este anexo es determinar en un primer momento el sistema de recuperación de energía, para más tarde realizar el proceso de dimensionado y selección de la totalidad de las bombas que componen todo el proceso y obtener así el consumo específico de la planta. Realizado el dimensionado del sistema de recuperación, se conocerán ciertos datos operativos que se utilizarán en el proceso de selección de las bombas. Otro factor esencial en el proceso de selección es la altura que deben suministrar las diversas bombas al fluido de trabajo, para ello se tendrá en consideración la cota a la que se encuentran los elementos de la instalación, las redes de tuberías dispuestas a lo largo del proceso, los accesorios que la puedan acompañar y otras consideraciones que se tengan que tener en cuenta. De manera que para culminar los objetivos impuestos se seguirá el siguiente procedimiento:

- 1) Primer dimensionado del sistema de recuperación de energía.
- 2) Diseño del sistema de captación.
- 3) Diseño del sistema de distribución.
- 4) Diseño del sistema de rechazo de salmuera.
- 5) Dimensionado del pretratamiento y postratamiento.
- 6) Cálculo del punto de operación de cada bomba y proceso de selección de modelo.
- 7) Segundo dimensionado del sistema de recuperación de energía.
- 8) Cálculo de consumo específico de la planta.
- 9) Alternativas de gestión de la salmuera.

## 2. Primer dimensionado del sistema de recuperación de energía

Para el sistema de recuperación se ha optado por hacer uso de los intercambiadores de presión rotativos de la marca Energy Recovery, que se pueden utilizar en plantas de desalación de cualquier tamaño, presentan grandes rendimientos, entorno al 98% y bajo coste en comparación a su tiempo de vida.

Dentro de la propia marca existen diferentes modelos, en este caso se hará uso de la serie PX la cual no requiere la asociación del recuperador de energía con la bomba de alta presión. Este factor brinda una mayor flexibilidad al sistema que se traduce en la instalación de bombas de alta presión mayores y más eficientes. Pueden llegar a reducir el consumo eléctrico de ciertos sistemas en un 60%. Así pues este tipo de intercambiadores pueden ser los más beneficios para la planta del presente estudio.

La propia empresa facilita una hoja de EXCEL a modo de software para el dimensionado y selección de los intercambiadores de presión en la que se tendrá que introducir los datos necesarios.

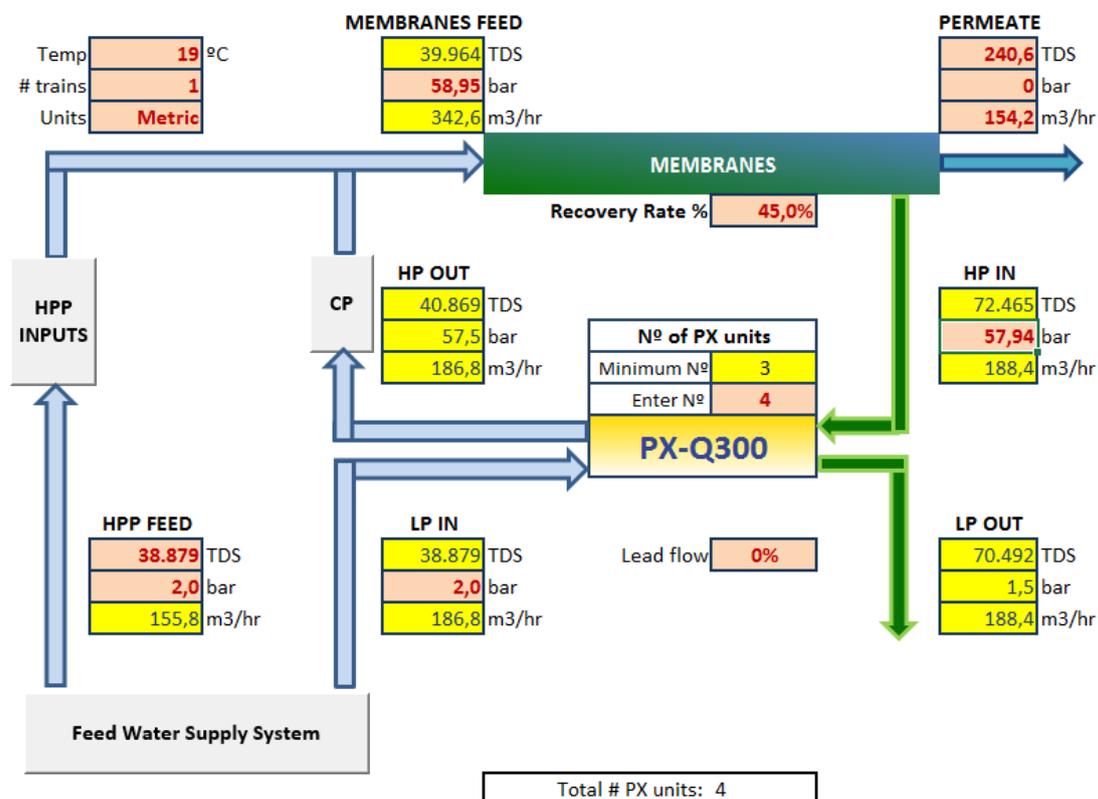


Figura 1: Interfaz de la hoja de cálculo del sistema de intercambiadores de presión (Fuente: Energy Recovery)

Como se puede observar en la interfaz existen tanto casillas rojas como amarillas, las rojas son las que se deben introducir para conseguir el correcto dimensionado de los intercambiadores. En ellas se solicitan los valores obtenidos en el proceso de dimensionado del núcleo de desalación:

<b>Caudal de permeado (m<sup>3</sup>/día)</b>	3700
<b>TDS de alimentación (mg/l)</b>	38879
<b>TDS de permeado (mg/l)</b>	240,6
<b>Presión de alimentación de las membranas (bar)</b>	58,95
<b>Presión de rechazo (bar)</b>	57,94
<b>Factor de conversión (%)</b>	45,00
<b>Temperatura (°C)</b>	19

*Tabla 1: Datos de entrada del software (Fuente: Elaboración propia. TorayDS2)*

Con relación a las bombas que forman parte del sistema, se tendrán en cuenta la bomba de alta presión y la bomba booster. Como en un primer momento se desconocen las condiciones en las que opera cada una se impone que la bomba de alta presión tiene un rendimiento del 100% mientras que la bomba booster un 80%, valor recomendado por el software de membranas.

Una vez introducidos estos valores se puede seleccionar manualmente el modelo del intercambiador y el número de ellos o que el propio software nos los proporcione. Para el caso de estudio se ha elegido el modelo PX-Q300 ya que de toda su serie es el modelo que alcanza mayor eficiencia y el que puede trabajar con un mayor valor de caudal.



*Figura 2: Intercambiador de presión PX-Q300 (Fuente: Energy Recovery)*

Bajo las condiciones dadas, el software recomienda que se deben instalar tres intercambiadores de presión para trabajar en un umbral de caudal aceptado por el modelo elegido aunque dicho valor se encuentra muy cercano al límite impuesto por el fabricante. Por ello se decide añadir un intercambiador más, lo que aumenta la eficiencia del conjunto además de disminuir el caudal unitario que soportan. La instalación de un mayor número de intercambiadores no se ha tenido en consideración ya que los valores de caudal unitario se encontrarían por debajo del valor mínimo recomendado.

Hecho esto, el software nos facilita los siguientes datos de operación del conjunto de intercambiadores de presión.

<b>PX Technology Performance</b>	
PX unitary flow	47,1 m <sup>3</sup> /hr
Salinity Increase at membranes	2,8%
Volumetric mixing VM	5,9%
Lubrication flow (LF) per PX array	1,6 m <sup>3</sup> /hr
LF as % of concentrate flow	0,9%
HP DP	0,5 bar
LP DP	0,5 bar
RO Specific Energy **	1,78 kWh/m <sup>3</sup>
Efficiency	97,65%

*Figura 3: Interfaz de resultados de la hoja de cálculo del sistema de intercambiadores de presión (Fuente: Energy Recovery)*

De los datos obtenidos, se tienen en mayor consideración el consumo específico del sistema de desalación (en el que no se contempla en consumo de la bomba de alimentación) y la eficiencia. Como se comentó anteriormente, el conjunto trabajará con 4 intercambiadores lo que eleva la eficiencia hasta un 97,65% (siendo la eficiencia mínima 97,20% según el fabricante por lo que es un valor óptimo) y se alcanza un consumo específico de 1,78 kWh/m<sup>3</sup> indicativo de que con la adición de este sistema se producirá un gran ahorro de energía en el proceso de ósmosis inversa. Por tanto esta será la configuración elegida para sistema bajo estudio. Con relación a la figura 2 el software también tiene en consideración ciertos aspectos que influyen en el

funcionamiento de los intercambiadores de presión como pueden ser los caudales de alimentación y salmuera que los calcula de manera automática.

Así pues los datos de interés que pueden ser necesarios en un futuro para el dimensionado de otros sistemas son los siguientes:

<b>Eficiencia de intercambiadores (%)</b>	97,65
<b>Caudal bomba booster (m3/h)</b>	186,8
<b>Presión de entrada bomba booster (bar)</b>	57,5
<b>Caudal bomba de alta presión (m3/h)</b>	155,8

Tabla 2: Datos de interés para el dimensionado de bombas de la instalación (Fuente: Elaboración propia. Energy Recovery)

Ahora que se conocen los datos de operación del conjunto de intercambiadores de presión podemos calcular que consumo específico se obtendría en el software de dimensionado de membranas. Para ello se introducirán los datos de operación y se realizará nuevamente la simulación.

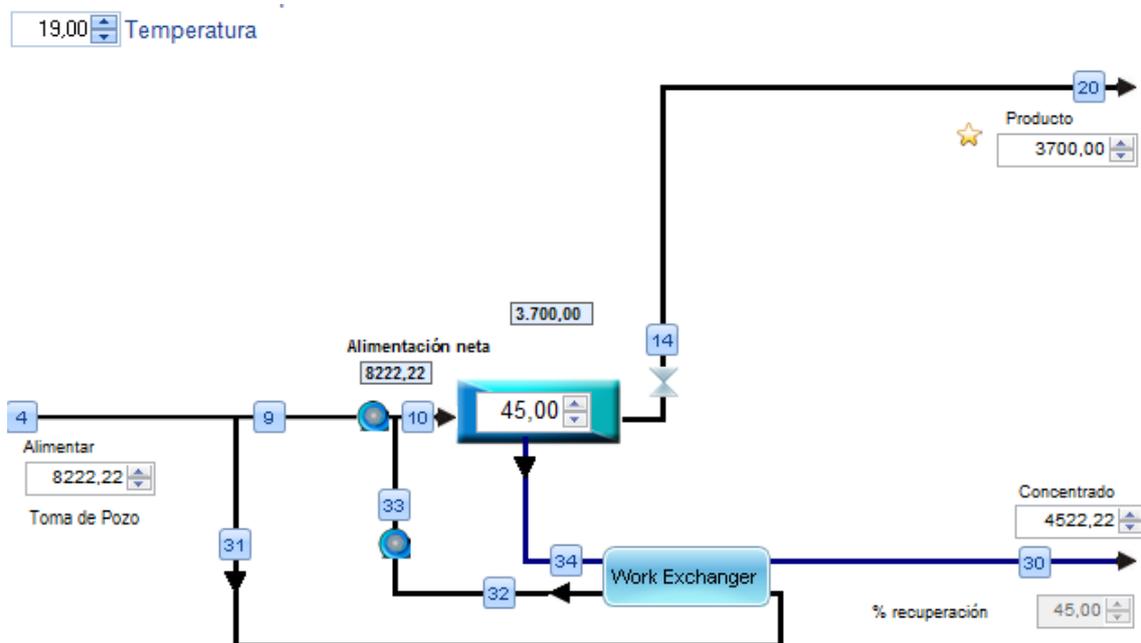


Figura 4: Esquema de funcionamiento del sistema de desalación junto con el de recuperación de energía (Fuente: TorayDS2)

Seleccione el tipo de ERD

Notas

Presión de descarga  bar

Eficiencia ERD

bomba booster

Eficiencia de la bomba boo...

Fración del flujo de lubrica...

Fración de Mezcla

Perdida de carga interna  bar

Figura 5: Interfaz de entrada de datos del sistema de recuperación de energía (Fuente: TorayDS2)

Y se obtiene que el consumo específico del proceso de desalación combinado con el intercambiador de presión es de:

Consumo energético	kWh/m <sup>3</sup>	1,769
--------------------	--------------------	-------

Figura 6: Consumo específico obtenido mediante la simulación del software de membranas (Fuente: TorayDS2)

Se tiene que destacar que los parámetros de funcionamiento de las bombas son iguales a los del proceso de dimensionado de los intercambiadores de presión.

En vista de los resultados obtenidos se observa que el valor de consumo del software de membranas es algo menor al obtenido en la hoja de cálculo de los intercambiadores. No obstante son valores muy cercanos, indicativo de que el proceso se ha realizado correctamente.

El dimensionado del conjunto de intercambiadores de presión no termina aquí dado que los rendimientos utilizados en las bombas son supuestos. Por tanto cuando se finalice el proceso de selección de bombas, se realizará nuevamente el proceso de

dimensionado tanto en la hoja de cálculo como en el software de membranas con el fin de estimar el consumo específico real que presentaría el proceso de desalación.

### **3. Dimensionado del sistema de captación**

Antes de realizar los cálculos pertinentes para dimensionar la bomba de captación primero se debe imponer la forma en la que se captará el agua de mar, así como el número de tomas, las posibles variaciones que puede sufrir la altura de la bomba y las pérdidas de cargas que pueden producirse en función de la disposición de los elementos que formen parte de este sistema.

#### **3.1. Captación del agua de mar**

La opción elegida para la captación del agua de mar es la de pozos cerrados. En ella se realizan perforaciones en el terreno cuya profundidad varía en función de la permeabilidad que presente ya que la captación se realiza mediante la permeación de caudales que atraviesan los diversos estratos del terreno en cuestión. Suele ser el método más utilizado debido al gran peso que presentan sus ventajas en comparación a sus inconvenientes.

Las ventajas más significativas que ofrece la toma de pozo son las siguientes:

- Limpieza del agua gracias al filtrado de esta a su paso por el terreno lo que implica una disminución del índice de turbidez (NTU) y de colmatación (SDI).
- Ausencia de actividad orgánica y biológica.
- Baja contaminación.
- Temperaturas bastante estables.
- Bajo contenido de oxígeno disuelto.

Esto permite disminuir los costes de manera muy considerable en aspectos como los tratamientos que se le tienen que realizar al agua de alimentación e incluso a equipos propios de la instalación.

No obstante este método de captación también tiene puntos en su contra:

- Concentraciones importantes de elementos secundarios como el hierro, aluminio, sílice, flúor u otros elementos que implican la realización de tratamientos previos antes de que el agua de alimentación entre en los bastidores de membranas.
- Contaminación por nitratos, pesticidas, etc.
- Variaciones en la composición química del agua a lo largo del tiempo incluso según la época del año.

### **3.2. Pozos de captación**

La localización y estructuración de los pozos es un estudio muy complejo ya que se requiere un alto conocimiento sobre las condiciones del terreno donde estos se van a instalar. Por lo que en el presente estudio se realizarán una serie de suposiciones y estimaciones con el fin de intentar dimensionar los pozos de la manera más fiel a la realidad ya que debido al alcance del estudio, en el mismo no se incluye ningún estudio referente a las condiciones que presenta el terreno donde se va a instalar la planta de desalación.

Observando otros ejemplos de plantas ya en funcionamiento de capacidades similares a la que se encuentra bajo estudio, se decide que se implantarán tres pozos profundos de altura a determinar donde se instalarán bombas sumergibles, dos de los cuales trabajan de forma continua, mientras que el restante se pondrá en funcionamiento en caso de fallo o mantenimiento para suplir el pozo que se encuentre fuera de servicio.

La división de la captación del agua de alimentación permite reducir el riesgo de sobreexplotación de los pozos ya que si existe una gran afluencia de caudal se puede producir la obstrucción del paso del agua debido al arrastre de elementos finos. Además de que si existe alguna disminución del caudal de alimentación que pueda poner en riesgo la integridad de los elementos de la instalación, se puede finalizar la actividad del pozo que este sufriendo dicho problema.

La ubicación elegida dentro de la parcela para la instalación de los tres pozos está situada en una zona muy cercana a la costa de isla para evitar problemas de permeación de los caudales del agua de alimentación.



Figura 7: Disposición de los pozos con respecto a la EDAM (Fuente: Grafcan)

Los pozos se dispondrán en forma de cruz a una distancia de 25 metros con respecto al colector principal que conecta los pozos con la instalación desaladora. Esto facilita en gran medida el cálculo de las pérdidas de cargas para cada una de las bombas ya que todas se encuentran a la misma distancia. Por otro lado la distancia entre el punto de unión de los pozos al colector y la instalación es de 40 metros.

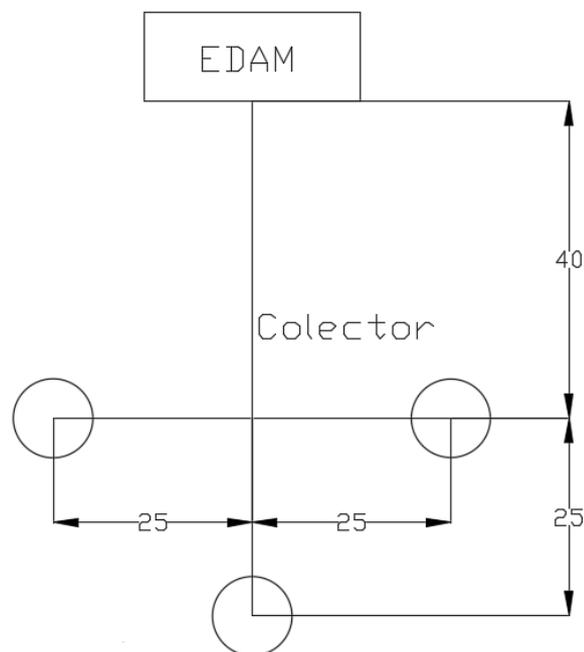


Figura 8: Esquema de estructuración de los pozos (Fuente: Elaboración propia)

Para conocer a que cota se deben situar los pozos para que la bomba se encuentre totalmente sumergida y no se produzca cavitación se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Primero se calcula la altura máxima que presenta la parcela donde se instalaría la desaladora bajo estudio. Para ello se ha hecho uso de la herramienta “GoolZoom” que mediante una imagen de satélite permite obtener la diferencia de altura entre diversos puntos. Así pues se obtiene que altura máxima con respecto el nivel del mar es de 10 metros.

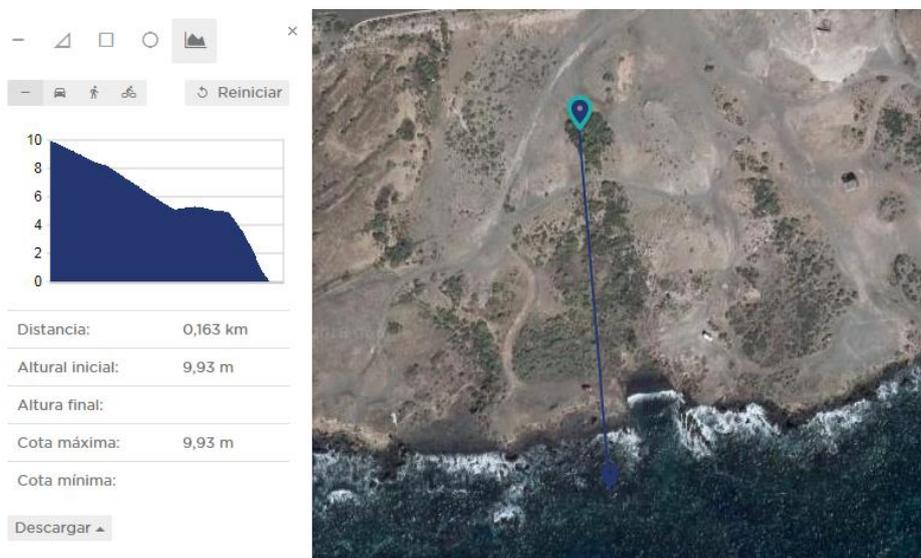


Figura 9: Diferencia de cota entre la costa y el emplazamiento de la EDAM (Fuente: Goolzoom)

- Después se estudia el valor máximo de bajamar que se puede dar en la zona. Para conseguir estos datos se ha hecho uso de los informes facilitados por la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado.

<b>Estadística Bajamares</b>	
Mínima (m):	-0.03
Máxima (m):	1.40
Media (m):	0.74
Desv.Est. (m):	0.25
Moda (m):	0.72
Mediana (m):	0.74
Sesgo:	0.02
Curtosis:	-0.56

Figura 10: Valores de bajamares en el puerto de Santa Cruz de Tenerife (Fuente: Puertos del Estado)

Por tanto observando la figura 10 obtenemos que el valor de bajamar máximo es de 1,4 metros. No obstante como estos datos fueron recogidos por una boya que no se encuentra muy cerca de la zona, y como se desconocen las condiciones del terreno se añade un margen de seguridad y se elevan el valor a 2 metros.

- Como consecuencia de la pérdida de altura por filtración se añade 1 metro más.
- Disminución de la altura debido al cono de succión, se añade 1 metro más.

Una vez se han tenido en cuentas todos estos aspectos se alcanza una cota mínima de 14 de metros, por lo que las bombas sumergibles se deben instalar a una profundidad mayor para asegurar la alimentación de estas.

Sin embargo, como se comentó previamente, el desconocimiento del terreno juega un papel muy relevante a la hora de definir la profundidad de los pozos y no se puede garantizar el funcionamiento de las bombas con las suposiciones realizadas. Por lo que se ha optado por observar otras plantas de desalación y comparar las profundidades que presentan sus pozos. Por ejemplo se ha estudiado la desaladora de Santa Cruz de Tenerife cuyos pozos tienen una altura media de 30 metros de longitud. Así que en vista de la altura que presentan los pozos del presente estudio se ha decidido aumentar la profundidad de los mismo hasta unos 40 metros con el fin de garantizar con creces el correcto funcionamiento de las bombas.

Con lo que como ya se conoce tanto la altura del pozo como la distancia hasta el colector de entrada a la planta. La longitud de la tubería de captación será de 65 metros cada una.

Para concluir los datos conseguidos en este apartado son los siguientes:

<b>Longitud Colector (m)</b>	40
<b>Longitud tubería de captación (m)</b>	65

*Tabla 3: Longitudes de tubería del sistema de captación (Fuente: Elaboración propia)*

### 3.3 Diámetros de las tuberías

Como se comentó en el apartado anterior en el sistema de captación contaremos con dos tipos de tuberías.

- Las tuberías que trasladan el agua de alimentación hasta el colector.
- La tubería que traslada el caudal total proveniente de los pozos hasta la planta de desalación.

Estarán fabricadas de Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) gracias a las cualidades que previamente se han enumerado en el apartado de la memoria referente la selección del material de las tuberías. Aunque se puede que comentar que principalmente se eligió este material debido a su alta resistencia a la corrosión, resistencia mecánica y las pocas pérdidas de carga que generan.

Ahora que se ha seleccionado el material se pueden dimensionar ambas tuberías para ello se hará uso del criterio de Bonet. Que brinda el diámetro mínimo que deben tener las tuberías para que el fluido no alcance altas velocidades y por consiguiente no se produzcan altas pérdidas de cargas o fenómenos como el golpe de ariete.

$$D = 0,835 * Q^{\frac{2}{5}}$$

*Ecuación 1: Criterio de Bonet*

Pero antes se requiere el caudal que transportan ambos tipos de tuberías.

### Colector

En este caso la tubería transporte el caudal total del agua de alimentación por lo que se valor se calcula de la siguiente forma, conociendo primero el caudal de agua producto que se va a producir (3700 m<sup>3</sup>/día).

$$Q_{colector} = \frac{Q_{producto}}{F.C} * 100$$

*Ecuación 2: Expresión para calcular el caudal de alimentación*

Donde F.C es el factor de conversión del núcleo de membranas. Por lo que:

$$Q_{colector} = \frac{3700 \text{ m}^3/\text{día}}{45 \%} * 100 = 8222,22 \text{ m}^3/\text{día}$$

Antes de calcular el Diámetro mínimo las unidades del caudal se deben expresar en la forma correcta para poder introducirlo en la expresión.

$$Q_{colector} = 8222,22 \frac{m^3}{día} * \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}} = 0,0951 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Diámetro del colector

$$D_{colector} = 0,835 * \left(0,0951 \text{ m}^3/\text{s}\right)^{\frac{2}{5}}$$

$$D_{colector} = 0,326 \text{ m}$$

### Tubería de captación

En este caso por cada tubería circula la mitad del caudal de agua de alimentación ya que hay dos bombas instaladas en paralelo.

$$Q_{captación} = \frac{0,0951 \text{ m}^3/\text{s}}{2} = 0,0476 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Diámetro de la tubería captación

$$D_{captación} = 0,835 * \left(0,0476 \text{ m}^3/\text{s}\right)^{\frac{2}{5}}$$

$$D_{captación} = 0,247 \text{ m}$$

Ahora que tenemos los diámetros teóricos que deben tener las tuberías, se deben consultar los catálogos del fabricante para seleccionar los diámetros inmediatamente superiores.

• 100	• 300	• 500	• 900	• 1600
• 150	• 350	• 600	• 1000	• 1800
• 200	• 400	• 700	• 1200	• 2000
• 250	• 450	• 800	• 1400	• 2400

Figura 11: Diámetros comerciales de tuberías (Fuente: Flowtite)

Y en la siguiente tabla se muestran los diámetros seleccionados:

Tuberías	Diámetro mínimo teórico (mm)	Diámetro comercial (mm)
Tubería de captación	247	250
Colector	326	350

Tabla 4: Diámetros comerciales de las tuberías del sistema de captación (Fuente: Elaboración propia)

### 3.4. Cálculo de las pérdidas de carga

#### 3.4.1. Pérdidas de carga en las tuberías

Ahora que se ha fijado el diámetro y material de cada tubería se comienza con el proceso iterativo mediante la ecuación de Colebrook-White para obtener el factor de fricción.

$$\frac{1}{\sqrt{f_2}} = -2 \log_{10} \left( \frac{K/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re_D \sqrt{f_1}} \right)$$

Ecuación 3: Ecuación de Colebrook-White

Dentro de la misma tenemos el número de Reynolds que se ajusta a las condiciones que presente la tubería y la temperatura del fluido de trabajo.

$$Re_D = \frac{4 Q}{\pi D v}$$

Ecuación 4: Expresión del número de Reynolds

En primer lugar, se debe de obtener el valor de la viscosidad cinemática. Para ello se tomará de la tabla de propiedad físicas del agua a 1 bar del libro “Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas”. La entrada a dicha tabla se realiza mediante la temperatura pero en esta no se encuentra el valor de 19 °C por lo que se procede a interpolar.

Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática $\nu * 10^{-6} (m^2/s)$
15	1,140
19	1.0304
20	1,003

Tabla 5: Valores de viscosidad cinemática (Fuente: Elaboración propia. Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas)

Se calcula el número de Reynolds para ambos tipos de tuberías. Y seguidamente se realiza el proceso iterativo para calcular el coeficiente de fricción para el que se necesitarán los siguientes datos:

- Rugosidad absoluta (k) = se fija en función del material del que esté fabricada la tubería, previamente se impuso que era PRFV por lo que  $k = 0,029\text{mm}$ .
- Coeficiente de fricción inicial ( $f_{\text{inicial}}$ ) = se elige 0,015 como valor inicial para el proceso iterativo.

### Tuberías de captación

#### 1. Cálculo del número de Reynolds

$$Re_{D.\text{captación}} = \frac{4 * 0,0476 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * 250 * 10^{-3}\text{m} * 1,0304 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 235272,525$$

Así pues el fluido se encuentra en régimen turbulento ya que se supera la condición de  $Re_{D.\text{captación}} \geq 4000$ .

#### 2. Proceso iterativo mediante la expresión de Colebrook-White.

Factor de Fricción	
f inicial	f final
0,015	0,01621345
0,01621345	0,01611181
0,01611181	0,01611995
0,01611995	0,01611930
0,01611930	0,01611935
0,01611935	0,01611935
0,01611935	0,01611935

Tabla 6: Factores de fricción de la tubería de captación (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar a partir de la sexta iteración el valor del coeficiente no cambia así que se tomará dicho valor para el cálculo de las pérdidas de carga.

$$f_{captación} = 0,01611935$$

### Colector

1. Cálculo del número de Reynolds

$$Re_{D.colector} = \frac{4 * 0,0951 \text{ m}^3/s}{\pi * 350 * 10^{-3} \text{ m} * 1,0304 * 10^{-6} \text{ m}^2/s} = 335750,56$$

Así pues el fluido se encuentra en régimen turbulento ya que se supera la condición de  $Re_{D.colector} \geq 4000$ .

2. Proceso iterativo mediante la expresión de Colebrook-White.

Factor de Fricción	
f inicial	f final
0,015	0,01502581
0,01502581	0,01502380
0,01502380	0,01502396
0,01502396	0,01502395
0,01502395	0,01502395
0,01502395	0,01502395
0,01502395	0,01502395

Tabla 7: Factores de fricción del colector (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede observar a partir de la quinta iteración el valor del coeficiente no cambia así que se tomará dicho valor para el cálculo de las pérdidas de carga.

$$f_{colector} = 0,01502395$$

Ahora que se conocen todos los parámetros necesarios se pueden calcular las pérdidas de carga que se generan en las tuberías mediante la expresión de Darcy-Weisbach.

$$H_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} = f \frac{8 L Q^2}{g \pi^2 D^5}$$

*Ecuación 5: Expresión de Darcy-Weisbach*

### Tuberías de captación

Datos de entrada a la expresión:

Datos	
Factor de fricción (f)	0,01611935
Longitud (L)	65 m
Diámetro (D)	250 mm
Caudal (Q)	0,0476 m <sup>3</sup> /s
Aceleración de la gravedad (g)	9,81 m/s <sup>2</sup>

*Tabla 8: Datos necesarios para calcular las pérdidas de carga de la tubería de captación (Fuente: Elaboración propia)*

- Cálculo de las pérdidas de carga debidas a la conducción.

$$H_{r,captación} = 0,01611935 * \frac{8 * 65 m * (0,0476 m^3/s)^2}{9,81 m/s^2 * \pi^2 * (0,250m)^5}$$

$$H_{r,captación} = 0,2009 m$$

### Colector

Datos de entrada a la expresión:

Datos	
Factor de fricción (f)	0,01502395

<b>Longitud (L)</b>	40 m
<b>Diámetro (D)</b>	350 mm
<b>Caudal (Q)</b>	0,0951 m <sup>3</sup> /s
<b>Aceleración de la gravedad (g)</b>	9,81 m/s <sup>2</sup>

Tabla 9:: Datos necesarios para calcular las pérdidas de carga del colector (Fuente: Elaboración propia)

- Cálculo de las pérdidas de carga debidas a la conducción.

$$H_{r,colector} = 0,01502395 * \frac{8 * 40 \text{ m} * (0,0951 \text{ m}^3/\text{s})^2}{9,81 \text{ m}/\text{s}^2 * \pi^2 * (0,350\text{m})^5}$$

$$H_{r,colector} = 0,0855 \text{ m}$$

### 3.4.2. Pérdidas de carga debidas a los accesorios de las tuberías

Para finalizar, los únicos elementos que también provocarán pérdidas de cargas son los accesorios que se incluyan en el sistema de tuberías de captación y la unión con el colector. Para calcular dichas pérdidas se hará uso de la expresión de las pérdidas de carga localizadas, que relaciona el coeficiente de pérdida "K" con la altura cinética que presenta el fluido.

$$H_r = k \frac{V^2}{2g}$$

*Ecuación 6: Expresión de cálculo de las pérdidas de carga debidas a accesorios*

En el presente caso de estudio se han tenido en consideración las pérdidas debidas a un codo de 90° y una válvula de pie con colador, ambas instaladas en cada una de las tuberías de captación, y también se han estudiado las pérdidas debidas a la unión de la tubería de captación y el colector, dicha unión se tomará como un empalme en T.

En primer lugar se tendrá que calcular la velocidad que presenta el fluido teniendo en cuenta el caudal y dimensión que presenta la tubería bajo estudio. La expresión que relacionada estos parámetros es la siguiente.

$$Q = V * A$$

*Ecuación 7: Expresión de cálculo del caudal*

- *Tubería de captación*

$$V_{captación} = \frac{Q}{A} = \frac{0,0476 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * \left(\frac{0,250 \text{ m}}{2}\right)^2} = 0,9697 \text{ m/s}$$

- *Colector*

$$V_{colector} = \frac{Q}{A} = \frac{0,0951 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * \left(\frac{0,350 \text{ m}}{2}\right)^2} = 0,9884 \text{ m/s}$$

Para determinar los coeficientes de pérdidas, se consultará nuevamente el libro “Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas” para obtener los datos tabulados que este facilita.

Accesorio	Coficiente de Pérdida (k)
<b>Codo de 90 °</b>	0,9
<b>Válvula de pie con colador</b>	0,8
<b>Unión en T</b>	1,8

*Tabla 10: Coeficientes de pérdida de los accesorios (Fuente: Elaboración propia. Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas)*

Una vez se tienen todos los coeficientes de pérdida se pueden sustituir en la expresión de las pérdidas de cargas locales. Para conseguir el valor total de las pérdidas cada uno de los accesorios contará un su propio miembro en la ecuación. Hay que destacar que en el cálculo de la unión se hará uso de la velocidad que presenta el colector ya que presenta una mayor velocidad y por consiguiente se estará trabajando en la situación más desfavorable que se puede dar.

$$H_{rtotal} = H_{r,codo90^\circ} + H_{r,válvula} + H_{r,unión}$$

$$H_{rtotal} = 0,9 * \frac{(0,9697 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} + 0,8 * \frac{(0,9697 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} + 1,8 * \frac{(0,9884 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$H_{rtotal} = 0,1711 \text{ m}$$

## Pérdidas de carga totales

Una vez finalizado los cálculos referentes a las pérdidas de carga, se facilita una tabla donde se recogen todos los valores obtenidos:

Pérdidas de carga	
Hr captación (m)	0,2009
Hr colector (m)	0,0855
Hr accesorios (m)	0,1711

Tabla 11: Pérdidas de carga totales del sistema de captación (Fuente: Elaboración propia)

## 4. Dimensionado del sistema de distribución

### 4.1 Localización del depósito y red de tuberías

Para definir la localización y las condiciones en las que trabajará el sistema de distribución se tendrán en cuenta los siguientes aspectos con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de éste.

Primero como el fin de la planta desaladora es proveer agua a las zonas agrícolas del municipio de Granadilla de Abona, se busca un lugar donde exista mayor cota con respecto a la totalidad de las zonas de cultivo con el fin de realizar el proceso de distribución mediante gravedad para evitar la instalación de una bomba. Dicho lugar también se tiene que encontrar a una distancia aceptable tanto de las zonas de cultivo como de la propia planta de desalación.

Por lo que se decidió que el lugar que cumplía estas características es el siguiente.



Figura 12: Recorrido de la tubería de distribución hasta el depósito de regulación (Fuente: Elaboración propia. Goolzoom)

La distancia lineal del depósito a la EDAM es de unos 1400 metros, pero como el terreno presenta irregularidades se decidió aumentar dicha longitud a 1600 metros. Con relación a la diferencia de cotas entre ambos puntos, la planta se encuentra a una cota de 10 metros mientras que el lugar de instalación del depósito se encuentra a 40 metros, por lo que la altura a vencer es de 30 metros.

## 4.2. Depósito de regulación y cabecera

La planta contará con dos depósitos cuyos fines se impondrán a continuación. El primero se denomina depósito de regulación y estará localizado en las instalaciones de la EDAM, su fin como su nombre indica es regular el flujo de permeado una vez ha salido de la etapa de postratamiento para enviarlo posteriormente a la bomba de distribución, por lo que no requiere de una gran capacidad. El segundo se denomina depósito de cabecera y su emplazamiento se designó en el apartado anterior,

se encarga de distribuir el flujo de permeado por la zona que lo demanda, su capacidad en un primer momento se fijará en función de la capacidad de producción de la EDAM, no obstante esta puede variar en función de las necesidades de los cultivos o de si se encuentran en la zona otros depósitos que son capaces de almacenar el excedente de agua no utilizado. Para determinar la capacidad de cada uno se han estudiado las capacidades que presentan los depósitos de la EDAM de Granadilla cuya producción alcanza los 14000 m<sup>3</sup>/ día. Su depósito de regulador es de 7000 m<sup>3</sup> y el de cabecera de 10000 m<sup>3</sup>. Por lo que en función del caudal de la EDAM bajo estudio se ha decidido imponer una capacidad de 1850 m<sup>3</sup> para el depósito regulador y 3000 m<sup>3</sup> para el de cabecera, aunque esta última puede estar sujeta a cambios.

### 4.3. Diámetro de las tuberías de distribución

La disposición de las tuberías de distribución es la mostrada en la figura 12, se ha buscado que el recorrido fuese lo más lineal posible para evitar la colocación de codos u otros accesorios que aumentasen las pérdidas de carga del sistema de tuberías.

El fabricante seleccionado para las tuberías es el mismo que se utilizó para el sistema de captación, Flowtite. Por ello las tuberías estarán fabricadas de PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio) y el proceso de selección del diámetro comercial se realizará de la misma forma que en el apartado nombrado.

Así pues se debe definir el caudal que circulará por las tuberías. Este mismo fue calculado en un apartado de la memoria del presente estudio "Capacidad de producción de la EDAM".

$$Q_{producto} = 3700 \text{ m}^3/\text{día} = 3700 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{86400\text{s}}$$

$$Q_{producto} = 0,04282 \text{ m}^3/\text{s}$$

Y se aplica el criterio de Bonet para obtener el diámetro mínimo teórico que debe tener la tubería.

$$D_{distribución} = 0,835 * Q^{\frac{2}{5}}$$

$$D_{distribución} = 0,835 * \left(0,04282 \text{ m}^3/\text{s}\right)^{\frac{2}{5}}$$

$$D_{distribución} = 0,237\text{m}$$

Obtenemos un diámetro de 0,237m por lo que se elige el modelo comercial inmediatamente superior a este, 0,250m.

#### 4.4. Cálculo de las pérdidas de carga

Una vez se ha determinado el diámetro se realiza el cálculo del factor de fricción mediante proceso iterativo con la ecuación de Colebrook-White con el fin de calcular las pérdidas de carga debidas a la conducción. Se tendrán en cuenta las mismas consideraciones que en el apartado de cálculo de las tuberías de captación.

- Se calcula el número de Reynolds.

$$Re_{D.distribución} = \frac{4 * 0,04282 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * 250 * 10^{-3}\text{m} * 1,0304 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 211646,42$$

Se encuentra en régimen turbulento ya que se supera la condición de  $Re_{D.distribución} \geq 4000$ .

- Se aplica proceso iterativo fijando un valor de coeficiente de fricción inicial.

Factor de Fricción	
f inicial	f final
0,015	0,01650033
0,01650033	0,01636923
0,01636923	0,1638008
0,1638008	0,1637918
0,1637918	0,01637925

0,01637925	0,01637924
0,01637924	0,01637924
0,01637924	0,01637924

Tabla 12: Factores de fricción de red de tuberías de distribución (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede observar a partir de la séptima iteración el valor del coeficiente no cambia así que se tomará dicho valor para el cálculo de las pérdidas de carga.

$$f_{distribución} = 0,01637924$$

Una vez calculado el coeficiente de fricción mediante la expresión de Darcy-Weisbach se pueden calcular las pérdidas de carga debidas a las tuberías del sistema de distribución.

$$H_{r,distribución} = f \frac{8 L Q^2}{g \pi^2 D^5}$$

$$H_{r,distribución} = 0,01637924 * \frac{8 * 1600m * (0,04282 m^3/s)^2}{9,81 m/s^2 * \pi^2 * (0,250m)^5}$$

$$H_{r,distribución} = 4,0656 m$$

Debido al gran desconocimiento que existe con relación al estado del terreno no se puede asegurar que clase de accesorios se necesitarán para la instalación correcta del sistema de distribución. Así pues como ya se hizo para el apartado de conducción donde se incrementó la longitud para contrarrestar este hecho en el caso de las pérdidas secundarias se añadirá 3% de las pérdidas primarias para justificar la colocación de válvulas u otros accesorios que sean requeridos.

Pérdidas de carga	
Hr distribución (m)	4,0656
Hr secundarias (3%) (m)	0,1219

Hr total (m)	4,1875
--------------	--------

Tabla 13: Pérdidas de carga totales del sistema de distribución (Fuente: Elaboración propia)

## 5. Dimensionado del sistema de rechazo de salmuera

### 5.1. Longitud y altura de la tubería de rechazo

La planta de desalación tiene que contar con un sistema que sea capaz de liberar el rechazo que produce el proceso de ósmosis inversa a una distancia lo bastante grande como para que no se produzcan cambios en la composición del agua cercana a la planta.

Se estudiará si desde la cota en la que se encuentra la planta existe la posibilidad de impulsar el rechazo mediante la propia gravedad o es necesaria la instalación de una bomba. Para ello se hará uso de una herramienta del Instituto Español de Oceanografía que permite obtener información del fondo marino de la zona que se quiera estudiar. Así pues se realizó un estudio de las isobatas más cercanas al emplazamiento de la planta para conocer la profundidad y distancia a la que se encuentran. En la siguiente figura se puede observar los resultados obtenidos en la herramienta.

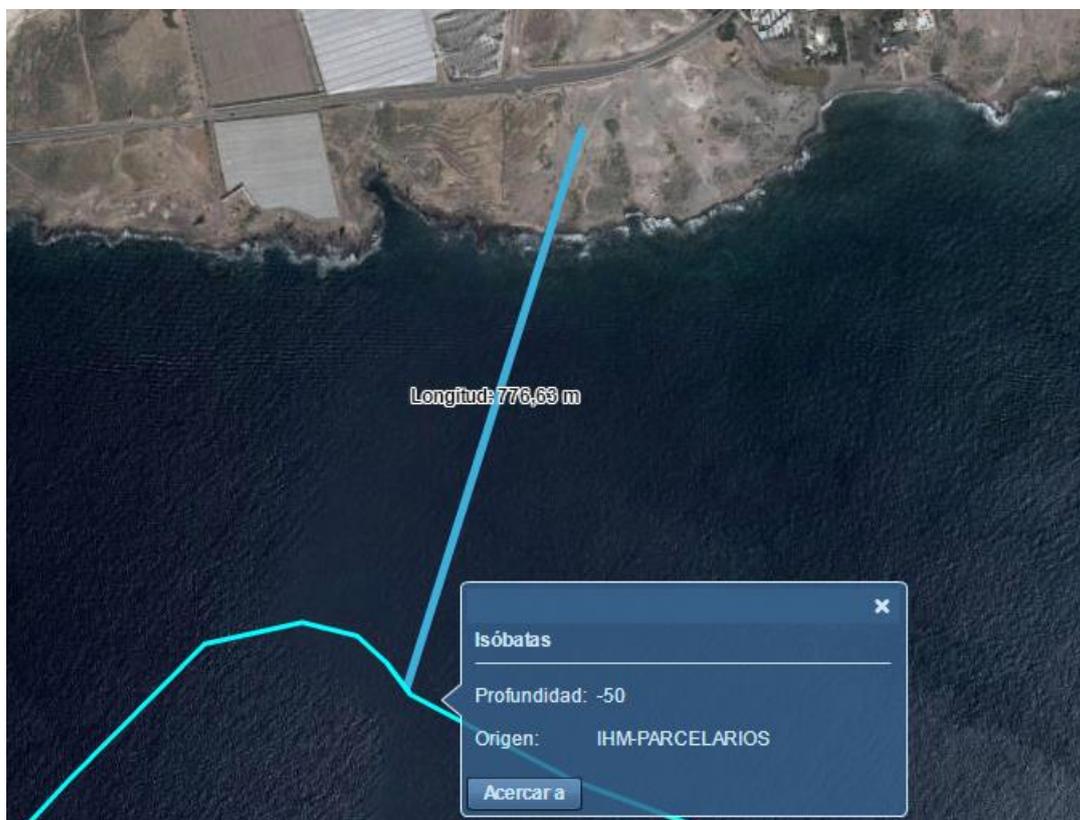


Figura 13: Distancia y profundidad a la que se encuentra el emisario submarino (Fuente: Instituto Español de Oceanografía)

Así pues el emisario de este sistema se debe encontrar a una distancia lineal de 777 metros y a una profundidad con respecto a la primera isóbata de 50 metros. Como no se desconoce tanto el estado del terreno como del fondo marino se ha incrementado la longitud a 950 metros.

## 5.2. Diámetro de la tubería de rechazo

Antes de todo se requiere el caudal de rechazo que se obtiene del proceso de ósmosis inversa. Este mismo se puede obtener del propio software de membranas o mediante la siguiente expresión que relaciona el caudal de permeado obtenido y el factor de conversión de las membranas.

$$Q_{rechazo} = \frac{3700 \text{ m}^3/\text{día} * (1 - 0,45)}{0,45} = 4522,22 \text{ m}^3/\text{día}$$

Con el objetivo de determinar el diámetro mínimo, las unidades del caudal se deben expresar en la forma correcta para poder introducirlo en la expresión.

$$Q_{rechazo} = 4522,22 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}} = 0,0523 \text{ m}^3/\text{s}$$

Una vez calculado el caudal se aplica el criterio de Bonnet para obtener el diámetro teórico.

$$D = 0,835 * Q^{\frac{2}{5}}$$

$$D_{rechazo} = 0,835 * \left(0,0523 \text{ m}^3/\text{s}\right)^{\frac{2}{5}}$$

$$D_{rechazo} = 0,256 \text{ m}$$

Y se elige el diámetro comercial inmediatamente superior que en este caso es 0,300m.

## 5.3 Cálculo de las pérdidas de carga

### 5.3.1. Pérdidas de carga en las tuberías

Posteriormente se calculan las pérdidas de conducción, comenzando con la determinación del coeficiente de fricción mediante proceso iterativo con la ecuación de Colebrook-White. Pero antes se requiere el valor del número de Reynolds.

$$Re_{D,rechazo} = \frac{4 * 0,0523 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * 0,300\text{m} * 1,0304 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 215419,35$$

Se encuentra en régimen turbulento ya que se supera la condición de  $Re_{D.distribución} \geq 4000$

Y seguidamente se realiza el proceso iterativo para calcular el coeficiente de fricción para el que se necesitarán los siguientes datos:

- Rugosidad absoluta (k) = se fija en función del material del que esté fabricada la tubería, previamente se impuso que era PRFV por lo que  $k = 0,029\text{mm}$ .
- Coeficiente de fricción inicial = se elige 0,015 como valor inicial para el proceso iterativo.

Durante el proceso iterativo se han obtenido los siguientes valores:

Factor de Fricción	
f inicial	f final
0,015	0,01629812
0,01629812	0,01618153
0,01618153	0,01619152
0,01619152	0,01619066
0,01619066	0,01619073
0,01619073	0,01619073
0,01619073	0,01619073

0,01619073	0,01619073
------------	------------

Tabla 14: Factores de fricción tubería de rechazo (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede observar a partir de la sexta iteración el valor del coeficiente no cambia así que se tomará dicho valor para el cálculo de las pérdidas de carga.

$$f_{rechazo} = 0,01619073$$

Una vez calculado el coeficiente de fricción mediante la expresión de Darcy-Weisbach se pueden calcular las pérdidas de carga debidas a las tuberías del sistema de rechazo.

$$H_{f,rechazo} = f \frac{8 L Q^2}{g \pi^2 D^5}$$

$$H_{f,rechazo} = 0,01619073 * \frac{8 * 950m * (0,0523 m^3/s)^2}{9,81 m/s^2 * \pi^2 * (0,300m)^5}$$

$$H_{f,rechazo} = 1,4306 m$$

### 5.3.2. Cálculo de las pérdidas de carga secundarias

Como se comentó previamente se desconoce el estado del terreno y del fondo marino por lo que no se puede asegurar que trazado seguirán las tuberías del sistema y que accesorios deberán instalarse. Por lo que se decide imponer unas pérdidas secundarias equivalentes a un 3% de las primarias.

$$H_{r,rechazo} = 1,4306 m * 0,03$$

$$H_{r,rechazo} = 0,0429 m$$

### 5.3.3. Pérdidas de carga totales

Una vez finalizado los cálculos referentes a las pérdidas de carga, se facilita una tabla donde se recogen todos los valores obtenidos:

Pérdidas de carga	
Hr distribución (m)	1,4306
Hr secundarias (3%) (m)	0,0429
Hr total (m)	1,4735

Tabla 15: Pérdidas de carga totales del sistema de rechazo (Fuente: Elaboración propia)

## 6. Dimensionado del pretratamiento

Antes de continuar con el dimensionado de los distintos equipos de la instalación, se requiere el dimensionado del pretratamiento ya que este mismo genera pérdidas de cargas que habrá que tener en cuenta a la hora de diseñar el sistema de captación. En etapa se hará uso de filtros y productos químicos que se encargarán de ajustar el agua de alimentación para evitar que produzca daños en los distintos equipos que conforman el proceso.

Es remarcable que la forma idónea de dimensionar el proceso es sabiendo la composición que presenta el agua de alimentación una vez captada. Pero siendo un proyecto no ejecutable es imposible conocer esa información. Así pues el dimensionado del pretratamiento tanto en el aspecto físico como el químico se realizará siguiendo las directrices que facilita la bibliografía.

### 6.1. Pretratamiento físico

El método de captación juega un papel vital a la hora de dimensionar el pretratamiento. En este caso se ha seleccionado la captación mediante pozos ya que se obtiene un agua de alimentación con un nivel de limpieza más alto que en otros métodos de captación y con menos sustancias disueltas gracias a la permeabilidad del agua a través de las diversas capas del terreno. No obstante el agua sigue conteniendo elementos que hay que eliminar.

Para realizar el diseño se seguirán las recomendaciones dadas por el libro “Desalación de agua salobres y de mar. Ósmosis inversa” del autor José Antonio Medina San Juan. De manera que se instalarán filtros de arena y de cartucho como medidas de retención de partículas para evitar su llegada al núcleo de desalación y poder ocasionar daños a las membranas.

En la primera etapa de filtrado se hará uso de los filtros de arena que son generalmente de presión. En ellos el agua se mueve en sentido vertical, penetrando por la parte superior del filtro y a medida que desciende atraviesa las distintas capas de material filtrante que retienen las materias sólidas que puedan acompañar al agua. La disposición de estos filtros puede ser vertical u horizontal. Los verticales alcanzan una calidad de permeado mayor y más homogénea pero tienen el inconveniente de que su superficie de filtrado es limitada por lo que en instalaciones de gran tamaño se suele optar por los horizontales. En el presente estudio se hará uso del tipo vertical debido a la capacidad que tiene la planta.

La segunda etapa de filtrado se realizará mediante filtros de cartucho cuyo nivel de filtración mínimo es de 5 micras. Este valor es que suelen imponer los fabricantes para garantizar el correcto funcionamiento de las membranas.

Con relación a las pérdidas de carga que generan estos filtros, se consultaron diversos fabricantes (Lenntech, 3M, Pure Aqua) para saber con qué valores de caída de presión suelen operar. Los filtros de arena suelen tener una pérdida de presión que varía entre 0,5 y 1 kg/cm<sup>2</sup> y los filtros de cartucho 1 kg/cm<sup>2</sup>. Para el cálculo de las pérdidas de carga se hará uso del valor de caída de presión más alto con el fin de dimensionar el sistema con la situación más desfavorable que se puede dar. Por lo que si se calcula la pérdida de presión en bar se obtiene un valor muy cercano a 2 bar. Así pues debido al paso del agua por el pretratamiento físico se impone una pérdida de carga de 2 bar que se tendrá en cuenta a la hora de dimensionar el sistema de captación.

## 6.2. Pretratamiento químico

El fin de realizar este pretratamiento es evitar que precipiten sales minerales u óxidos metálicos en la superficie de las membranas. Los cuales pueden afectar a la

integridad de esta, favoreciendo su desgaste. Así pues se realizarán diversos pretratamientos para ajustar la composición química del agua.

- ❖ *Desinfección*: mediante la adición de hipoclorito sódico ( $\text{NaClO}$ ) se consigue esterilizar el agua, eliminando la actividad biológica que esta puede presentar. La desinfección se realizará de manera continua, dosificando el producto en dosis pequeñas.
- ❖ *Declaración*: las membranas de poliamida no toleran el cloro residual u otros agentes oxidantes que pueden estar en la composición del agua de alimentación. Por lo que una vez finalizado el proceso de desinfección se aplica bisulfito sódico ( $\text{NaHSO}_3$ ) ya que se trata de un agente reductor que es capaz de eliminar estos elementos.
- ❖ *Regulación de pH*: se realiza mediante la dosificación de ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) con concentración de 100%. También evita la precipitación de carbonato cálcico en las membranas, ya que este se vuelve más soluble cuando se reduce el pH. Existe la opción de usar ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) pero al tratarse de un líquido altamente corrosivo se recomienda que en instalaciones pequeñas se sustituya por el ácido previamente nombrado.
- ❖ *Antiincrustante*: para evitar la precipitación de sales poco solubles como el sulfato cálcico, sulfato de bario, sulfato estróncico y fluoruro cálcico sobre la membrana, se hará uso de un dispersante o antiincrustante compatible con la membrana. Su aplicación debería realizarse después del paso del agua por los filtros de arena y antes de los filtros de cartuchos para evitar que el primer filtrado retenga parte del dispersante, y en caso de que parte de este no se acabe de disolver, el segundo filtrado lo retiene para evitar su entrada en las membranas.

## 7. Dimensionado del postratamiento

En el anexo 1 se puede observar la composición que presenta el agua una vez realizado el proceso de desalación. Todos los elementos que según la bibliografía podrían suponer un riesgo para los cultivos se encuentran dentro de los límites recomendados, menos uno de ellos que es el pH. Su valor tras el proceso de desalación es de 5,150 y se tiene que elevar hasta un mínimo de 6,5. La regulación del pH se realiza

con NaOH (sosa cáustica) pero a su vez no dan garantías de que el agua no se corrosiva, por lo que se agregará un inhibidor de corrosión para proteger los elementos del sistema de distribución. Se estima que las pérdidas de carga asociadas a este proceso serán de 2 bar.

## 8. Proceso de dimensionado de bombas

### 8.1. Altura manométrica de la bomba

Para el dimensionado de la bomba en primer lugar se tiene que calcular la altura manométrica que debe alcanzar el fluido mediante la aportación de energía de la bomba. Para ello se requiere el uso de la siguiente expresión:

$$H_b = \frac{p_f - p_i}{\gamma} + \frac{v_f^2 - v_i^2}{2g} + (z_f - z_i) + \sum Hr$$

*Ecuación 8: Expresión de cálculo de la altura de manométrica*

Los términos  $f$  e  $i$  hacen referencia a los volúmenes de control. Donde  $i$  se refiere al punto inicial en el que la bomba comienza a impulsar al fluido, y  $f$  al punto final. En relación a los parámetros de la expresión se tienen las presiones ( $p$ ) finales e iniciales del agua, la diferencia de cota ( $z$ ) que en el caso de la bomba de alta presión y la booster es 0 ya que el tanto el tramo inicial de tubería y el final se encuentran a la misma altura, la variación de la velocidad ( $v$ ) a lo largo de las bombas (energía cinética) que se considera despreciable y el peso específico del agua  $\gamma = \rho * g$ , que para obtenerlo primero se necesita la densidad cuyo valor se podría suponer a los valores tabulados que se suelen utilizar, pero en el presente estudio se ha decidido utilizar una herramienta de cálculo facilitada por la Universidad de Michigan denominada Ocean Water Density Calculator. La herramienta demanda la introducción de la temperatura y TDS que presenta el agua y nos facilita el valor de la densidad. Dicho esto la expresión quedaría de la siguiente forma:

$$H_b = \frac{p_f - p_i}{\gamma} + (z_f - z_i) + \sum Hr$$

## 8.2. Cavitación

Un factor muy a tener en cuenta a la hora de dimensionar las bombas es la altura mínima de aspiración ( $NPSH_r$ ). Este factor siempre se facilita en las curvas características de la bomba ya que cuando la altura neta de aspiración disponible ( $NPSH_d$ ) es igual o menor a la dada por el fabricante, se producirá el fenómeno de la cavitación donde el agua alcanza su presión de vapor y se comienzan a formar burbujas que cuando alcanzan zonas de mayor presión regresan a estado líquido de manera repentina, provocando daños en las superficies de las tuberías o en componentes de las bombas. Por lo que cuando se esté realizando el proceso de selección de las bombas se determinará si la altura neta está por encima de la altura mínima dada por el fabricante. El cálculo de dicho parámetro se realiza mediante la siguiente expresión.

$$NPSH_d = \frac{P_a}{\gamma} + z_a + H_{ra} + \frac{P_s}{\gamma}$$

*Ecuación 9: Expresión de cálculo de la altura neta de aspiración*

Donde  $P_a$  es la presión de entrada de la bomba, teniendo en cuenta la presión atmosférica y la debida la columna de agua,  $z_a$  es la cota a la que se encuentra la aspiración,  $h_f$  es la pérdida en la línea de aspiración y  $P_s$  la presión de vapor del agua bombeada.

Sin embargo, existe otra forma de comparar ambas alturas, y se debe a que el valor de la altura mínima de aspiración se expresa en su propia curva característica en metros. Así que si se hace uso de la equivalencia de  $1 \text{ bar} = 10 \text{ metros de columna de agua}$  para pasar la presión de entrada a metros, podemos comparar ambas alturas y en el caso de que la neta sea mayor a la mínima implicará que no se producirá cavitación.

## 8.3. Dimensionado de la bomba booster

En este apartado se realizará el proceso de cálculo y selección de la bomba booster. Así pues, en primer lugar se requiere calcular la altura manométrica que debe alcanzar el fluido mediante la aportación de energía de la bomba. Para ello, en primer lugar se calcula la altura manométrica de la bomba. Teniendo en cuenta que:

- La diferencia de cota es tal que todos los elementos de la instalación se encuentran a la misma altura por lo que su valor es cero.
- Las pérdidas de carga en este caso tienen un valor tan bajo que no influyen de manera drástica en comparación al resto de términos de la expresión.

Por lo que la expresión queda de la siguiente forma:

$$H_{booster} = \frac{p_f - p_i}{\gamma}$$

Los valores de presión de entrada y salida de la bomba son obtenidos mediante el software de diseño del intercambiador de presión y del núcleo de desalación respectivamente.

$$p_i = 57,50 \text{ bar}$$

$$p_f = 58,95 \text{ bar}$$

El valor de densidad para determinar el peso específico se obtiene mediante la herramienta de cálculo Water Density Calculator. Mediante la introducción de la temperatura y el TDS que presenta el agua se obtiene el valor buscado.

Required Data Entry	
Water Temperature in Degrees	C <input type="text" value="19"/> F <input type="text" value="66.2"/>
Water Salinity (TDS)	<input type="text" value="40870"/> mg/L or PPM
<input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Clear Values"/>	
Calculated Results	
Water Density	<input type="text" value="1029.544"/> kg/m <sup>3</sup>

Figura 14: Interfaz de la herramienta de cálculo de la densidad (Fuente: Universidad de Michigan)

Así pues el valor obtenido es de 1029,544 kg/m<sup>3</sup>. Por otro lado se utilizará 9,81 m/s<sup>2</sup> como valor de la aceleración de la gravedad.

Una vez se tienen todos los datos requeridos se puede calcular la altura manométrica a alcanzar.

$$H_{booster} = \frac{(58,95 - 57,50) \text{ bar} \frac{10^5 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}}}{1029,544 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 14,36 \text{ m}$$

Y finalmente estos serían los datos necesarios para consultar a los distintos fabricantes:

<b>Altura manométrica (m)</b>	14,36
<b>Caudal bomba booster (m<sup>3</sup>/h)</b>	186,8
<b>Temperatura del agua (°C)</b>	19

*Tabla 16: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas booster (Fuente: Elaboración propia)*

A continuación se utilizarán estos datos en las distintas herramientas de selección de bombas facilitadas por los fabricantes.

### KSB

El primer fabricante elegido es KSB que presenta una herramienta de selección que se adapta al ámbito de actuación de la bomba. Esto permite indicar la actividad en la que estará operando y por consiguiente el propio programa impone las características del agua de trabajo. Hecho esto se introducen las condiciones de operación previamente definidas y la herramienta brinda las bombas que son capaces de trabajar en dichas circunstancias.

<b>Aplicación</b>	
Segmento	<input checked="" type="checkbox"/> Abastecimiento de agua *
Aplicación general	<input checked="" type="checkbox"/> Tratamiento de aguas *
Aplicación	<input checked="" type="checkbox"/> Desalinización de agua *
<b>Medio</b>	
agua, agua de mar y agua salobre, agua de mar	
Temperatura de trabajo	19,0 °C *
<b>Punto de trabajo</b>	
Caudal Q	186,80 m <sup>3</sup> /h *
Altura de elevación H	14,36 m * €
<b>Condiciones de funcionamiento</b>	
Altura estática	0,00 m H <sub>geo</sub>
NPSH disponible	m
Presión máxima de	0,00 bar.r

Figura 15: Interfaz de la herramienta "KSB EasySelect" (Fuente: [www.ksb.com](http://www.ksb.com))

El fabricante facilita varios modelos e indica los rendimientos que son capaces de alcanzar cada una de ellas. Se optó por la serie de MegaCPK más específicamente por el modelo MCPK150-125-315 que alcanza un rendimiento del 81,1%. Una vez seleccionada se muestran las curvas características propias de la bomba, en ellas se puede observar una marca que indica de manera exacta en qué condiciones se encuentra operando.



Figura 16: Imagen del modelo MCPK150-125-315 del fabricante KSB (Fuente: [www.ksb.com](http://www.ksb.com))

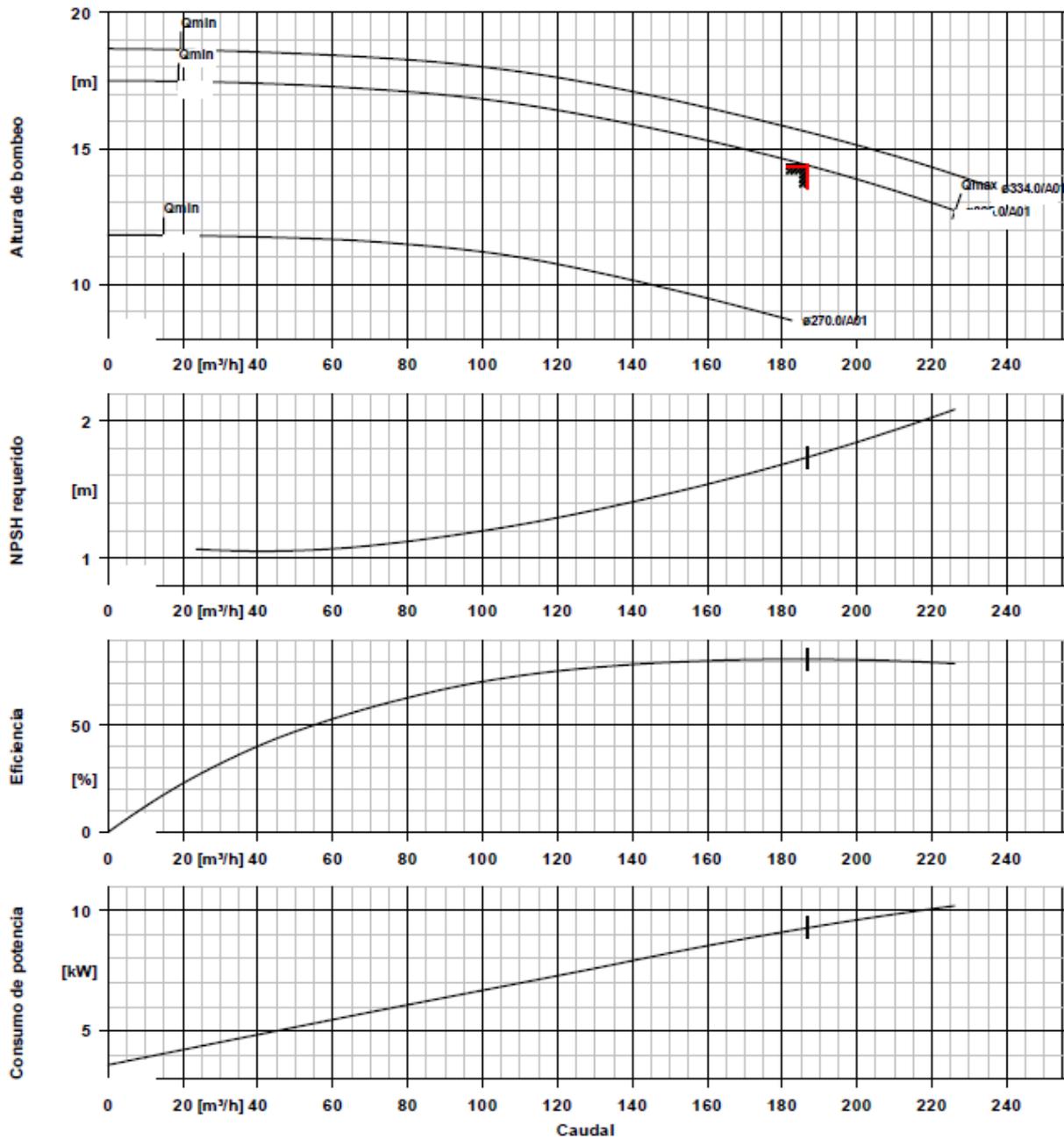


Figura 17: Curvas características obtenidas para la bomba MCPK150-125-315 (Fuente: [www.ksb.com](http://www.ksb.com))

## Grundfos

Este fabricante también cuenta con una herramienta que permite seleccionar los productos denominada Grundfos Product Center. La introducción de datos se realiza de manera semejante al fabricante anterior aunque en este caso no permite definir de manera exacta la actividad que va a desarrollar la bomba, no obstante se impone que tendrá una aplicación industrial y se fija el fluido de trabajo y las condiciones que este presenta. Este sería parte del interfaz que se puede manejar.

<b>Introduzca punto de trabajo:</b>		<b>Selec. dimensionam. por:</b>	
Caudal (Q)*	<input type="text" value="187"/> <input type="text" value="m³/h"/>	<input checked="" type="radio"/> Dimension. por aplicación	<input type="text" value="Aumento de presión"/>
Altura (H)*	<input type="text" value="14.36"/> <input type="text" value="m"/>	Diseño preferido	<input type="text" value="Bombas"/>
Número de bombas	<input type="text" value="1"/>	<input type="radio"/> Dimension. por diseño bomba	
Número de bombas de reserva	<input type="text" value="0"/>	<input type="radio"/> Dimension. por familia bomba	

Figura 18: Interfaz del buscador "Grundfos Webcaps" (Fuente: [www.product-selection.grundfos.com](http://www.product-selection.grundfos.com))

A partir de los datos introducidos se obtiene que una lista de bombas que son capaces de trabajar bajo las condiciones dadas. De la totalidad de la lista, el modelo que alcanza un mayor rendimiento es el NB 100-250/274 EUP A-F2-A-E-BAQE con un valor de 72,1% que se puede observar en las curvas características de la bomba.



Figura 19: Imagen del modelo NB 100-250/274 del fabricante Grundfos (Fuente: Grundfos Webcaps)

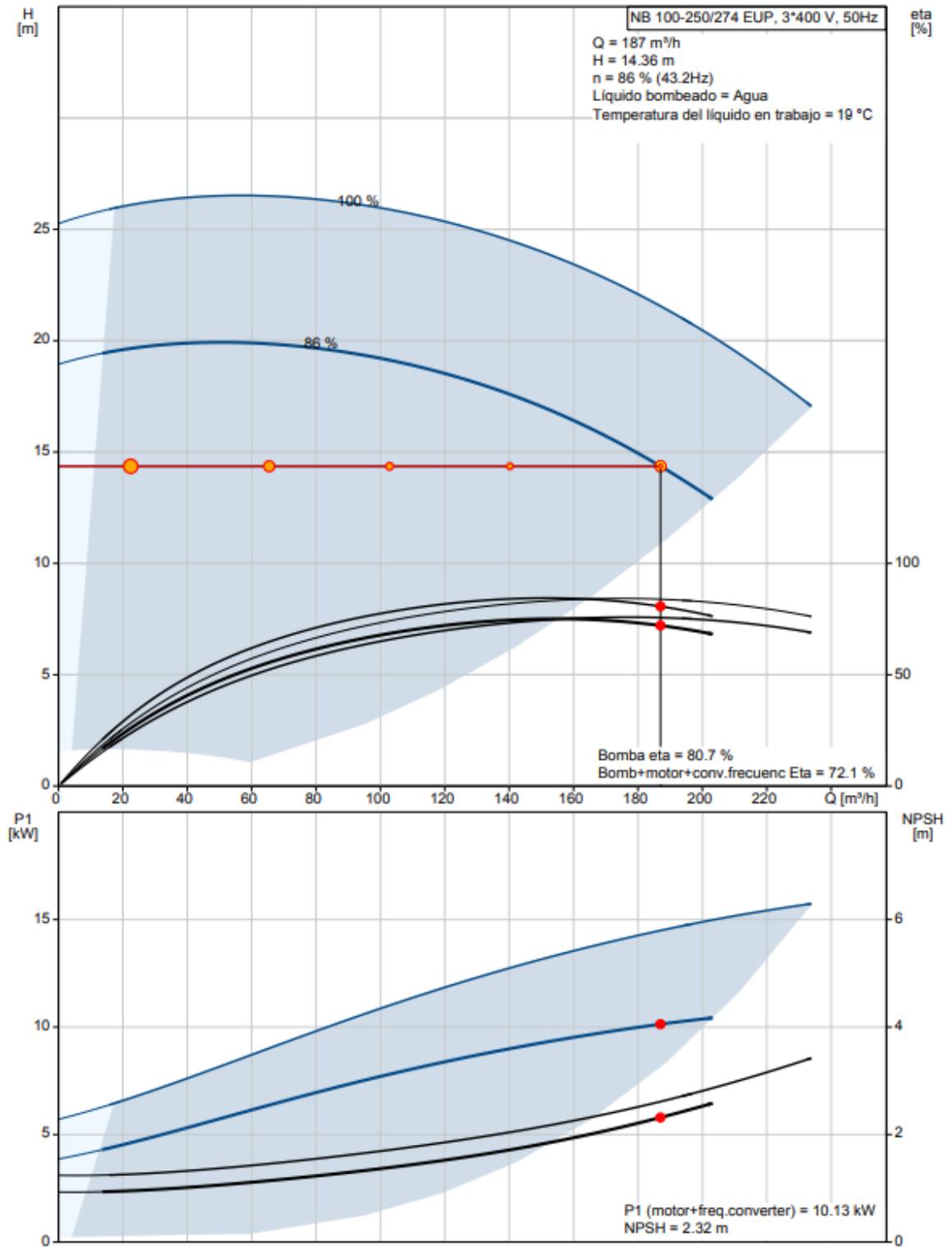


Figura 20: Curvas características obtenidas para la bomba NB 100-250/274 (Fuente: Grundfos Webcaps)

### Lowara

Este fabricante también ofrece una herramienta de selección denominada Xylect que opera de manera similar a las previamente utilizadas. Cuenta con una interfaz donde se establecen tanto los datos de operación de la bomba como los del fluido de trabajo.

Punto de servicio		Datos de fluidos	
CAUDAL TOTAL DE DISEÑO		FLUIDO BOMBEADO	
186,8	m <sup>3</sup> /h	agua de mar	
ALTURA DE IMPULSIÓN TOTAL		TEMPERATURA	DENSIDAD
14,36	m	19 °C	1029,544 kg/m <sup>3</sup>

Figura 21: Interfaz del buscador "Xylect" (Fuente: [www.xylect.com](http://www.xylect.com))

Una vez se ha realizado el proceso de selección en función de estos parámetros, se obtiene que la bomba cuya denominación es NSCF 125-250/110/P45VCC4 es la que alcanza un mayor rendimiento (85,25%). Y sus curvas características son las siguientes:



Figura 22: Imagen del modelo NSCF 125-250/110 del fabricante Lowara ([www.lenntech.com](http://www.lenntech.com))

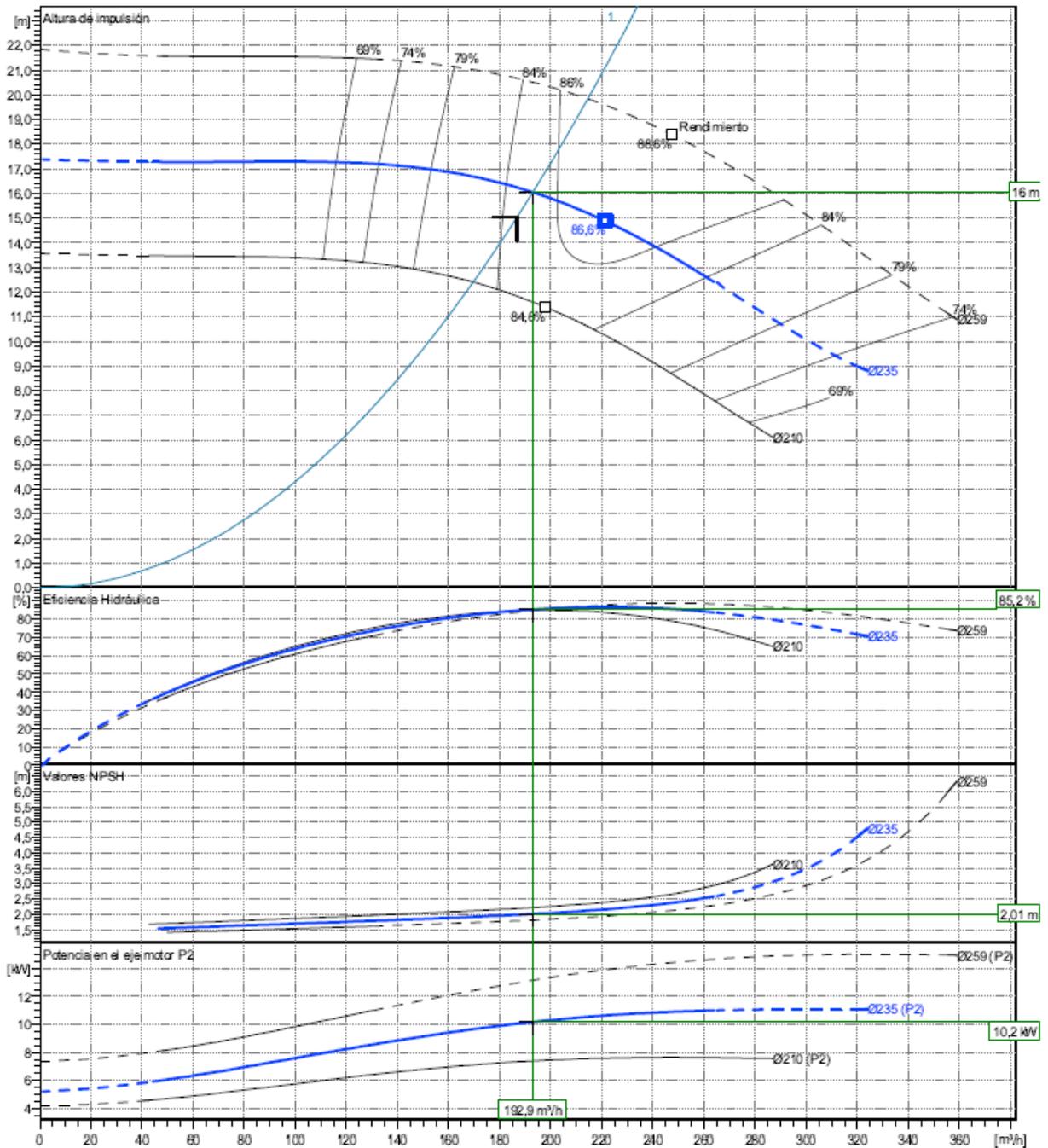


Figura 23: Curvas características obtenidas para la bomba NSCF 125-250/110 (Fuente:

[www.xylect.com](http://www.xylect.com))

Del mismo modo que en las curvas de otros fabricantes se indica los parámetros de la bomba en el punto de funcionamiento fijado.

Una vez recogidos los datos de todos los fabricantes se obtiene que:

Fabricante	Modelo	Rendimiento (%)
KSB	MCPK150-125-315	81,1
Grundfos	NB 100-250/274	72,1
Lowara	NSCF 125-250/110/P45VCC4	85,25

Tabla 17: Tabla resumen de los modelos de bomba booster (Fuente: Elaboración propia)

Por tanto observando los resultados obtenidos, se deduce que la bomba más idónea es la suministrada por el fabricante Lowara ya que su modelo es el que presenta un mayor rendimiento. Así pues será la seleccionada para operar como bomba Booster en la planta que se encuentra bajo estudio con un rendimiento de 85,25%.

El NPSH<sub>r</sub> de la bomba seleccionada es de 2,01 metros. Y Como la presión de entrada a la bomba es de 57,5 bar que equivale 575 metros de columna de agua, no se producirá cavitación.

En la siguiente tabla se facilitan los valores más relevantes de la bomba.

Fabricante	Lowara
Modelo	NSCF 125-250/110/P45VCC4
Rendimiento (%)	85,25
Potencia Eléctrica Motor (kW)	11 kW

Tabla 18: Datos de la bomba booster seleccionada (Fuente: Elaboración propia)

#### 8.4. Dimensionado de la bomba de alta presión (BAP)

Para el dimensionado de la bomba de alta presión se repetirá nuevamente el procedimiento realizado para el cálculo y selección de la bomba Booster. Así pues en primer lugar se volverá a calcular la densidad del fluido de trabajo y se definirá la altura manométrica que tiene que alcanzar la bomba. El cálculo se realizará siguiendo la misma expresión utilizada en el apartado anterior y se tendrán en cuenta lo siguiente:

- La bomba se encuentra a la misma altura que el resto de los elementos de la instalación por lo que su cota se considera 0.

Además se requiere la adición de una nueva condición para el dimensionada de esta bomba con el fin de garantizar su correcto funcionamiento.

Se requiere fijar la presión de entrada la bomba con un valor de 2 bar con el fin de evitar que se produzca el fenómeno de la cavitación. Este valor se compara con el parámetro  $NPSH_r$  dado en la curva característica de la bomba para garantizar que no se produzca este fenómeno bajo las condiciones de operación dadas.

Así pues según los datos facilitados por el software de dimensionado membranas tenemos que la presión de salida de la bomba de alta presión es de 57,82 bar y el valor de TDS del agua de alimentación es de 38810,288 mg/l.

Volvemos a calcular el valor de densidad mediante la herramienta Ocean Water Density.

$$\rho = 1027,965 \text{ kg/m}^3$$

Y ahora conocidos todos los parámetros de la expresión de la altura se puede calcular el valor de esta.

$$H_{AP} = \frac{(58,95 - 2) \text{ bar} \frac{10^5 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}}}{1027,965 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 564,74 \text{ m}$$

Nuevamente una vez calculada la altura de la bomba, se definen los parámetros de operación con los que debe trabajar la bomba y se consultan con los distintos fabricantes con el fin de seleccionar el modelo que alcance un mayor rendimiento.

<b>Altura manométrica (m)</b>	564,74
<b>Caudal bomba booster (m3/h)</b>	155,8
<b>Temperatura del agua (°C)</b>	19

*Tabla 19: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de alta presión (Fuente: Elaboración propia)*

El proceso de selección se realizará con los mismos fabricantes utilizados para la bomba Booster por lo que no se volverá a incluir la explicación de la introducción de datos en las diversas herramientas de selección de bombas.

KSB

En este caso KSB únicamente ofrece una serie de bombas capaz de trabajar bajo estas condiciones. Se denomina Multitec y dentro de su rango de aplicaciones se encuentran los procesos de ósmosis inversa. El modelo en cuesti3n se llama Multitec RO A 100-8.1, alcanza un rendimiento de 75,59% y la siguiente figura indica sus curvas características.

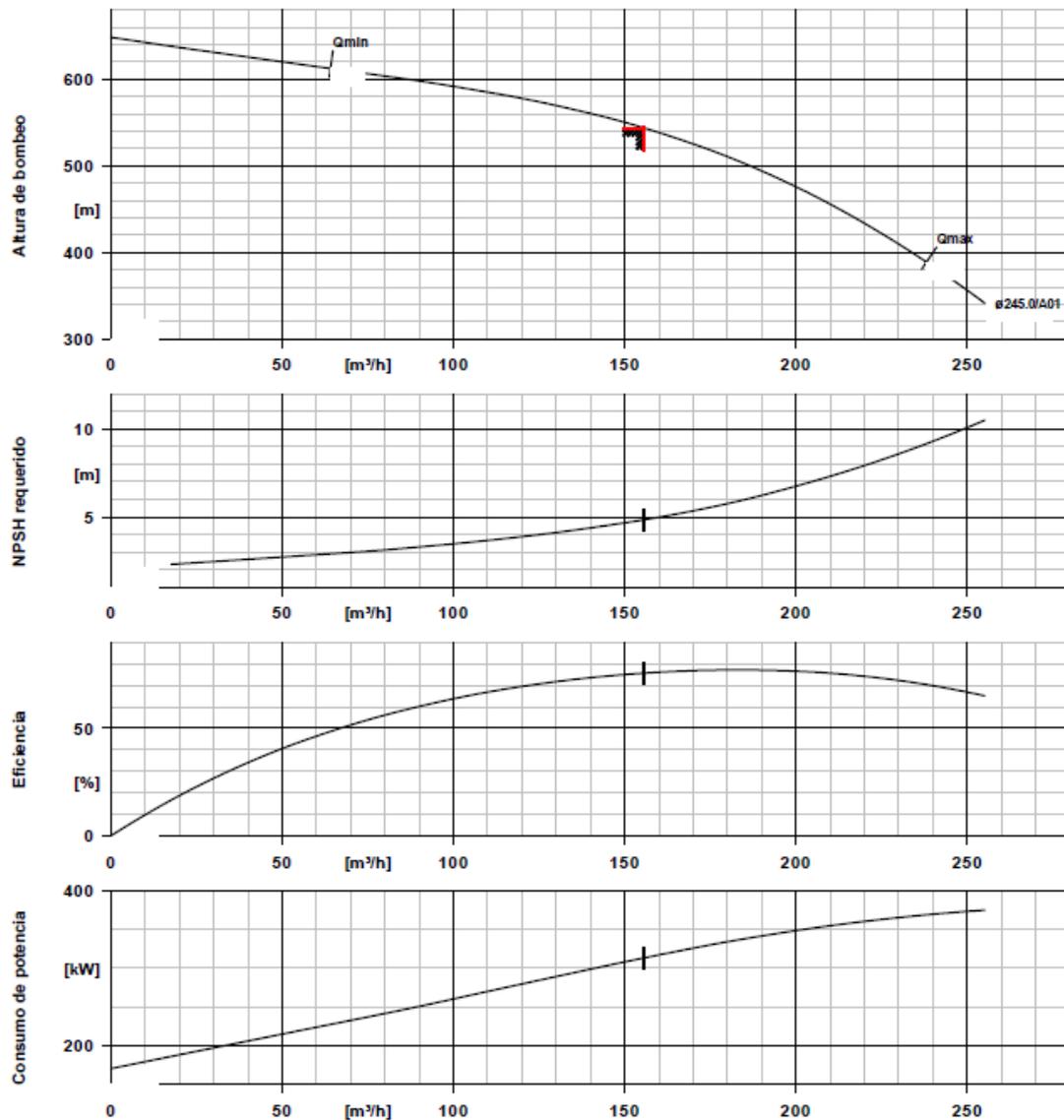


Figura 24: Curvas características obtenidas para la bomba Multitec RO A 100-8.1 (Fuente: [www.ksb.com](http://www.ksb.com))



Figura 25: Imagen del modelo Multitec RO A 100-8.1 del fabricante KSB (Fuente: [www.ksb.com](http://www.ksb.com))

### Grundfos

En este caso el fabricante no ha sido capaz de suministrar una bomba capaz de trabajar bajo las condiciones impuestas por lo que lo descartamos del proceso de selección.

### Lowara

Mediante la herramienta de selección Xylect se seleccionó la bomba MPAE100A/10/BF3550/W25VDCC4 que presenta un rendimiento de 74,4%. Y sus curvas características se muestran continuación.

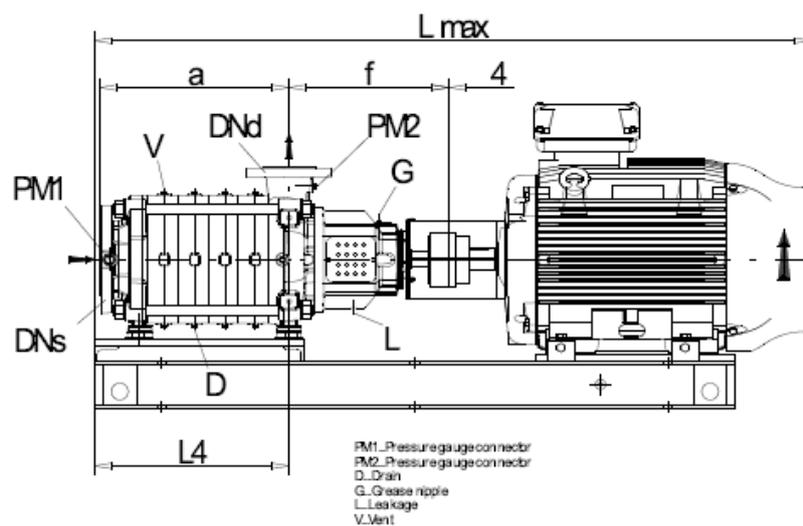


Figura 26: Imagen del modelo MPAE 100A/10/BF3550 del fabricante Lowara (Fuente: [www.xylect.com](http://www.xylect.com))

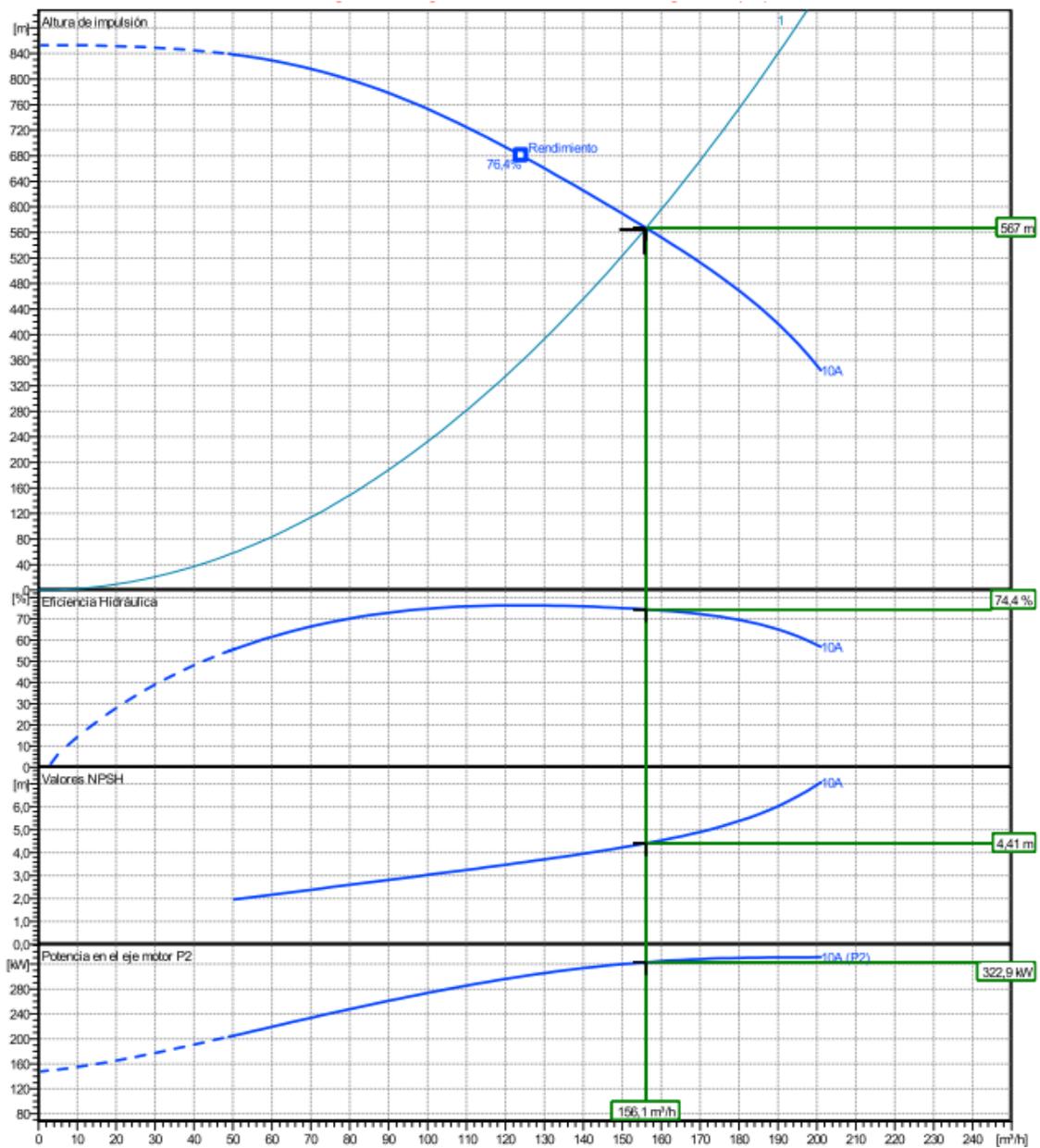


Figura 27: Curvas características obtenidas para la bomba MPAE100A/10/BF3550/W25VDCC4 (Fuente: [www.xylect.com](http://www.xylect.com))

Observando los rendimientos obtenidos por los modelos obtenidos se optó por consultar más fabricantes para garantizar que los rendimientos bajo estas condiciones se encuentran en un mismo margen.

Por ello se consultó el fabricante Flowserve que es reconocido a nivel mundial y además cuenta con una herramienta de selección de bombas.

Flowserve

Esta compañía facilita una herramienta de selección denominada Affinity. En la misma mediante la introducción de los datos de operación de la bomba e imponiendo el tipo de líquido de trabajo se obtiene una lista de las series de bombas que son capaces de trabajar de manera óptima bajo las condiciones dadas. La serie seleccionada es la DMX y dentro de la misma se selecciona el modelo que alcance un mayor rendimiento, que en este caso es el 3X10DMX-F con un rendimiento del 77,7%.

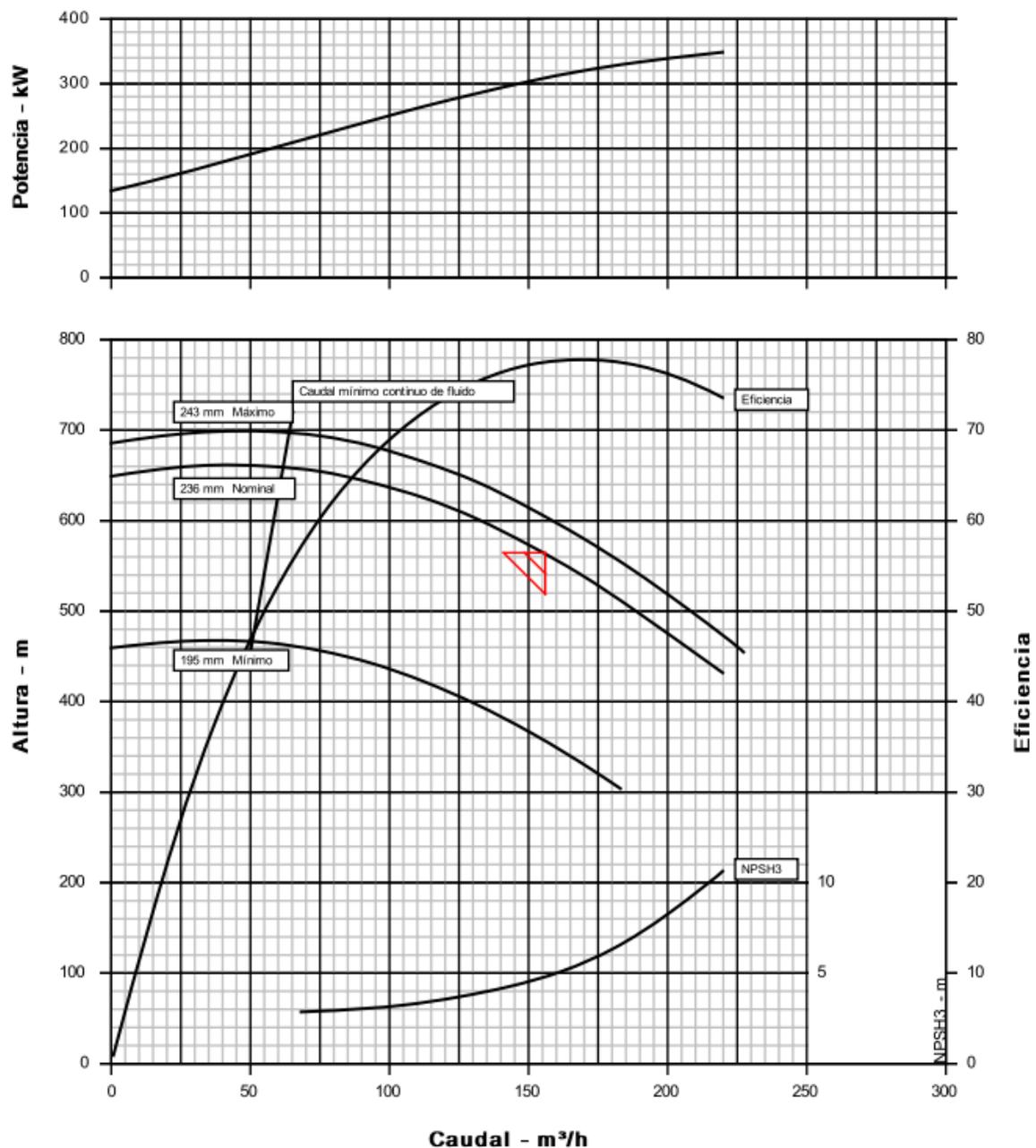


Figura 28: Curvas características obtenidas para la bomba 3X10DMX-F (Fuente: Affinity)



*Figura 29: Imagen del modelo 3X10DMX-F del fabricante Flowserve (Fuente: [www.flowserve.com](http://www.flowserve.com))*

Una vez consultados todos los fabricantes se elabora la siguiente tabla:

Fabricante	Modelo	Rendimiento (%)
<b>KSB</b>	Multitec RO A 100-8.1	75,59
<b>Grundfos</b>	-	-
<b>Lowara</b>	MPAE100A/10/BF3550/W25VDCC4	74,4
<b>Flowserve</b>	3X10DMX-F	77,7

*Tabla 20: Tabla resumen de los modelos de bomba de alta presión (Fuente: Elaboración propia)*

Nuevamente se realiza el proceso de selección en función de la premisa de trabajar con el modelo de mayor rendimiento. Una vez consultada la tabla anterior, se realiza una comparativa de todos los modelos y se llega a la conclusión de que el modelo 3X10DMX-F del fabricante Flowserve es el más adecuado para el presente estudio ya que presenta un rendimiento del 77,7%.

Como se comentó anteriormente se fijó la presión de entrada de la bomba a 2 bar que equivale a 20 metros de columna de agua. Y el  $NPSH_r$  de la bomba elegida está entorno a unos 5 metros por lo que no habrá riesgo de cavitación.

Se elabora una tabla donde se exponen las especificaciones más importantes del modelo elegido para trabajar como bomba de alta presión.

<b>Fabricante</b>	Flowserve
<b>Modelo</b>	3X10DMX-F
<b>Rendimiento (%)</b>	77,7
<b>Potencia Eléctrica Motor (kW)</b>	350

*Tabla 21: Datos de la bomba de alta presión seleccionada (Fuente: Elaboración propia)*

## 8.5. Dimensionado de la bomba de captación

Para el dimensionado de la bomba de captación se aplicará el mismo procedimiento que para las otras bombas ya seleccionadas. Primero se tiene que calcular la altura manométrica que tiene que alcanzar la misma, para ello se ha tenido en cuenta los siguientes aspectos.

- La bomba se encuentra a una costa distinta al resto de elementos de la instalación por lo que se toma como diferencial de cota la profundidad que presenta el pozo, 40 metros.
- Como consecuencia del paso del fluido por una etapa de pretratamiento se añade una caída de presión de 2 bar antes de la entrada del fluido en la bomba de alta presión. Después de haber estudiado distintos filtros se llega a la conclusión de que el valor de pérdida de presión puede ser menor al fijado pero el dimensionado de la bomba se realizará en las condiciones más desfavorables con el fin de asegurar la presión final requerida.
- La presión de entrada a la bomba de alta presión tiene que ser de 2 bar para evitar el fenómeno de cavitación.
- Con relación a la presión de entrada de la bomba se tomará la de la superficie libre del líquido dentro del pozo.
- Al tratarse de una bomba sumergible se supone que la columna de agua que se encuentra encima de ella evita que se produzca el fenómeno de la cavitación.

Una vez que se han impuesto las condiciones necesarias se puede calcular la altura manométrica que debe vencer la bomba.

$$H_{captación} = \frac{p_f - p_i}{\gamma} + (z_f - z_i) + H_{r,captación} + H_{r,colector} + H_{r,accesorios}$$

$$H_{captación} = \frac{(4 - 0) \text{ bar} \cdot \frac{10^5 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}}}{1027,965 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + (40 - 0) \text{ m} + 0,2009 \text{ m} \\ + 0,085 \text{ m} + 0,1711 \text{ m}$$

$$H_{captación} = 80,12 \text{ m}$$

Así pues las condiciones de operación de la bomba serán las siguientes:

<b>Altura manométrica (m)</b>	80,12
<b>Caudal bomba de captación (m<sup>3</sup>/h)</b>	171,36
<b>Temperatura del agua (°C)</b>	19

Tabla 22: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de captación (Fuente: Elaboración propia)

Ahora se repite el mismo procedimiento de selección utilizado para el resto de bomba de instalación. Se consultarán los fabricantes KSB, Grundfos y Lowara.

### Grundfos

La herramienta online de este fabricante una vez se imponía que la bomba debía de ser sumergible no permitía imponer el fluido de trabajo ni la aplicación deseada por lo que las curvas características obtenidas y su punto de funcionamiento no son correctos para las condiciones de operación que realmente debía de tener la bomba. Por lo que no se tuvo en cuenta a la hora de realizar el proceso de selección.

KSB

Mediante la herramienta de selección de bombas se ha podido fijar la aplicación que va a tener la misma y fluido de trabajo por lo que el fabricante nos ofrece directamente bombas que puedan trabajar en estas condiciones. En este caso se ha impuesto como aplicación extracción de agua salada mediante bomba sumergible. El modelo que mayor rendimiento alcanza es el UPA 250C-150, con un valor de 80,10%. A continuación, se facilitan las curvas características de dicho modelo.

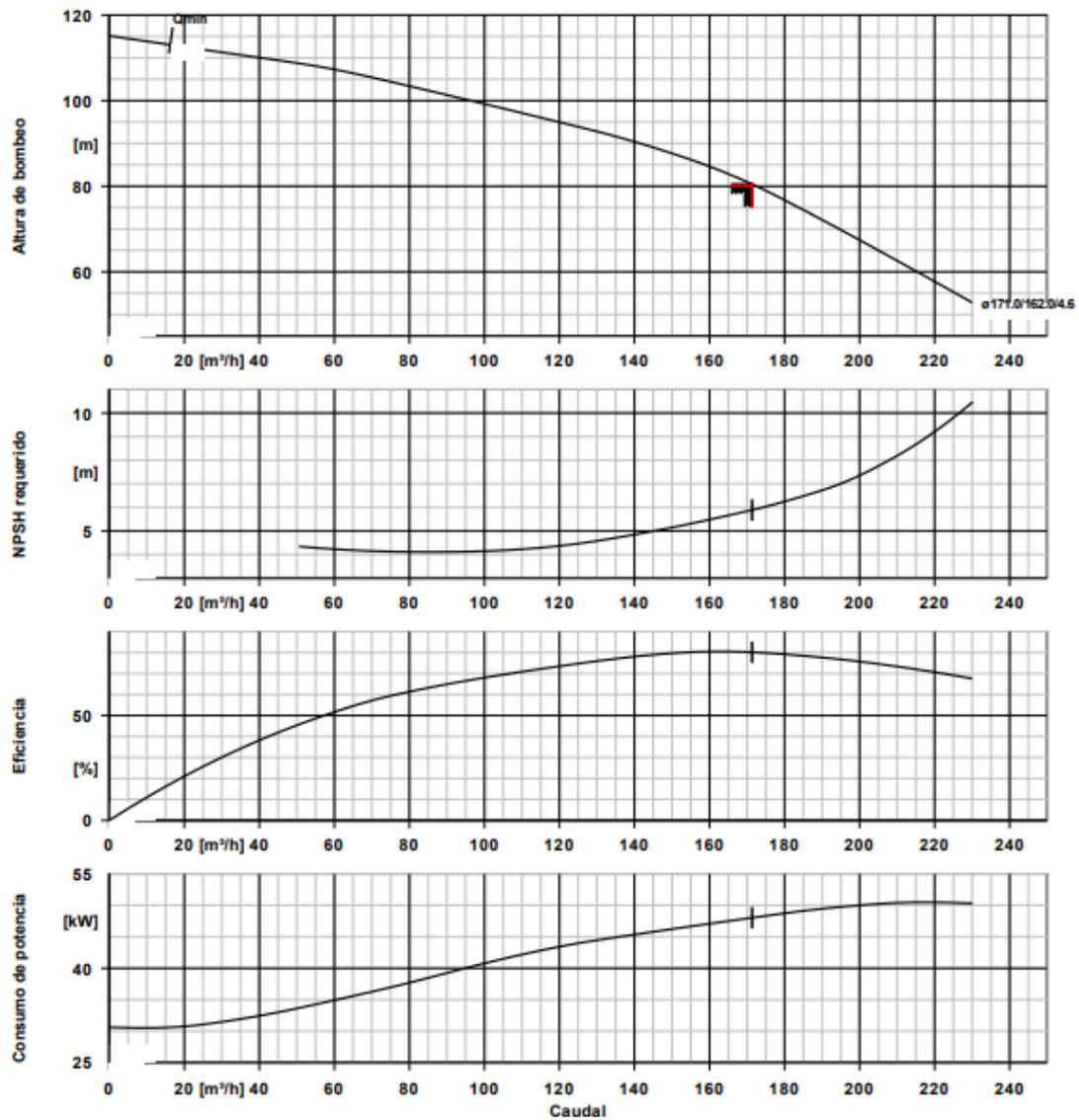


Figura 30: Curvas características obtenidas para la bomba UPA 250C-150 (Fuente: [www.ksb.com](http://www.ksb.com))



Figura 31: Imagen del modelo UPA 250C-150 del fabricante KSB (Fuente: [www.ksb.com](http://www.ksb.com))

### Lowara

Mediante la herramienta de selección Xylect se impusieron las condiciones de operación de la bomba y se fijó la serie destinada a trabajar como bombas sumergibles. De todos los modelos presentes en la serie, el que alcanzaba mayor rendimiento es el Z10220 3/2B-L8W con un valor de 81,40%. Sus curvas características son las siguientes:

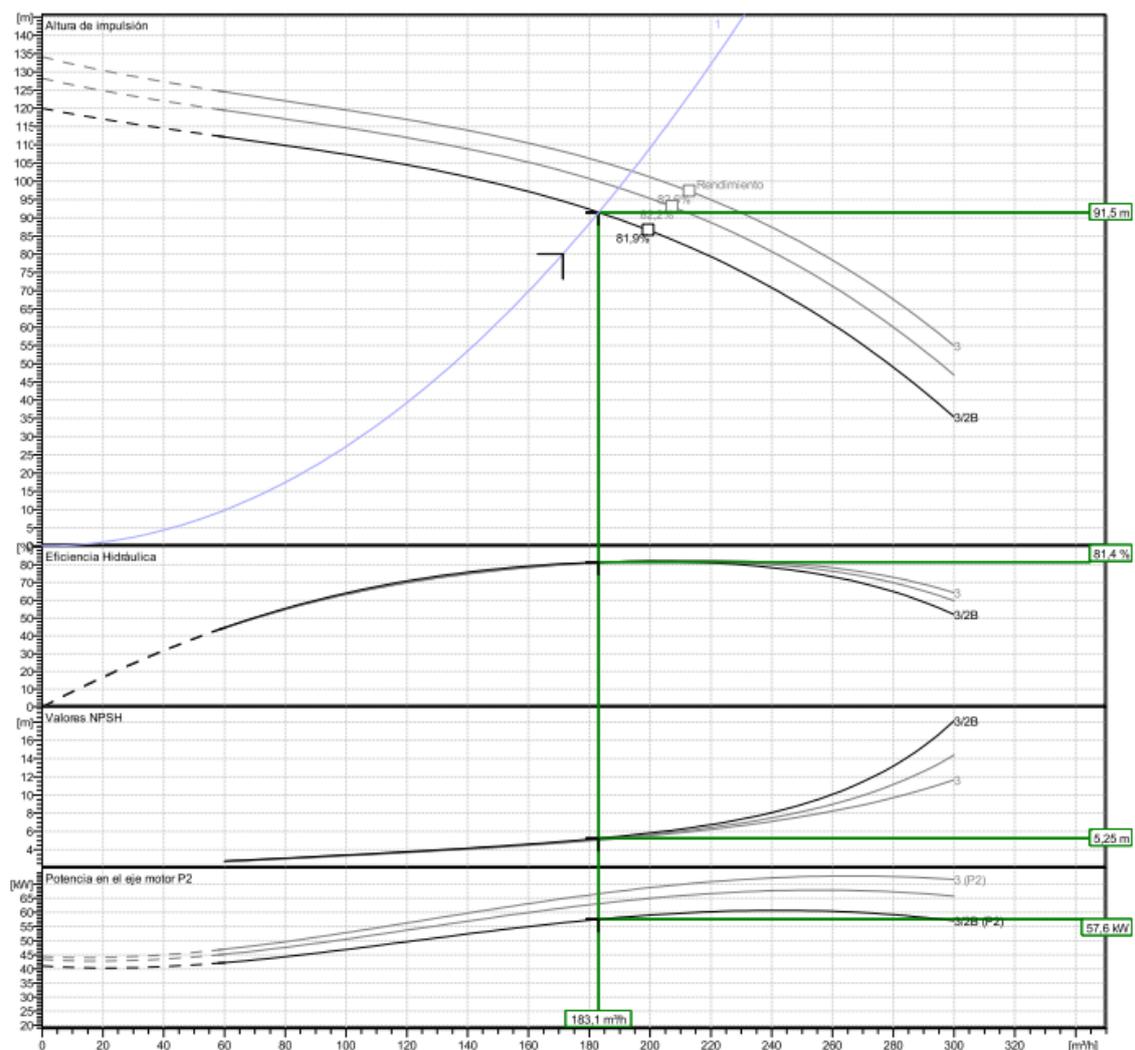


Figura 32: Curvas características obtenidas para la bomba Z10220 3/2B-L8W (Fuente: [www.xylect.com](http://www.xylect.com))



Figura 33: Imagen del modelo Z10220 3/2B-L8W del fabricante Lowara (Fuente: [www.xylect.com](http://www.xylect.com))

Una vez consultados todos los fabricantes se elabora la siguiente tabla:

Fabricante	Modelo	Rendimiento (%)
KSB	UPA 250C-150	80,10
Grundfos	-	-
Lowara	Z10220 3/2B-L8W	81,40

Tabla 23: Tabla resumen de los modelos de bomba de captación (Fuente: Elaboración propia)

Y se selecciona el modelo que alcance un mayor rendimiento. En este caso únicamente podemos hacer la comparativa de dos modelos ya que el fabricante Grundfos no fue capaz de facilitar bomba que trabajase en las condiciones dadas. Así pues se llega a la conclusión de que el modelo Z102203/2B-L8W del fabricante Lowara es la opción más adecuada ya que presenta un rendimiento del 81,40%. Ahora se elabora una tabla donde se exponen las especificaciones más relevantes del modelo elegido para trabajar como bomba de captación.

Fabricante	Lowara
Modelo	Z102203/2B-L8W
Rendimiento (%)	81,40
Potencia Eléctrica Motor (kW)	60 kW

Tabla 24: Datos de la bomba de captación (Fuente: Elaboración propia)

## 8.6. Dimensionado de la bomba previa al postratamiento

Como se comentó en el anexo 1, el permeado obtenido del proceso de desalación sale a una presión de 0 bar. Esto implica que si se realiza una etapa de postratamiento antes de la entrada del flujo en el sistema de distribución podría producirse cavitación.

Para evitar esto se instalará una bomba que se encargará de elevar la presión del permeado a un valor superior a las pérdidas de carga que presenta el tratamiento. Como se comentó en el alcance no se tendrán en cuenta las conducciones en el interior de la EDAM por lo que la bomba se dimensionará teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- La salida del flujo permeado y la etapa de postratamiento se encuentra a la misma altura.
- La presión de salida de la bomba será de 2 bar para hacer frente a las pérdidas de carga del postratamiento y evitar así la cavitación.
- No se tendrán en cuenta las pérdidas asociadas a tuberías o accesorios ya que en el alcance se impone que estos elementos no contemplan.

Teniendo en cuenta esto, el cálculo de la altura manométrica de la bomba se realiza de la siguiente forma. Pero antes de debe determinar la densidad que presenta el flujo de permeado.

$$\rho_{\text{permeado}} = 998,619 \text{ kg/m}^3$$

$$H_{\text{prepost.}} = \frac{p_f - p_i}{\gamma}$$

$$H_{\text{prepost.}} = \frac{(2 - 0)\text{bar} \frac{10^5 \text{Pa}}{1 \text{bar}}}{998,619 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2} = 20,42 \text{ m}$$

Así pues las condiciones de operación de la bomba serán las siguientes:

<b>Altura manométrica (m)</b>	20,42
<b>Caudal bomba de pre-postratamiento (m3/h)</b>	154,16
<b>Temperatura del agua (°C)</b>	19

*Tabla 25: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de pre-postratamiento (Fuente: Elaboración propia)*

Y nuevamente se realiza el proceso de selección de bombas ya descrito previamente.

### KSB

En este caso el selector de bombas no permitía consultar las bombas que presentaban mayor rendimiento para las condiciones impuesta. Y las pocas que se podían consultar tenían unos rendimientos muy bajo por lo que se decidió descartar este fabricante.

### Grundfos

Mediante su herramienta de selección de bombas, se impusieron las condiciones de trabajo y se facilitaron diversos modelos, de los cuales se eligió el que presentase mayor rendimiento. Así pues se seleccionó el modelo NB 100-250/274 EUP A-F2-A-E-BQQE que alcanza un rendimiento de 75,2%.



*Figura 34: Imagen del modelo NB 100-250/274 EUP del fabricante Grundfos (Fuente: Grundfos Webcaps)*

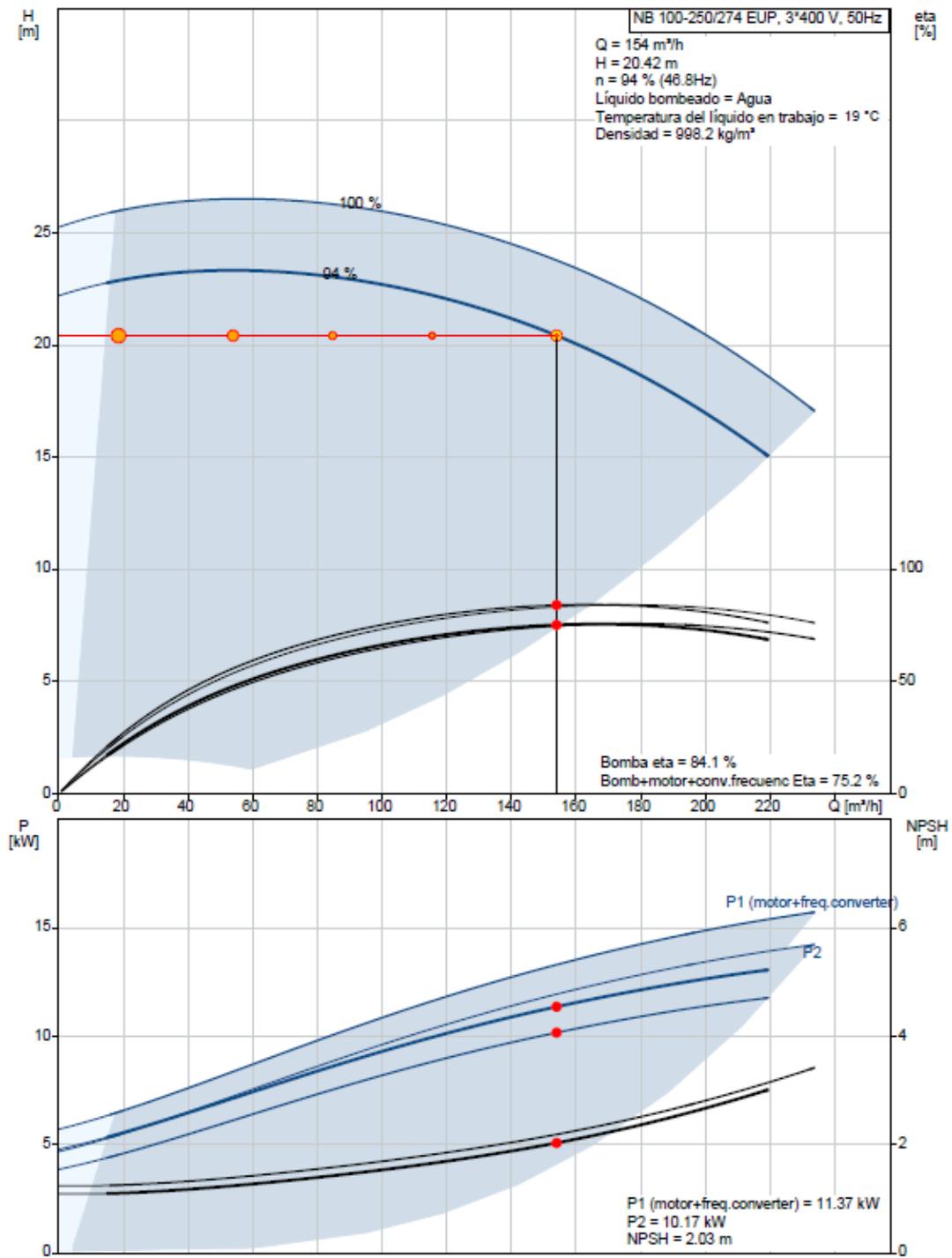


Figura 35: Curvas características obtenidas para la bomba NB 100-250/274 EUP (Fuente: Grundfos Webcaps)

Lowara

Se impone las condiciones del fluido de trabajo y la serie que es capaz de trabajar bajo las mismas y se obtiene un listado de las bombas que son capaces de trabajar con los rendimientos más altos. Se seleccionó el modelo NSCF 100-315/110/P45VCC4 que tiene un rendimiento del 78,9% y sus curvas características son las siguientes:

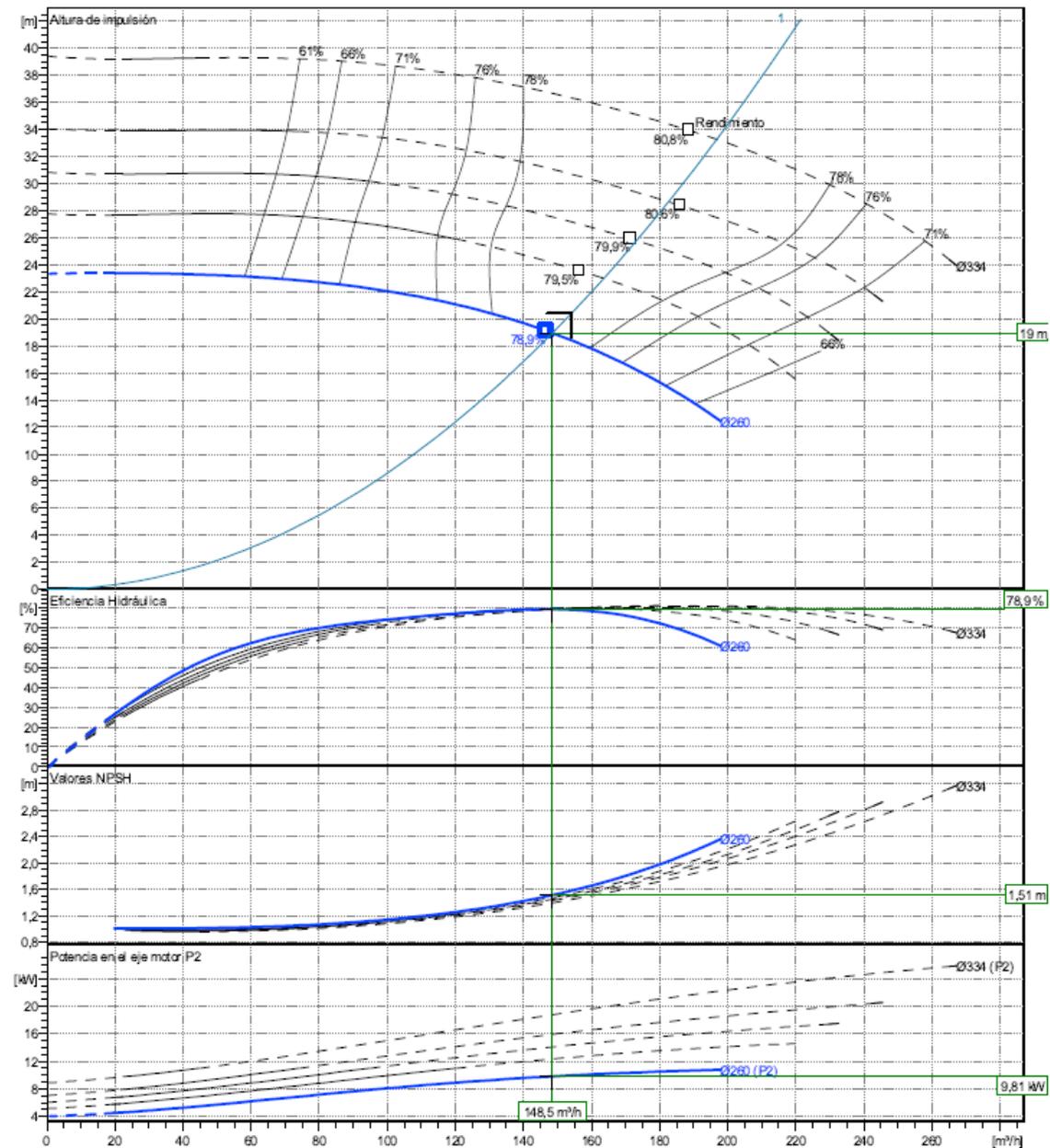


Figura 36: Curvas características obtenidas para la bomba NSCF 100-315/110/ P45VCC4 (Fuente: www.xylect.com)



Figura 37: Imagen del modelo NSCF 100-315/110/P45VCC4 del fabricante Lowara (Fuente: [www.xylect.com](http://www.xylect.com))

Ya conocidos todos los modelos y rendimientos que presentan las bombas de cada fabricante se puede elaborar la siguiente tabla:

Fabricante	Modelo	Rendimiento (%)
KSB	-	-
Grundfos	NB 100-250/274 EUP A-F2-A-E-BQQE	75,2
Lowara	NSCF 100-315/110/P45VCC4	78,9

Tabla 26: Tabla resumen de los modelos de bomba de pre-postratamiento (Fuente: Elaboración propia)

En vista de los resultados obtenidos se elige el modelo NSCF 100-315/110/P45VCC4 del fabricante Lowara al tener mayor rendimiento. Para finalizar se elabora una tabla donde se recogen los datos más relevantes de la bomba.

Fabricante	Lowara
Modelo	NSCF 100-315/110/P45VCC4
Rendimiento (%)	78,9
Potencia Eléctrica Motor (kW)	11 kW

Tabla 27: Datos de la bomba de pre-postratamiento seleccionada (Fuente: Elaboración propia)

## 8.7. Dimensionado de la bomba de distribución

Siguiendo las mismas directrices se calcula la altura manométrica que debe vencer la bomba de distribución. No obstante como se hizo previamente se imponen una serie de aspectos a tener en cuenta:

- Existe una diferencia de cota entre los elementos de la instalación, que supondrá dentro del cálculo de la altura manométrica, el valor de mayor peso.
- En este caso la presión de salida del permeado es igual a la del depósito por lo que el término referido a la presión quedará anulado.

Teniendo en cuenta los aspectos impuestos la expresión del cálculo de la altura manométrica quedará de la siguiente forma.

$$H_{distribución} = (z_f - z_i) + H_{r,distribución} + H_{r,accesorios}$$

$$H_{distribución} = 30 \text{ m} + 4,1875 \text{ m}$$

$$H_{distribución} = 34,1875 \text{ m}$$

Así pues las condiciones de operación de la bomba serán las siguientes:

<b>Altura manométrica (m)</b>	34,1875
<b>Caudal bomba distribución (m<sup>3</sup>/h)</b>	154,16
<b>Temperatura del agua (°C)</b>	19

*Tabla 28: Datos requeridos para realizar la comparativa de bombas de distribución (Fuente: Elaboración propia)*

Una vez se tienen dichos se pueden consultar los fabricantes y seleccionar la bomba que presenta mejor rendimiento dada la situación. Como este procedimiento se ha realizado en varias ocasiones durante el desarrollo del presente proyecto no se explicará el funcionamiento y el proceso de introducción de datos en las herramientas de selección de bombas facilitadas por los fabricantes.

KSB

Una vez introducidos todos los datos e impuesto la aplicaci3n de la bomba. El software nos brinda una serie de bombas que son capaces de trabajar bajo esas condiciones. En este caso se seleccion3 la Multitec A125/2-10.2.30.81 que alcanza un rendimiento del 79,61%. Dicho valor se puede observar en sus curvas caracterfsticas.

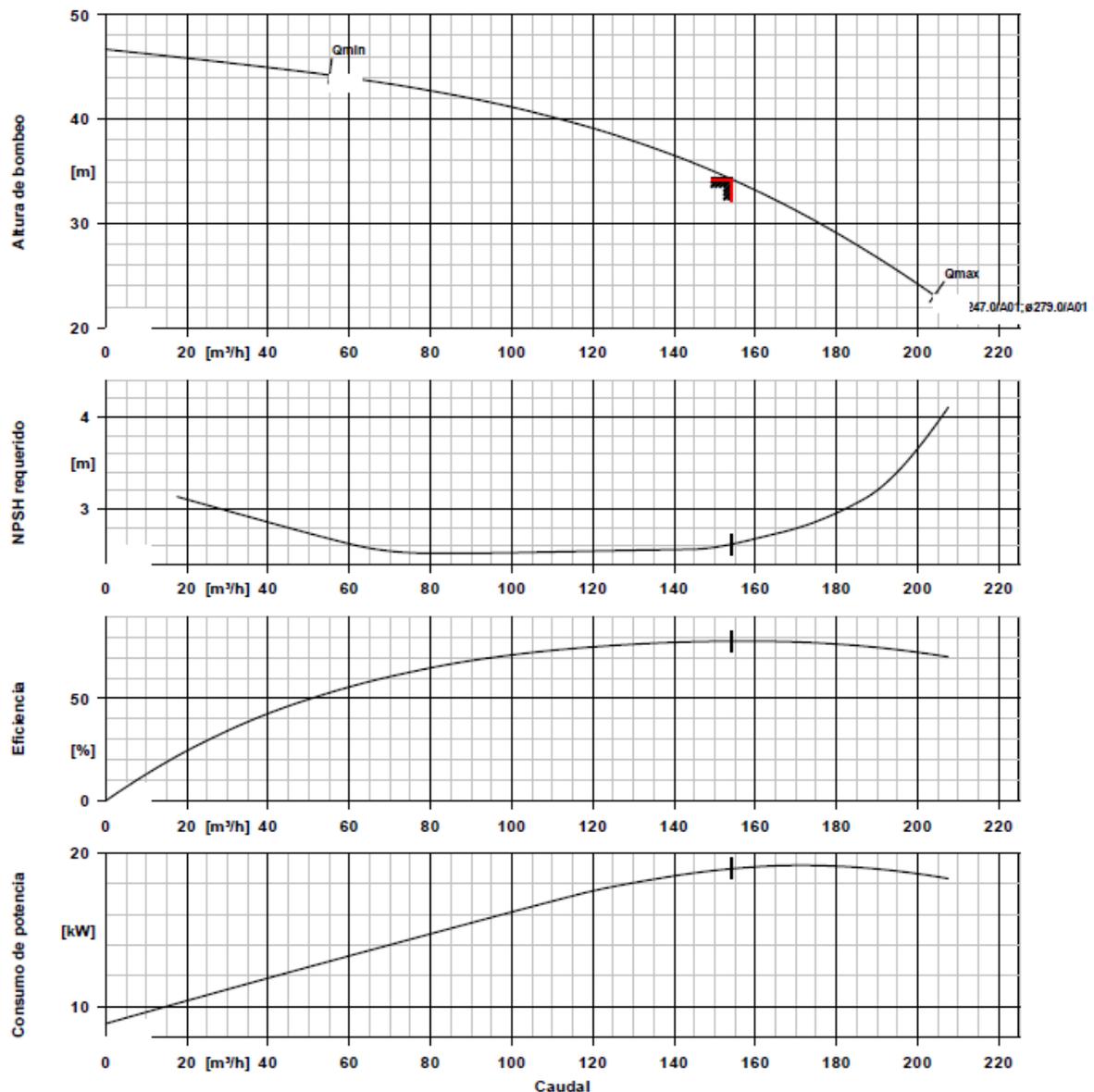


Figura 38: Curvas caracterfsticas obtenidas para la bomba Multitec A125/2-10.2.30.81 (Fuente: [www.ksb.com](http://www.ksb.com))

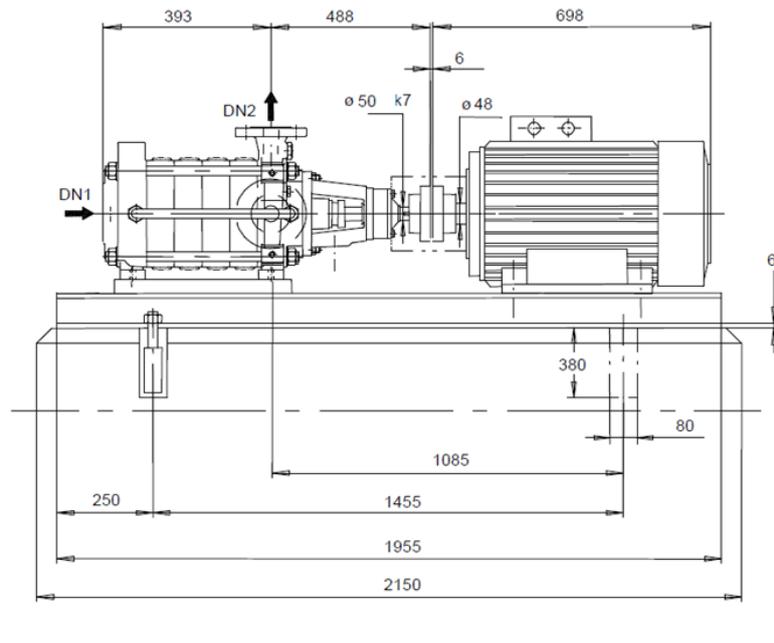


Figura 39: Imagen del modelo Multitec A125/2-10.2.30.81 del fabricante KSB (Fuente: [www.ksb.com](http://www.ksb.com))

### Grundfos

Mediante su herramienta online una vez impuesta la aplicación y las condiciones del fluido de trabajo se muestran las bombas que son capaces de trabajar bajo esas condiciones de operación con rendimientos óptimos. Así pues se ha seleccionado el modelo NB 80-315/334 A-F2-A-E-BAQE que presenta un rendimiento del 77,1%. Sus curvas características son las siguientes:



Figura 40: Imagen del modelo NB 80-315/334 del fabricante Grundfos (Fuente: Grundfos Webcaps)

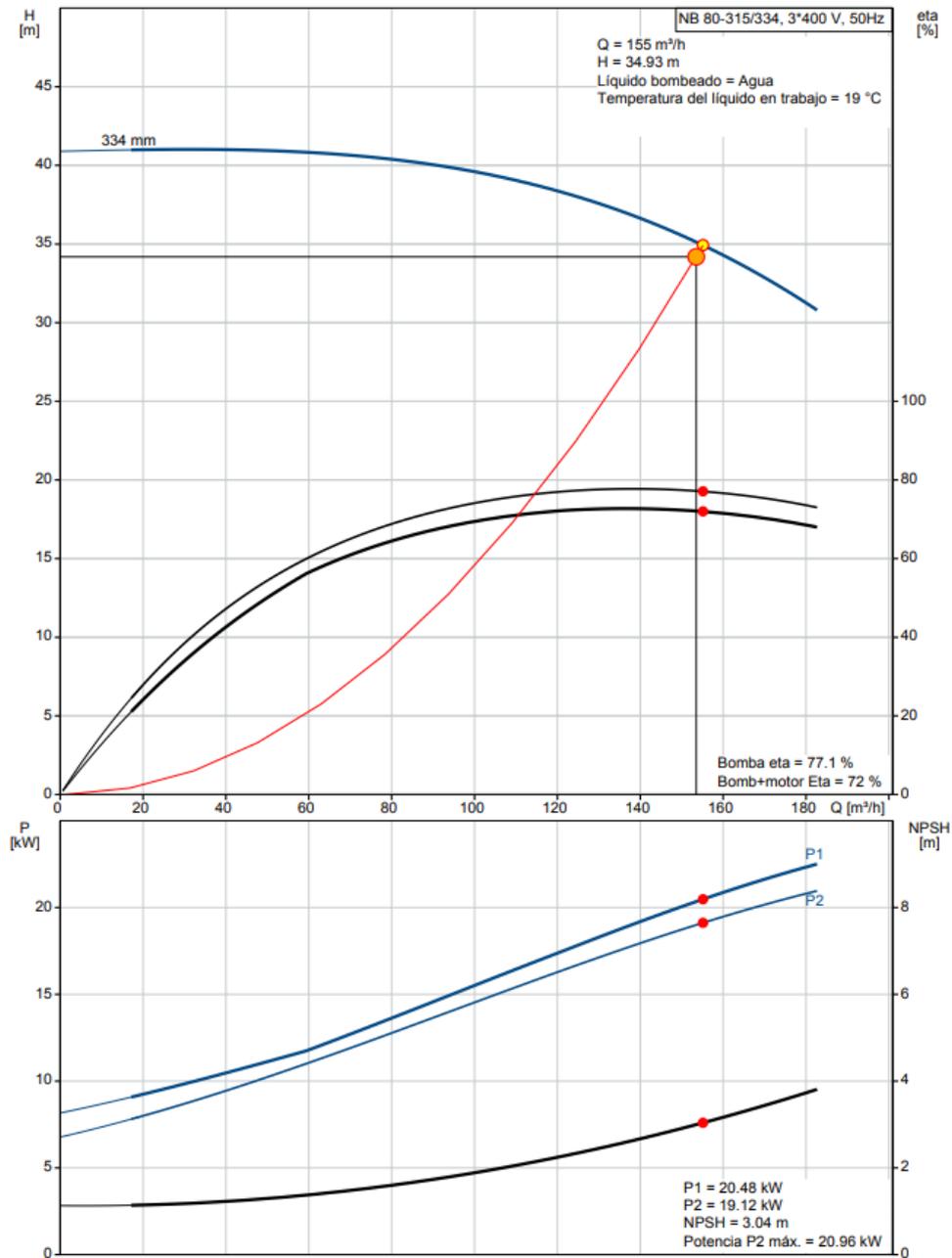


Figura 41: Curvas características obtenidas para la bomba NB 80-315/334 (Fuente: Grundfos Webcaps)

### Lowara

Mediante la herramienta online Xylect se impone las condiciones del fluido de trabajo y la serie que es capaz de trabajar bajo las mismas y se obtiene un listado de las bombas que son capaces de trabajar con los rendimientos más altos. Se seleccionó el modelo NSCF 80-160/220/W25RCC4 que tiene un rendimiento del 80% y sus curvas características son las siguientes:

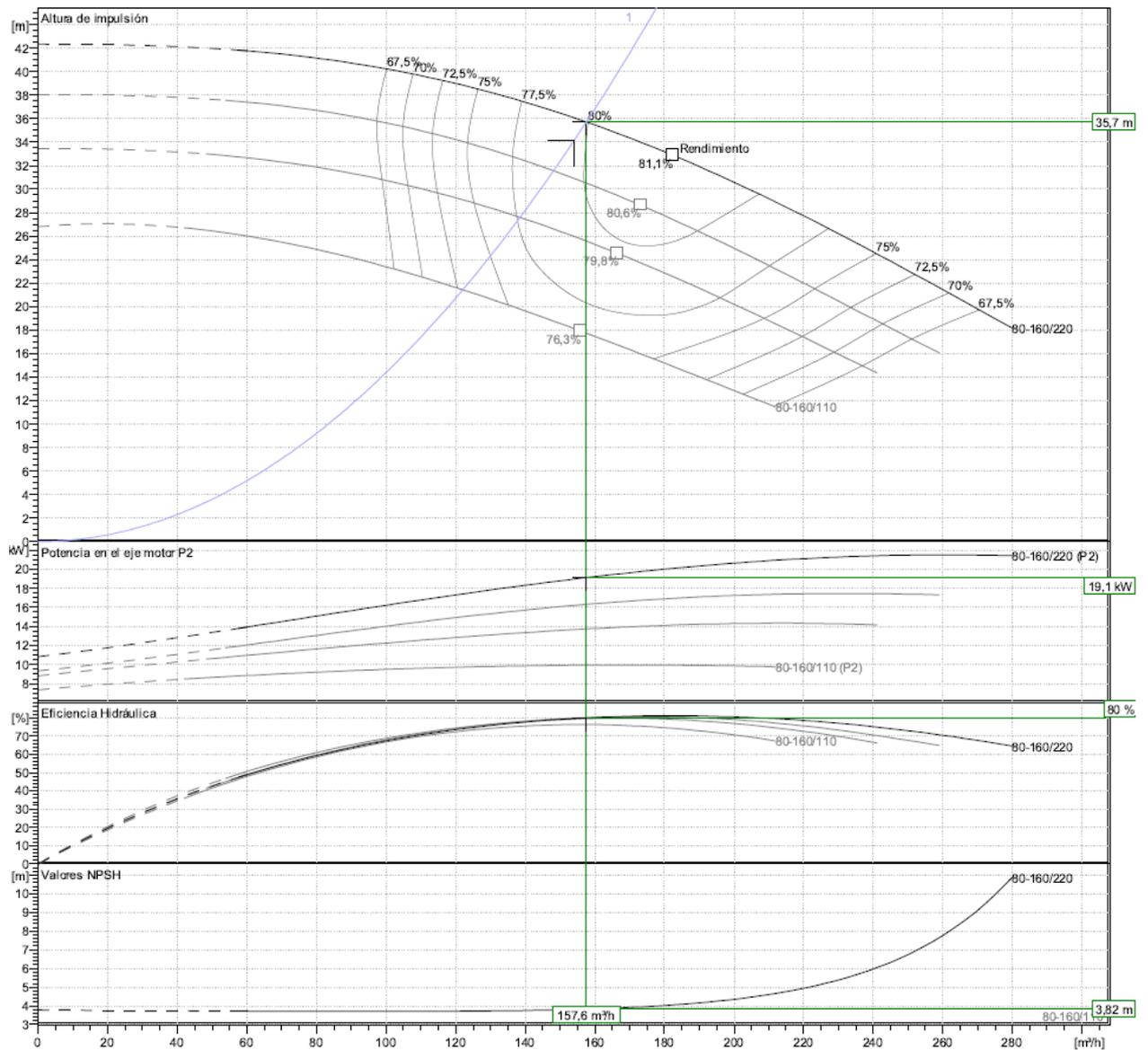


Figura 42: Curvas características obtenidas para la bomba NSCF 80-160/220/W25RCC4

(Fuente: [www.xylect.com](http://www.xylect.com))



Figura 43: Imagen del modelo NSCF 80-160/220/W25RCC4 del fabricante Lowara (Fuente: [www.xylect.com](http://www.xylect.com))

Ya conocidos todos los modelos y rendimientos que presentan las bombas de cada fabricante se puede elaborar la siguiente tabla:

Fabricante	Modelo	Rendimiento (%)
KSB	Multitec A125/2-10.2.30.81	79,61
Grundfos	NB 80-315/334	77,1
Lowara	NSCF 80-160/220/W25RCC4	80

Tabla 29: Tabla resumen de los modelos de bomba de distribución (Fuente: Elaboración propia)

Así pues se selecciona el modelo que presente un mayor rendimiento. Para este caso es el modelo NSCF 80-160/220/W25RCC4 del fabricante Lowara es el que alcanza un mayor rendimiento (80%). Para finalizar se elabora una tabla donde se recogen los datos más relevantes de la bomba.

Fabricante	Lowara
Modelo	NSCF 80-160/220/W25RCC4
Rendimiento (%)	80
Potencia Eléctrica Motor (kW)	22 kW

Tabla 30: Datos de la bomba de distribución seleccionada (Fuente: Elaboración propia)

## 8.8. Dimensionado y selección de la bomba de rechazo

Para saber si es necesaria o no la instalación de una bomba primero se debe conocer la altura manométrica que en el caso supuesto debería de vencer la bomba. Para conocer dicho valor se debe aplicar la siguiente expresión.

$$H_{captación} = \frac{p_f - p_i}{\gamma} + (z_f - z_i) + H_{r, rechazo} + H_{r, acc, rechazo}$$

Con relación a la presión de entrada a la bomba se toma el valor que facilita el software de dimensionado del intercambiador de presión. Dicha presión es la de salida del intercambiador y alcanza un valor de 1,5 bar. Para el valor de salida se tiene que considerar la columna de agua que hay por encima del emisario que son 50 metros, y sabiendo que 1 bar equivale a 10,2 metros de columna de agua, la presión de salida será de 4,90 bar.

Para fijar la diferencia de cota se impondrá que la cota inicial será la de la planta más la de la columna del agua por lo que tendrá un valor de 60 metros mientras que la cota final estará situada a la salida del emisario que se traduce en 0 metros.

Para obtener el peso específico del agua  $\gamma = \rho * g$  primero se tiene que hallar el valor de la densidad. Por lo que se utilizará nuevamente la herramienta de cálculo facilitada por la Universidad de Michigan denominada Ocean Water Density Calculator.

Y obtenemos que  $\rho = 998,553 \text{ kg/m}^3$ .

Una vez impuestos todas las variables de la expresión podemos calcular el valor de la altura manométrica.

$$H_{rechazo} = \frac{(4,9 - 1,5) \text{ bar} * \frac{10^5 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}}}{9,81 \text{ m/s}^2 * 998,553 \text{ kg/m}^3} + (0 - 60) \text{ m} + 1,4306 \text{ m} + 0,0429 \text{ m}$$

$$H_{rechazo} = -23,818 \text{ m}$$

El resultado obtenido es negativo lo que indica que la diferencia de cota es tal que permite realizar el trasvase agua por gravedad. Esto implica que no se requiere la instalación de una bomba para el sistema de rechazo, lo que reduce el consumo específico de la planta.

## 9. Segundo dimensionado del sistema de recuperación de energía

Como se comentó anteriormente en su apartado correspondiente el propio software del intercambiador de presión requería los rendimientos de las bombas para poder calcularlo por lo que se supusieron. Así pues como ya se han dimensionado todas las bombas del sistema se puede recalculer el intercambiador fijando los rendimientos que presentan y observar que consumo específico se obtiene. Para que el proceso se vea de forma más clara se hará una comparativa de los rendimientos y resultados

obtenidos en el primer dimensionado y en el que se va a realizar en el presente apartado.

### Rendimientos en el primer dimensionado

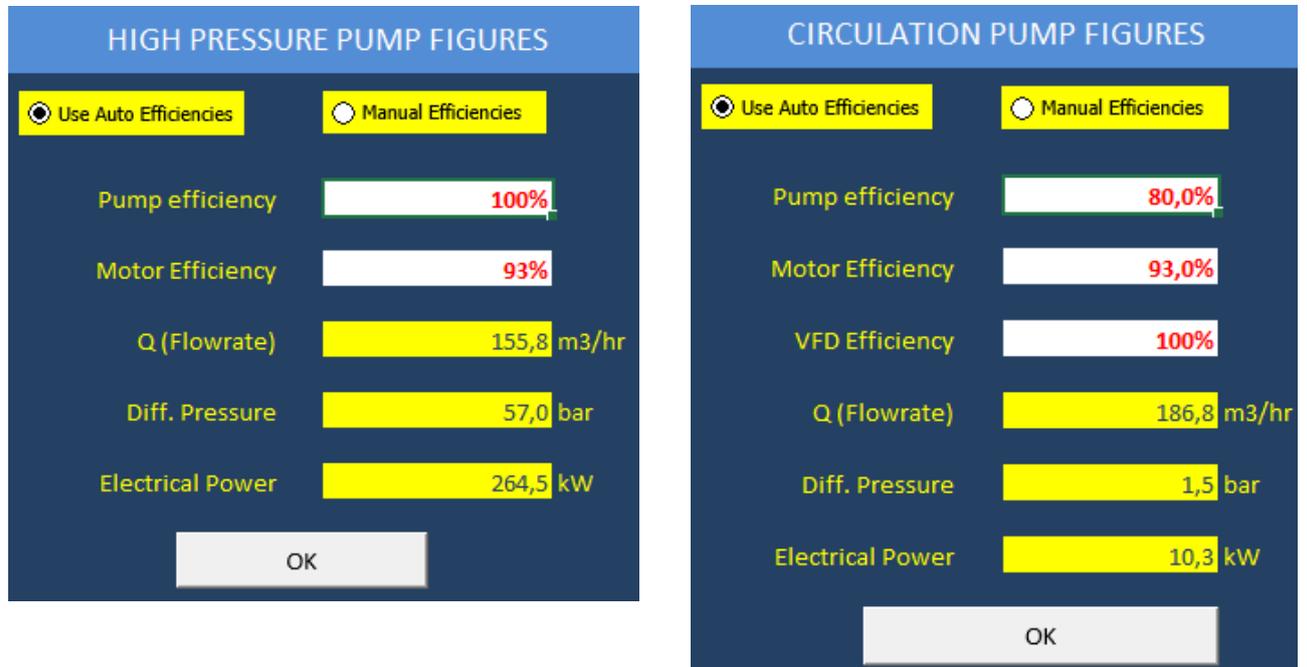


Figura 44: Rendimientos de las bombas en el primer dimensionado de los intercambiadores de presión (Fuente: Energy Recovery)

### Rendimientos en el segundo dimensionado

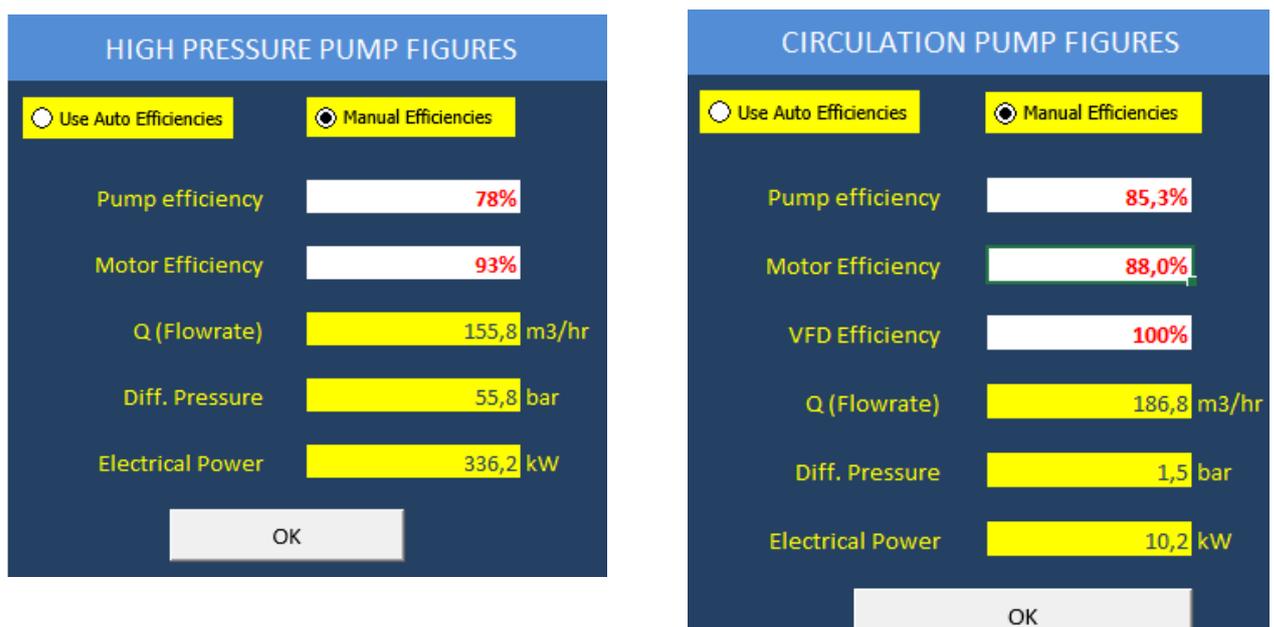


Figura 45: Rendimientos de las bombas en el segundo dimensionado de los intercambiadores de presión (Fuente: Energy Recovery)

Para ambas bombas, el fabricante únicamente facilita el rendimiento total. Por lo que en primer lugar se ha impuesto el rendimiento propio de la bomba y como se conoce el consumo de la bomba, mediante la introducción reiterativa de valores del rendimiento del motor se ha intentado alcanzar los valores de consumo que presentan estas bombas en condiciones reales. Hay que destacar que estos valores son supuestos y que puede existir margen de error de manera que el consumo específico se puede ver afectado por ello.

Por otro lado, algo que también puede afectar a los resultados obtenidos es que el software de dimensionado del intercambiador no tiene en cuenta todos los decimales introducidos en los rendimientos y tiende a redondearlos a valores superiores.

Dimensionado	Bomba Booster	BAP
Primero	80%	100%
Segundo	85,25 – 85,30 %	77,6 – 78 %

Tabla 31: Variación de los valores de rendimiento en la hoja de cálculo del intercambiador de presión (Fuente: Elaboración propia)

Como se observa en la tabla en el segundo dimensionado tenemos el primer valor que es facilitado por el fabricante una vez seleccionada la bomba y el segundo es el valor que impone el software de dimensionado. Los resultados obtenidos con cada dimensionado son los siguientes:

PX Technology Performance		PX Technology Performance	
PX unitary flow	47,1 m3/hr	PX unitary flow	47,1 m3/hr
Salinity Increase at membranes	2,8%	Salinity Increase at membranes	2,8%
Volumetric mixing VM	5,9%	Volumetric mixing VM	5,9%
Lubrication flow (LF) per PX array	1,6 m3/hr	Lubrication flow (LF) per PX array	1,6 m3/hr
LF as % of concentrate flow	0,9%	LF as % of concentrate flow	0,9%
HP DP	0,5 bar	HP DP	0,5 bar
LP DP	0,5 bar	LP DP	0,5 bar
RO Specific Energy **	1,78 kWh/m3	RO Specific Energy **	2,28 kWh/m3
Efficiency	97,65%	Efficiency	97,65%

Figura 46: Comparativa de resultados de la hoja de cálculo del intercambiador de presión (Fuente: Energy Recovery)

Como se puede observar los parámetros referentes a los intercambiadores de presión se mantienen iguales mientras que se observan una variación en el consumo específico debido a la variación de los rendimientos. Aunque el consumo haya aumentado en gran medida, el valor real que alcanza es muy bueno y supondrá un gran ahorro de energía.

## 10. Consumo específico de la planta

Después de haber seleccionado todas las bombas que conforman los distintos sistemas de la instalación se puede calcular el consumo específico que presenta la misma. Este parámetro refleja el consumo de energía de la planta por metro cúbico de agua producto obtenida.

Es importante destacar que estos cálculos se realizarán con las potencias máximas de cada bomba aunque no llegan a trabajar bajo estos valores en condiciones reales de operación. El fin de realizar los cálculos bajo esta imposición es para estudiar el consumo específico en la situación más desfavorable posible.

Los consumos energéticos que presentan las bombas de la instalación son los siguientes:

Bomba	Número de bombas	Potencia eléctrica (kW)
Captación	2	60
Alta presión	1	350
Booster	1	11
Pre-postratamiento	1	11
Distribución	1	22

Tabla 32: Potencia de las distintas bombas de la instalación (Fuente: Elaboración propia)

Para realizar el cálculo del consumo específico de cada bomba se supone que trabajan de manera continua las 24 horas del día sin interrupciones. Y la expresión para obtenerlo es la siguiente:

$$\text{consumo específico} = \frac{\text{consumo diario bomba (kWh)}}{\text{Producción diaria (m}^3\text{)}}$$

Los consumos obtenidos son los mostrados a continuación:

Bomba	Consumo diario (kWh)	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )
Captación	2880	0,78
Alta presión	8400	2,27
Booster	264	0,071
Pre-postratamiento	264	0,071
Distribución	528	0,14

Tabla 33: Consumo específico de cada bomba (Fuente: Elaboración propia)

Una vez que se han calculados todos los consumos referentes a bombas se puede definir el consumo específico de la planta.

Sistema	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )
Captación	0,78
Núcleo de desalación	2,34
Pre-postratamiento	0,071
Distribución	0,14
<b>Total</b>	<b>3,33</b>

Tabla 34: Consumo específico total de todos los sistemas de la instalación (Fuente: Elaboración propia)

## 10.1. Comparativa de los consumos específicos obtenidos referentes al núcleo de desalación

Ahora que se han determinado el consumo específico que presenta la planta. Se puede hacer una comparativa de los consumos específicos del núcleo de desalación obtenidos mediante la hoja de Excel del intercambiador de presión y del propio software de membranas como se realizó anteriormente en este anexo.

Para calcular el consumo mediante el software de membranas, se utilizarán los rendimientos obtenidos en el dimensiona de las bombas y los parámetros facilitados por la hoja de cálculo del intercambiador de presión. La introducción de los datos se puede ver en la siguiente figura.

Figura 47: Interfaz de entrada de datos del intercambiador de presión en el software de membranas (Fuente: TorayDS2)

Y una vez realizada la simulación se obtiene el consumo específico:

Consumo energético	kWh/m <sup>3</sup>	2,246
--------------------	--------------------	-------

Figura 48: Consumo específico final obtenido mediante la simulación del software de membranas (Fuente: TorayDS2)

A continuación se puede hacer una comparativa de los resultados obtenidos y observar si existen grandes variaciones entre ellos.

Método cálculo	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )
Hoja de Excel	2,28
TorayDS2	2,246
Elaboración Propia	2,34

Tabla 35: Comparativa de consumos específicos obtenidos mediante diversos métodos de cálculo (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede ver el valor calculado mediante Excel y el del software de membranas no distan mucho. Mientras que el calculado manualmente presenta un mayor valor, esto se debe a que los consumos utilizados son los máximos que presentan

las bombas y no los que presentarían en caso de estar operando en el punto de operación calculado para cada una de ellas.

## 11. Consumo anual de la planta

Se tendrá en cuenta que la planta no trabaja de manera continua durante todo el año ya que se realiza una parada de mantenimiento durante el mes que se requiere una menor necesidad hídrica por parte de los cultivos que como ya se explicó en el apartado correspondiente. Así pues se tendrá en cuenta la parada por mantenimiento de 31 días en diciembre y que la planta el resto del año trabaja las 24 horas el día.

$$\text{Consumo anual} = 514kW * (365 - 31) \text{ días} * \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} = 4120224 \text{ kWh}$$

## 12. Alternativas de gestión de la salmuera

Aunque previamente se realizó el dimensionado del sistema de rechazo para verter la salmuera al mar, existen otras opciones que dan la posibilidad de obtener productos de alto valor comercial a partir de su tratamiento a la vez que se reduce o evita su vertido, y el impacto ambiental que podrían ocasionar. Dichas opciones se describirán a continuación y se estudiará su viabilidad en función de las condiciones que presenta la EDAM bajo estudio.

### 12.1. Tratamiento de salmuera mediante un sistema de vertido cero

Es la opción de gestión más viable ya que se adapta a cualquier volumen de producción de salmuera y la más respetuosa con el medio ambiente. El objetivo de esta tecnología es convertir el flujo de salmuera en agua de elevada calidad y en sales en estado sólido cristalizadas. El agua debido a su alta calidad puede destinarse al mismo fin que tenga el permeado, y las sales pueden ser tratadas para darles diversos usos.

El sistema se divide en varias etapas: en primer lugar tendríamos en el proceso de desalación como tal del que se extrae el flujo de rechazo, a continuación el flujo se somete a una serie de evaporaciones al vacío donde se produce un aumento de la

concentración de la salmuera y a su vez se genera el caudal de agua de alta calidad. Finalizada esta etapa, se realiza un proceso de cristalización donde se obtienen las sales en estado sólido. De esas sales se pueden obtener gran cantidad de productos que pueden tener aplicaciones en la industria. A continuación se facilita una tabla donde se muestran todos ellos.

Carbonato Cálcico, $\text{CaCO}_3$	Grano fino cristalino	Pigmento para revestimiento de papel Relleno para la fabricación de papel, caucho y pinturas
Cloruro Cálcico, $\text{CaCl}_2$	Solución concentrada	Inhibidores de polvo Recuperación de suelos sódicos Industria de la construcción Estabilizador para cemento/hormigón Estabilizador de carreteras
Sosa Cáustica, $\text{NaOH}$		Múltiples aplicaciones industriales Solución tampón de pH Compuesto base para procesos químicos
Yeso, $\text{CaSO}_4$		Fabricación de productos para construcción Recuperación de suelos sódicos Revestimiento de balsas de evaporación
Yeso con Hidróxido de Magnesio $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}(\text{OH})_2$	Lechada o polvo	Solución tampón de pH Abono  Tratamiento de aguas residuales
Sal común, $\text{NaCl}$	Sal cristalizada	Productos cloroalcalinos Suministro de Sal a granel para la industria Procesos industriales y alimentarios
Carbonato de Magnesio ligero $\text{XMgCO}_3 \cdot \text{YMg}(\text{OH})_2 \cdot \text{ZH}_2\text{O}$	Grano fino cristalino	Producción de Magnesio metal Relleno para la fabricación de papel, caucho y pinturas Retardante del fuego
Hidróxido de Magnesio, $\text{Mg}(\text{OH})_2$	Lechada o polvo	Alimento para animales Retardante del fuego Neutralización de ácido Producción de Magnesio metal  Tratamiento de agua potable y residual
Ceniza de Sosa, $\text{NaCO}_3$		Industria química Tratamiento de agua
Clorato Sódico, $\text{NaClO}_3$		Blanqueo de papel Industria química
Hipoclorito Sódico, $\text{NaClO}$		Industria química Desinfectante
Thenardita, $\text{NaSO}_4$		Producción de detergentes, vidrio y tensioactivos

*Figura 49: Productos que se pueden extraer de la salmuera y sus posibles aplicaciones (Fuente: Recuperación de energía de la salmuera, Tesis Doctoral, Belén Gutiérrez López. Svensson, M (2005))*

Por lo tanto, esta sería la opción más factible para implantar en la EDAM bajo estudio ya que permite tratar la totalidad del residuo del proceso de desalación consiguiendo una revalorización completa del mismo y evitando así su vertido al mar. No obstante habría que barajar si se tienen los recursos materiales y económicos para

poder instalar el sistema además de tener en consideración su periodo de amortización. Por otro lado la imposibilidad de tratar las sales en la planta no sería un problema dado que se podrían almacenar para más tarde enviarlas a plantas destinadas a su revalorización.

## **12.2. Inyección profunda**

No es un método de aprovechamiento como tal ya que no se le realiza un proceso de tratamiento a la salmuera, pero si ejecuta de manera correcta, permite inyectar el residuo en el subsuelo a través de un pozo profundo sin producir ningún impacto ambiental. Antes de realizar la inyección se tienen que realizar una serie de estudios para determinar las condiciones geológicas del emplazamiento donde se van a disponer los pozos, con el fin de tener en conocimiento si existe riesgo de contaminación de masas de agua subterráneas. Para poder implantar este método de vertido se tiene que saber si existe una formación permeable capaz de admitir el residuo, al mismo tiempo que existe otra formación impermeable que asegura el confinamiento de la masa de salmuera el tiempo suficiente hasta que se vuelva inocua. Es importante que las condiciones de ambas no se vean alteradas durante su periodo de operación.

Dicho esto no se considera una opción viable puesto que no se sabe en que condiciones geológicas se encuentra el emplazamiento de la EDAM, y por tanto, podría haber riesgo de contaminación de acuíferos. Y aunque en el supuesto caso se pudiera realizar de forma correcta y sin riesgo alguno, no brinda posibilidad alguna de revaloración de la salmuera por lo que sería más idóneo buscar otras alternativas.

## **12.3. Balsas de evaporación**

Consiste en almacenar la salmuera en una balsa donde mediante evaporación natural se consigue reducir su contenido de agua, reduciendo su volumen y aumentando de manera considerable su concentración de sales. Hecho esto se realiza el proceso de cristalización para obtener las sales en estado sólido. El área superficial y la profundidad mínima del embalse se definen en función del caudal de salmuera.

Esta opción se descarta directamente para la EDAM bajo estudio debido a los siguientes motivos:

- Se requiere de una superficie lo suficientemente grande como para poder construir la balsa.
- Debido a la cercanía al mar, la humedad del aire es mucho mayor lo que implica que el proceso de evaporación sea más lento y se requiera de ciclos de tiempo de mayores.
- Existe riesgo de contaminación de acuíferos cercanos por la posible fuga de lixiviados.

#### **12.4. Uso de la salmuera para producir zumos concentrados**

Es un método que se encuentra bajo el desarrollo de un grupo de investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia desde el año 2016. Tiene por objeto hacer uso del rechazo de salmuera de las plantas desaladoras para producir zumos concentrados.

Actualmente los zumos concentrados se obtienen aplicando calor, lo que provoca la evaporación del agua que contienen. Este método busca eliminar esta etapa y su coste energético por medio de un proceso de ósmosis inversa. En dicho proceso se tendría una membrana entre ambos líquidos que estaría encargada reducir el contenido de agua del zumo haciendo pasar el agua a través de ella para que la salmuera la adquiera, y por consiguiente se reduzca su concentración de sal. Por lo que mediante esta tecnología se conseguirán producir zumos aptos para el mercado, a la vez que se consigne reducir el impacto que genera el vertido de la salmuera al mar ya que se encuentra diluida en un mayor volumen de agua.

Este método podría llegarse a usar en la EDAM bajo estudio si existiera una fábrica próxima al emplazamiento de la EDAM que contase con la tecnología previamente comentada. Pero como no es el caso se descarta su uso.

#### **12.5. Comparativa de alternativas y solución adoptada**

Una vez comentadas las alternativas y estudiada su viabilidad se llega a la conclusión de que la primera es la más factible en el caso de que se decidiera implantar un sistema de gestión de la salmuera. Se han descartado la opción de inyección profunda y de balsas de evaporación debido a las condiciones que se requieren para su uso además del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, que es la fuente de agua más utilizada de la isla. Y la opción de los zumos se descarta porque todavía es una

tecnología en desarrollo y no hay ninguna fábrica cercana que se pudiera beneficiar de ella.

Con relación a la alternativa elegida, en caso de tener intenciones de instalarla en la EDAM, habría que tener en cuenta lo comentado previamente, que se desconoce tanto su coste de instalación como su período de amortización por lo que se tendría que analizar previamente su viabilidad. No obstante si se evalúa la alternativa teniendo en cuenta únicamente los resultados que se obtienen, se puede imponer que el sistema de vertido cero es la elección perfecta. Permite una revaloración completa de la salmuera, de la que se pueden obtener gran cantidad de productos útiles en la industria, y se elimina el requerimiento del vertido de esta al mar, por lo que se evita su impacto ambiental. Y incluso permite obtener mayor caudal de permeado dado que en el proceso también se produce agua de alta calidad. De modo que en vista de todas las virtudes que presenta, sin duda sería la mejor alternativa de gestión de la salmuera.



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

Grado en Ingeniería Mecánica

# **ANEXO III**

## **DIMENSIONADO DEL SISTEMA EÓLICO Y MÉTODOS DE APROVECHAMIENTO DEL EXCESO DE ENERGÍA**

AUTOR: Víctor Pérez Santana

TUTOR: Vicente José Romero Ternero





## ÍNDICE

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Análisis del recurso eólico .....</b>	<b>1</b>
2.1. Datos del recurso eólico de la zona.....	1
2.2. Elección de la orientación del aerogenerador .....	3
2.3. Distribución de probabilidad de la velocidad del viento .....	4
<b>3. Determinación del emplazamiento del aerogenerador.....</b>	<b>7</b>
<b>4. Selección del modelo del aerogenerador .....</b>	<b>10</b>
4.1. Disponibilidad en el mercado .....	10
4.2. Estudio de la producción de cada aerogenerador .....	11
4.3. Selección del aerogenerador .....	13
4.4. Comprobación de la potencia y el emplazamiento .....	15
4.4.1. Cálculo de la potencia estimada .....	15
4.4.2. Configuración y emplazamiento de los aerogeneradores .....	19
<b>1. 5. Abastecimiento de la EDAM .....</b>	<b>23</b>
<b>2. 6. Sistema de aprovechamiento de energía .....</b>	<b>24</b>
6.1. Bombeo hidráulico .....	25
6.2. Aire comprimido .....	25
6.3. Hidrógeno .....	26

## Índice de figuras

Figura 1: Mapa eólico del municipio de Granadilla de Abona (Fuente: IDAE) .....	2
Figura 2: Rosa de los vientos de las frecuencias (%) (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de IDAE) .....	3
Figura 3: Rosa de los vientos de las velocidades (m/s) (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de IDAE) .....	4
Figura 4: Gráfica de distribución de velocidades (Fuente: Elaboración propia) .....	6
Figura 5: Diversos emplazamientos para instalar el aerogenerador (Fuente: Elaboración propia. Grafcan).....	7
Figura 6: Interfaz de la herramienta online del ITC para estimar la potencia de un aerogenerador en la zona 1 (Fuente: ITC).....	8
Figura 7: Interfaz de la herramienta online del ITC para estimar la potencia de un aerogenerador en la zona 2 (Fuente: ITC).....	9
Figura 8: Interfaz de la herramienta online del ITC para estimar la potencia de un aerogenerador en la zona 3 (Fuente: ITC).....	9
Figura 9: Valores de la curva de potencia del aerogenerador (Fuente: ITC).....	15
Figura 10: Interfaz de la herramienta online del ITC para estimar la potencia de modelo seleccionado (Fuente: ITC) .....	16
Figura 11: Disposición de los aerogeneradores (Fuente: Elaboración propia. Goolzoom) .....	19
Figura 12: Interfaz de la herramienta online del ITC para estimar la potencia del segundo aerogenerador (Fuente: ITC) .....	20
Figura 13: Imagen del modelo de aerogenerador U57 del fabricante Unison (Fuente: Unison).....	22
Figura 14: Curva de potencia del modelo U57 (Fuente: Elaboración propia).....	22
Figura 15: Bombeo hidráulico (Fuente: Energía (2013) Origo Ed. Chile) .....	25
Figura 16. Pila de combustible de hidrógeno (Fuente: Instituto de síntesis química y catálisis homogénea Universidad de Zaragoza) .....	26

## *Índice de tablas*

Tabla 1: Datos eólicos a 80 metros en el punto más cercano al emplazamiento de la EDAM (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de IDAE).....	3
Tabla 2: Valores obtenidos para la distribución de Weibull con los datos de viento (Fuente: Elaboración propia).....	6
Tabla 3: potencia anual EDAM (Fuente: Elaboración propia) .....	10
Tabla 4: Modelos del fabricante DEWIND (Fuente: ITC) .....	10
Tabla 5: Modelos del fabricante ENERCON (Fuente: ITC) .....	11
Tabla 6: Modelos del fabricante NORDEX (Fuente: ITC) .....	11
Tabla 7: Modelos añadidos manualmente (Fuente: <a href="http://www.thewindpower.net">www.thewindpower.net</a> ) .....	11
Tabla 8: Calificación factores de carga (Fuente: Elaboración propia) .....	12
Tabla 9. Comparativa factores de carga (Fuente: Elaboración propia).....	12
Tabla 10: Exceso o déficit de cada aerogenerador (Fuente: Elaboración propia) .....	13
Tabla 11: Valores de potencia obtenidos para el rango de velocidades estudiado (Fuente: Elaboración propia).....	18
Tabla 12: Potencia anual (Fuente: Elaboración Propia) .....	18
Tabla 13: Exceso de la configuración de dos aerogeneradores (Fuente: Elaboración propia) .....	20
Tabla 14: Especificaciones Técnicas del modelo de aerogenerador U57 de la empresa Unison (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de <a href="http://www.thewindpower.net">www.thewindpower.net</a> ).....	21
Tabla 15: Condiciones de operación aerogenerador (Fuente: Elaboración propia) .....	22



## 1. Introducción

El objetivo de este anexo es dimensionar el sistema de aprovechamiento del recurso eólico que estará encargado de cubrir la demanda energética de la EDAM. Para alcanzar el objetivo propuesto se tiene que seguir el siguiente procedimiento paso a paso.

1. Datos del recurso eólico de la zona.
2. Elección de la orientación del aerogenerador.
3. Distribución de probabilidad de la velocidad del viento.
4. Determinación del emplazamiento exacto del aerogenerador.
5. Comprobación de la disponibilidad de los modelos en el mercado.
6. Estudio de la producción estimada, selección del modelo y su configuración.
7. Abastecimiento de la EDAM.

Además a modo complementario se añadirá un apartado de estudio de diversos métodos de aprovechamiento de energía en caso de que exista un excedente de energía.

## 2. Análisis del recurso eólico

### 2.1. Datos del recurso eólico de la zona

En primer lugar, se debe conocer qué condiciones eólicas presenta la zona donde se va a instalar la desaladora para determinar si el recurso eólico es tal como para poder instalar uno o más aerogeneradores que sean capaces de producir la energía necesaria para alimentar la totalidad de los sistemas de la desaladora.

Para conocer dichas condiciones se hará uso del Atlas Eólico de España facilitado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

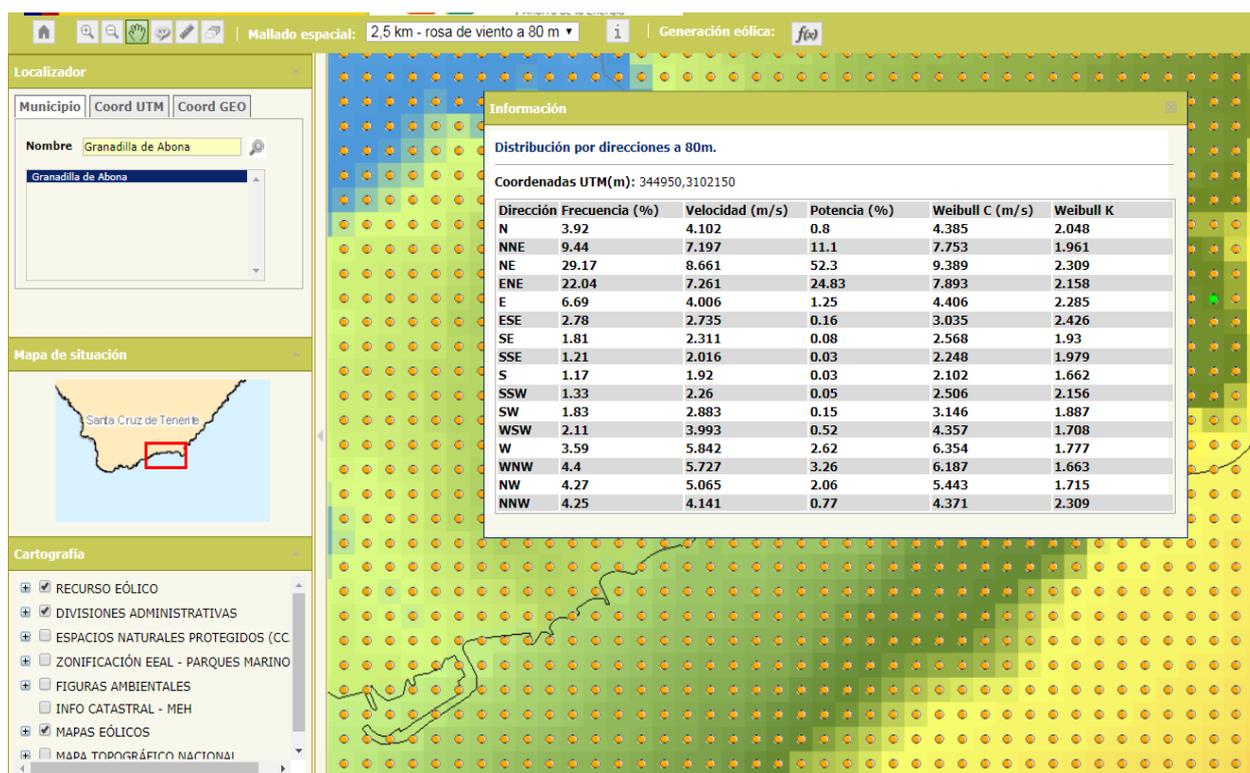


Figura 1: Mapa eólico del municipio de Granadilla de Abona (Fuente: IDAE)

En la figura se puede observar el interfaz que presenta el atlas. Para obtener los datos de zona requerida se ha impuesto el municipio donde se encuentra la desaladora bajo estudio y manualmente se ha buscado el lugar exacto de emplazamiento. Los datos obtenidos se registraron en una ubicación cercana ya que no hay estudios eólicos de todos los puntos de la zona. Se debe destacar que los datos se obtuvieron a una altura de 80 metros dado que el viento tiene mayor intensidad y es más homogéneo. Como en la presente figura es complicado observar los datos se ha elaborado una tabla que facilite su manejo.

Dirección	Frecuencia (%)	Velocidad (m/s)	Potencia (%)	Weibull C (m/s)	Weibull K
N	3,92	4,102	0,8	4,385	2,048
NNE	9,44	7,197	11,1	7,753	1,961
NE	29,17	8,661	52,3	9,389	2,309
ENE	22,04	7,261	24,83	7,893	2,158
E	6,69	4,006	1,25	4,406	2,285
ESE	2,78	2,735	0,16	3,035	2,426
SE	1,81	2,311	0,08	2,568	1,930

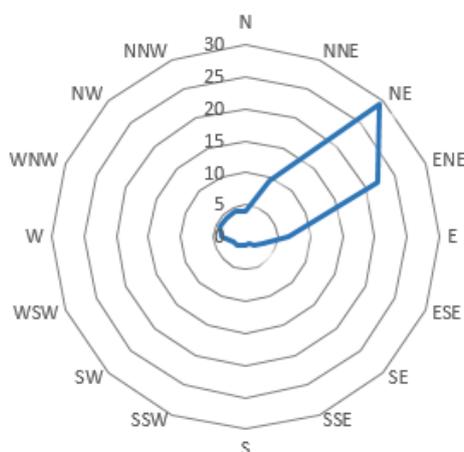
SSE	1,21	2,016	0,03	2,248	1,979
S	1,17	1,92	0,03	2,102	1,662
SSW	1,33	2,26	0,05	2,506	2,156
SW	1,83	2,883	0,15	3,146	1,887
WSW	2,11	3,993	0,52	4,357	1,708
W	3,59	5,842	2,62	6,354	1,777
WNW	4,4	5,727	3,26	6,187	1,663
NW	4,27	5,065	2,06	5,443	1,715
NNW	4,25	4,141	0,77	4,371	2,309

*Tabla 1: Datos eólicos a 80 metros en el punto más cercano al emplazamiento de la EDAM (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de IDAE)*

## 2.2. Elección de la orientación del aerogenerador

Ahora que se conoce la frecuencia con la que sopla el viento y su velocidad en cada dirección, se puede conocer en qué dirección predomina en el viento y en cual existe una mayor intensidad. Para ellos se elaborarán dos rosas de los vientos, una para definir la frecuencia y otra para la velocidad. El fin de este procedimiento es imponer la orientación que debe tener el aerogenerador para tener un máximo aprovechamiento del recurso eólico. Hay que destacar que los gráficos en coordenadas polares se han elaborado mediante Excel.

*Rosa de los vientos de frecuencia (%)*



*Figura 2: Rosa de los vientos de las frecuencias (%) (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de IDAE)*

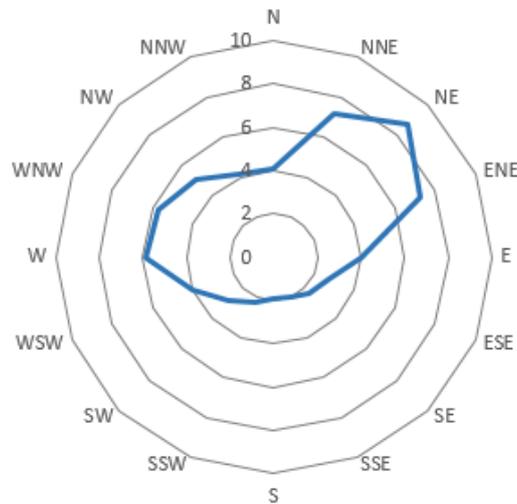
Rosa de los vientos de velocidades (m/s)

Figura 3: Rosa de los vientos de las velocidades (m/s) (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de IDAE)

Si se observan ambas rosas podemos llegar a la conclusión de que en la dirección Nordeste (NE) el viento sopla con mayor frecuencia (29,17%) y además con la mayor velocidad (8,661 m/s) en comparación al resto de direcciones. Lo que implica que si se orienta al aerogenerador en dicha dirección se conseguirá el máximo aprovechamiento del recurso eólico que hay en la zona.

### 2.3. Distribución de probabilidad de la velocidad del viento

Se sabe que el recurso eólico es muy variable por lo que se necesita conocer como de frecuente son las velocidades del viento y para ello se requiere el uso de una distribución de probabilidad, la utilizada en el dimensionado de aerogeneradores es la distribución de Weibull. La expresión que la define es la siguiente:

$$f(v) = \frac{k}{c} * \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Ecuación 1: Distribución de Weibull  $f(v)$

Donde:

- $k$  = factor de forma, que define la forma de la curva
- $c$  = factor de escala  $\left(\frac{m}{s}\right)$ , que está relacionado con la velocidad media
- $v$  = velocidad del viento  $\left(\frac{m}{s}\right)$

Para obtener tanto el factor de forma como el factor de escala se realiza el promedio de los datos recogidos en la tabla 1.

$$k = 2,309 \quad c = 4,759 \text{ m/s}$$

Una vez conocidos ambos valores se puede aplicar la ecuación 1 para obtener el valor de distribución para cada valor comprendido dentro del rango de velocidades que se vaya a estudiar. En este caso el rango de velocidades irá de 0 a 20 m/s en intervalos de 1 m/s. También se mostrará el porcentaje correspondiente a cada valor de distribución calculado para observar la probabilidad de que se de cada valor de velocidad. Y por último se incluirá el número de horas al año que se da cada valor de velocidad del viento, para ello se multiplica el valor de la distribución por el número total de horas de un año, que equivale a 8760 horas. La siguiente tabla recoge los resultados obtenidos:

Velocidad (m/s)	f(v)	Frecuencia (%)	horas/año
0	0,00000	0,000	0,00
1	0,08464	8,464	741,419
2	0,14808	14,808	1297,166
3	0,17798	17,798	1559,143
4	0,1741	17,415	1525,543
5	0,14629	14,629	1281,487
6	0,10803	10,803	946,352
7	0,07103	7,103	622,210
8	0,04189	4,189	366,987
9	0,02227	2,227	195,125
10	0,01071	1,071	93,838
11	0,00467	0,467	40,914
12	0,00185	0,185	16,202
13	0,00067	0,067	5,835
14	0,00022	0,022	1,913
15	0,00007	0,007	0,572

16	0,00002	0,002	0,156
17	0,00000	0,000	0,039
18	0,00000	0,000	0,009
19	0,00000	0,000	0,002
20	0,00000	0,000	0,00

Tabla 2: Valores obtenidos para la distribución de Weibull con los datos de viento (Fuente: Elaboración propia)

Con los valores de frecuencia obtenidos mediante la distribución de Weibull para cada velocidad se construye la gráfica. En el vertical tendremos el valor de la distribución  $f(v)$  en porcentaje, y en el horizontal el rango de velocidades estudiado.

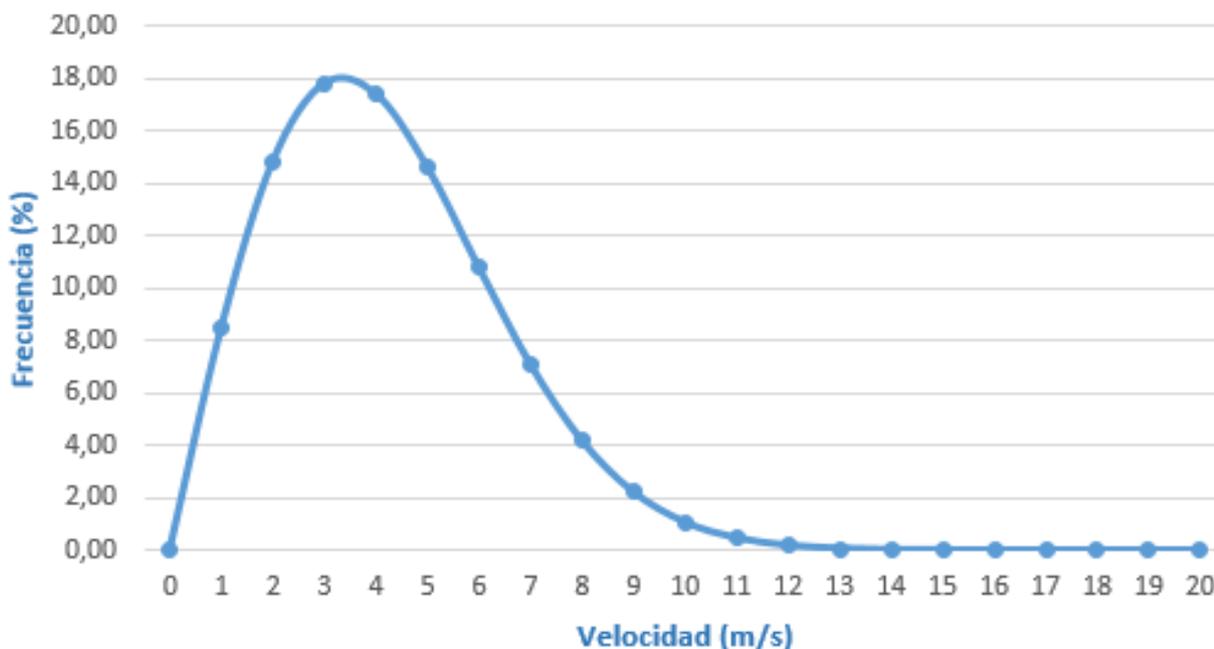


Figura 4: Gráfica de distribución de velocidades (Fuente: Elaboración propia)

Estudiando la figura 4 se puede deducir en que rango de velocidades se sitúa el viento la mayor parte del año. Así que con los datos estudiados se llega a la conclusión de que la velocidad del viento varía entre 2 y 6 m/s, siendo las velocidades 3 y 4 m/s las más frecuentes dentro de dicho intervalo.

Ahora que se sabe en qué condiciones se encuentra el recurso eólico de la zona, se debe estudiar el emplazamiento exacto que permita generar una mayor potencia a la vez que respete las premisas que se dispongan.

### 3. Determinación del emplazamiento del aerogenerador

Antes de realizar el proceso de selección del modelo del aerogenerador se tiene que definir el emplazamiento exacto del mismo. Para ello se ha decidido estudiar tres zonas que cumple los requisitos que se expondrán a continuación.



*Figura 5: Diversos emplazamientos para instalar el aerogenerador (Fuente: Elaboración propia. Grafcan)*

La zona número 1 se encuentra situada en el extremo superior de la parcela que se encuentra por encima de la zona de emplazamiento de la planta de desalación, la número 2 en la zona inferior izquierda, y la número 3 ligeramente desplazada a la izquierda del lugar de emplazamiento de la planta.

Se han elegido estos lugares siguiendo las condiciones siguientes:

- Zonas que no se encuentran muy cercanas a núcleos de población con el fin de evitar ruidos u otras perturbaciones que puedan afectar a sus habitantes.
- Lugares donde no se generen cambios en la rugosidad del terreno debido a edificios u otras estructuras que podrían provocar turbulencias o reducciones en la velocidad del viento.

- Zonas lo más alejadas posible del aeropuerto Tenerife Sur con el fin de evitar interferencias con el tráfico aéreo.
- Cumplen con lo impuesto en el Decreto 6/2015, de 30 enero que regula la instalación y explotación de parques eólicos en Canarias.

Para realizar la selección de la zona más factible para la colocación del aerogenerador se hará uso de la herramienta online facilitada por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) que permite estimar la energía que es capaz de generar un aerogenerador. En la interfaz se requiere su modelo, la altura y las coordenadas de emplazamiento. Con relación al modelo, se elegirá un mismo modelo para realizar el estudio en las 3 zonas. Con respecto a la altura, las más comunes se encuentran en un rango entre los 50 y 80 metros, lo más lógico sería seleccionar la mayor ya que las velocidades del viento son mayores y más uniformes debido a que la rugosidad del terreno tiene un menor efecto sobre estos parámetros, pero debido a la cercanía con el aeropuerto se realizará el estudio con altura que se encuentre por debajo de los 80 metros. Así pues se realiza el estudio para cada emplazamiento con una altura de 60 metros. Y en referente a las coordenadas se hará uso del visor de Grafcan para definir las.

### Zona 1

Coord X (UTM):	344850	
Coord Y (UTM):	3101850	
Tomo detalle numérico:	<a href="#">GomeraTenerife11.pdf</a>	
Aerogenerador:	GAMESA G58/850	
Altura:	60 m	
Cte K de Weibull (60 m):	1.779	
Velocidad viento (60 m):	6 m/s	
Dirección predominante del viento:	NE	
Energía anual estimada:	2071446 kWh	
Potencia anual:	236.466 kW	
Horas anuales equivalentes:	2437 h	

*Figura 6: Interfaz de la herramienta online del ITC para estimar la potencia de un aerogenerador en la zona 1 (Fuente: ITC)*

Zona 2

Coord X (UTM):	344750	
Coord Y (UTM):	3101750	
Tomo detalle numérico:	<a href="#">GomeraTenerife11.pdf</a>	
Aerogenerador:	GAMESA G58/850	
Altura:	60 m	
Cte K de Weibull (60 m):	1.77	
Velocidad viento (60 m):	6.1 m/s	
Dirección predominante del viento:	NE	
Energía anual estimada:	2179044.6 kWh	
Potencia anual:	248.749 kW	
Horas anuales equivalentes:	2563.6 h	

Figura 7: Interfaz de la herramienta online del ITC para estimar la potencia de un aerogenerador en la zona 2 (Fuente: ITC)

Zona 3

Coord X (UTM):	344750	
Coord Y (UTM):	3101550	
Tomo detalle numérico:	<a href="#">GomeraTenerife11.pdf</a>	
Aerogenerador:	GAMESA G58/850	
Altura:	60 m	
Cte K de Weibull (60 m):	1.761	
Velocidad viento (60 m):	6.3 m/s	
Dirección predominante del viento:	NE	
Energía anual estimada:	2290628.2 kWh	
Potencia anual:	261.487 kW	
Horas anuales equivalentes:	2694.9 h	

Figura 8: Interfaz de la herramienta online del ITC para estimar la potencia de un aerogenerador en la zona 3 (Fuente: ITC)

A la vista de los resultados obtenidos, la velocidad del viento en las diferentes zonas no presenta grandes variaciones, no obstante en la zona 3 se alcanza el mayor valor de velocidad del viento además de mayor energía anual generada. Se puede observar además que no hay estructuras de tamaño significativo cerca por lo que en primera instancia no existirán problemas relacionados con la rugosidad del terreno y

con respecto al resto de condiciones, la zona en cuestión no presenta ningún problema por lo que será el emplazamiento elegido para la instalación del aerogenerador.

## 4. Selección del modelo del aerogenerador

Ahora que se ha definido el lugar de instalación, se debe elegir el modelo de aerogenerador que mejor se adapte. Por lo que se hará uso de los modelos que facilita la herramienta del ITC, no obstante puede haber la posibilidad de que algunos de ellos ya no se encuentren en el mercado por lo que esta será la primera premisa para seleccionar el modelo, también se estudiarán configuraciones de 1 o 2 aerogeneradores y claramente se estudiarán los modelos que se pueden instalar en alturas iguales o muy cercanas a la fijada en el apartado anterior. Se recuerda que, según el cálculo realizado en el anexo 2, la planta requiere la siguiente potencia anual:

Plana de desalación	
Potencia anual requerida (kWh)	4120224

Tabla 3: potencia anual EDAM (Fuente: Elaboración propia)

### 4.1. Disponibilidad en el mercado

Para comprobar si los modelos seguían en el mercado se consultó la página web TheWindPower. Se trata de un mercado online de aerogeneradores donde se pueden consultar tanto las fichas técnicas como sus fabricantes. Se realizó una comprobación de todos los modelos que brinda la herramienta y la gran mayoría son bastante antiguos por lo que ya no se encuentran a la venta. No obstante, algunos fabricantes seguían manteniendo algunos modelos así que se decidió estudiar los que estaban disponibles.

#### DEWIND

Modelo	Altura del buje (m)	Potencia (kW)	Potencia anual estimada (kWh)
D4 46	55-70	600	1470566,7
D6 60	60-91,5	1250	2646632,9
D6 62	66	1250	2773448

Tabla 4: Modelos del fabricante DEWIND (Fuente: ITC)

ENERCON

Modelo	Altura del buje (m)	Potencia (kW)	Potencia anual estimada (kWh)
E-70	55-113	2300	4552773,6
E-44	45-55	900	1734973,3
E-48	50-76	800	1890058,7

Tabla 5: Modelos del fabricante ENERCON (Fuente: ITC)

NORDEX

Modelo	Altura del buje (m)	Potencia (kW)	Potencia anual estimada (kWh)
N90	65-80	2500	5627307,7

Tabla 6: Modelos del fabricante NORDEX (Fuente: ITC)

Como se puede observar el número de modelos disponibles es muy limitado y sus potencias anuales no son muy cercanas a la requerida por la planta. Así pues la herramienta del ITC brinda otra opción donde se pueden añadir manualmente nuevos modelos que se encuentren disponibles por lo que se han buscado aerogeneradores que sean capaces de trabajar bajos las condiciones de operación requeridas. En este procedimiento se requiere la potencia y la curva de potencia del aerogenerador en cuestión.

Fabricante	Modelo	Altura del buje (m)	Potencia (kW)	Potencia anual estimada (kWh)
<b>Senvion</b>	MM82	59-100	2050	4642956,2
<b>EWT</b>	Directwind 900/61	46-69	900	2862064,5
<b>Unison</b>	U57	68	750	2288494,4
<b>Enercon</b>	E-53	60-75	800	2166974,1

Tabla 7: Modelos añadidos manualmente (Fuente: [www.thewindpower.net](http://www.thewindpower.net))

## 4.2. Estudio de la producción de cada aerogenerador

Una vez se han obtenido las potencias de varios aerogeneradores se determinará el factor de carga que presenta cada uno de ellos. Este factor relaciona la producción energética anual que es capaz de generar y la producción teórica que tendría el mismo si estuviera operando con su potencia nominal durante todo el año. La expresión que relaciona ambos parámetros es la siguiente:

$$FC (\%) = \frac{\text{Potencia anual estimada (kWh)}}{\text{Potencia anual teórica (kWh)}}$$

Y para saber si dicho valor es aceptable o no se hará una comparativa con los valores facilitados por la bibliografía. Hay que destacar que para que el aerogenerador sea viable económicamente su factor de carga tiene que estar por encima del 20%.

Factor de carga	Calificación
FC < 20%	Inaceptable
20% < FC < 25%	Aceptable
25% < FC < 30%	Bueno
30% < FC < 40%	Muy bueno
40% < FC < 50%	Excelente
FC > 50%	Extraordinario

Tabla 8: Calificación factores de carga (Fuente: Elaboración propia)

Ahora teniendo en cuenta los aerogeneradores estudiados se realiza una tabla comparativa de los factores de carga obtenidos para cada uno de ellos y la calificación obtenida.

Modelo	Unidad	Potencial nominal (kW)	Potencia anual estimada (kWh)	Factor de carga (%)	Calificación
D4-46	2	600	2941133,4	27,98	Bueno
D6-60	2	1250	5293265,8	48,34	Excelente
D6 62	2	1250	5546896	50,65	Extraordinario
E70	1	2300	4552773,6	22,60	Aceptable
N90	1	2500	5627307,7	25,70	Bueno
MM82	1	2050	4642956,2	25,85	Bueno
D 900/61	2	900	5724129	36,30	Muy bueno
U57	2	750	4576988,8	34,83	Muy bueno
E-48	2	800	3780117,4	26,97	Bueno
E-44	2	900	3469946,6	22,01	Aceptable
E-53	2	800	4333948,2	30,92	Muy bueno

Tabla 9. Comparativa factores de carga (Fuente: Elaboración propia)

### 4.3. Selección del aerogenerador

La elección se tiene que realizar estudiando en conjunto la potencia que es capaz de generar y su factor de carga. Ya que se busca un aerogenerador que presente un buen factor de carga al mismo tiempo que produce una potencia que sea muy próxima a la demandada por la EDAM. La razón principal de no tener un exceso muy grande es debida a que los sistemas de aprovechamiento de energía suponen unos gastos a la planta muy elevados, por lo que si se decide hacer uso de esta tecnología se diseñará el sistema con el fin de que almacene la cantidad necesaria de energía que podría ser requerida en situaciones de déficit de producción energética, con lo que si el excedente es muy grande, no se podrá aprovechar gran parte de él y se tendrá que verter a la red (opción poco factible ya que depende de la demanda de la red) o disiparla.

Así pues a partir de las potencias obtenidas anteriormente, se calculará el porcentaje de exceso o déficit de cada modelo. Se recuerda que la planta consume anualmente *4120224 kWh*.

Modelo	Potencia anual estimada (kWh)	Exceso o déficit energético (kWh)	Exceso o déficit energético (%)	Factor de carga (%)	Calificación
D4-46	2941133,4	-1179090,6	-28,6	27,98	Bueno
D6-60	5293265,8	1173041,8	28,5	48,34	Excelente
D6 62	5546896	1426672	34,6	50,65	Extraordinario
E70	4552773,6	432549,6	10,5	22,60	Aceptable
N90	5627307,7	1507083,7	36,6	25,70	Bueno
MM82	4642956,2	522732,2	12,7	25,85	Bueno
D 900/61	5724129	1603905	38,9	36,30	Muy bueno
<b>U57</b>	<b>4576988,8</b>	<b>456764,8</b>	<b>11,1</b>	<b>34,83</b>	<b>Muy bueno</b>
E-48	3780117,4	-340106,6	-8,3	26,97	Bueno
E-44	3469946,6	-650277,4	-15,8	22,01	Aceptable
E-53	4333948,2	213724,2	5,2	30,92	Muy bueno

Tabla 10: Exceso o déficit de cada aerogenerador (Fuente: Elaboración propia)

En la tabla anterior se puede observar que los valores en rojo indican que el aerogenerador es incapaz de generar la energía demandada por la EDAM por lo que se descartan directamente. El resto de los modelos aptos para cubrir la demanda presentan

una gran variedad de valores de exceso, por lo que en función de lo comentado previamente se estudiará cuáles se adaptan mejor a dicha situación.

Se descartan los aerogeneradores que presenten un exceso superior al 20% dado que no se requiere una producción de energía eléctrica tan alta, ya que su almacenamiento puede ser inviable, y por consiguiente se pueden tener dificultades a la hora de verterla a la red o disiparla.

Y ahora se estudia el factor de carga de los modelos restantes. El modelo E70 de la empresa Enercon está calificado como aceptable y el MM82 de Senvion como bueno, por lo que en un primer momento se descartan ambos modelos. Nos quedarían únicamente dos aerogeneradores con la calificación de muy bueno, que son el U57 de la empresa Unison y el E-53 de Enercon. Ambos modelos presentan excesos y factores de carga muy parecidos, con lo que se decide elegir el modelo U57.

Esta decisión se debe principalmente a la parada en el mes de diciembre que se le impuso a la EDAM en el apartado donde se calculó su capacidad. Ya que esto influye directamente en la energía estimada para cada aerogenerador porque si la planta se encuentra en estado no operativo durante un mes, se entiende que el sistema de aprovechamiento del recurso eólico no está generando energía alguna. En consecuencia, el valor de potencia calculado por la herramienta del ITC será algo menor, así que con el fin de asegurar el abastecimiento, se decide seleccionar el modelo que genera el mayor exceso. También es remarcable que el factor de carga del modelo U57 es algo mayor al del otro modelo estudiado.

## 4.4. Comprobación de la potencia y el emplazamiento

### 4.4.1. Cálculo de la potencia estimada

En el siguiente apartado se realizará el cálculo de manera manual de la potencia estimada anual que genera el aerogenerador. Para ello se requiere la distribución de probabilidad para el rango de velocidades seleccionado y la curva de potencia del aerogenerador. A continuación se muestran los datos referentes a la curva de potencia del aerogenerador.

Viento [m/s]	Potencia [kW]	Viento [m/s]	Potencia [kW]	Viento [m/s]	Potencia [kW]
0	0	10.5	730	20.5	750
0.5	0	11	750	21	750
1	0	11.5	750	21.5	750
1.5	0	12	750	22	750
2	0	12.5	750	22.5	750
2.5	7	13	750	23	750
3	15	13.5	750	23.5	750
3.5	30	14	750	24	750
4	45	14.5	750	24.5	750
4.5	68	15	750	25	750
5	91	15.5	750	25.5	0
5.5	126	16	750	26	0
6	162	16.5	750	26.5	0
6.5	203	17	750	27	0
7	245	17.5	750	27.5	0
7.5	302	18	750	28	0
8	360	18.5	750	28.5	0
8.5	434	19	750	29	0
9	509	19.5	750	29.5	0
9.5	577	20	750	30	0
10	645				

Figura 9: Valores de la curva de potencia del aerogenerador (Fuente: ITC)

Y la herramienta online del ITC nos brinda los parámetros necesarios para calcular la distribución de probabilidad. No obstante para calcular la distribución de Weibull se requiere tanto el factor de forma como el de escala. Para calcular el factor de escala se puede usar la siguiente expresión que relaciona el factor de forma y la velocidad media anual dada por la herramienta mediante la función gamma.

Coord X (UTM):	344750 (más próxima)	
Coord Y (UTM):	3101550 (más próxima)	
Tomo detalle numérico:	<a href="#">Gomera Tenerife 11.pdf</a>	
Aerogenerador:	Unison U57	Ⓜ
Altura:	68 m	
Cte K de Weibull (68 m):	1.7478	?
Velocidad viento (68 m):	6.4 m/s	
Dirección predominante del viento:	NE	
Energía anual estimada:	2288494.4 kWh	?
Potencia anual:	261.244 kW	?
Horas anuales equivalentes:	3051.3 h	?

Figura 10: Interfaz de la herramienta online del ITC para estimar la potencia de modelo seleccionado (Fuente: ITC)

$$c = \frac{V_m}{\tau \left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

Ecuación 2: expresión de cálculo del factor de escala (c)

$$c = \frac{6,4 \text{ m/s}}{\tau \left(1 + \frac{1}{1,7478}\right)}$$

$$c = 7,1855 \text{ m/s}$$

Obtenidos los parámetros de la distribución se determina la potencia del aerogenerador. Para ello se realiza la combinación de la curva de potencia del aerogenerador y la distribución de velocidades, obteniendo así la siguiente expresión:

$$\bar{P} = \int_{va}^{vp} P_{AG}(v) * f(v) * dv$$

*Ecuación 3: Potencia promedio de un aerogenerador*

Donde  $vp$  es la velocidad de parada del aerogenerador y  $va$  es la velocidad de arranque.  $P_{AG}$  corresponde a la curva de potencia del aerogenerador y  $f(v)$  a la distribución de velocidades.

Para la obtención de la potencia estimada se realizarán los cálculos mediante Excel. Esto implica que no se realizará la integración como tal sino que se realizará un sumatorio de intervalos de 0,5 m/s de velocidad de viento ya que el error obtenido es muy pequeño.

Velocidad (m/s)	f(v)	P <sub>AG</sub> (v)	Potencia (kW)
2	0,08399	0	0,00
2,5	0,09431	7	0,33
3	0,10186	15	0,76
3,5	0,10688	30	1,60
4	0,10959	45	2,47
4,5	0,11025	68	3,75
5	0,1091	91	4,96
5,5	0,10642	126	6,70
6	0,10247	162	8,30
6,5	0,0975	203	9,90
7	0,09176	245	11,24
7,5	0,08548	302	12,91
8	0,07888	360	14,20
8,5	0,07212	434	15,65
9	0,06538	509	16,64
9,5	0,05878	577	16,96
10	0,05242	645	16,91
10,5	0,04639	730	16,93
11	0,04076	750	15,28
11,5	0,03554	750	13,33
12	0,03078	750	11,54
12,5	0,02648	750	9,93

13	0,02262	750	8,48
13,5	0,0192	750	7,20
14	0,01619	750	6,07
14,5	0,01357	750	5,09
15	0,0113	750	4,24
15,5	0,00935	750	3,51
16	0,0077	750	2,89
16,5	0,0063	750	2,36
17	0,00512	750	1,92
17,5	0,00414	750	1,55
18	0,00333	750	1,25
18,5	0,00266	750	1,00
19	0,00212	750	0,79
19,5	0,00167	750	0,63
20	0,00132	750	0,49
20,5	0,00103	750	0,39
21	0,0008	750	0,30
21,5	0,00062	750	0,23
22	0,00048	750	0,18
22,5	0,00037	750	0,14
23	0,00028	750	0,10
23,5	0,00021	750	0,08
24	0,00016	750	0,06
24,5	0,00012	750	0,04
25	9E-05	750	0,03
<b>TOTAL</b>			259,322

Tabla 11: Valores de potencia obtenidos para el rango de velocidades estudiado (Fuente: Elaboración propia)

Calculada la potencia para cada uno de los valores de velocidad se realiza una comparativa entre dicho valor y el obtenido mediante la herramienta del ITC.

Método de cálculo	Potencia anual (kW)
ITC	261,244
Excel	259,322

Tabla 12: Potencia anual (Fuente: Elaboración Propia)

Se puede observar que el valor obtenido mediante la tabla de Excel es muy aproximado al calculado por la herramienta. Por lo que se puede confirmar que el

proceso de cálculo se realizó de manera exitosa y se reafirma que el aerogenerador seleccionado es la idóneo para la planta bajo estudio.

#### 4.4.2. Configuración y emplazamiento de los aerogeneradores

En el apartado de emplazamiento previamente realizado se seleccionó el lugar exacto para un solo aerogenerador. Pero después de seleccionar el modelo a utilizar, se decidió que la configuración más eficiente era implantando dos aerogeneradores. Por eso se tiene que estudiar un segundo emplazamiento para instalar el aerogenerador restante. Respetando las premisas previamente impuestas y atendiendo a los siguientes aspectos recogidos en el Decreto 6/2015, de 30 enero.

- ❖ Como norma general la distancia mínima entre dos aerogeneradores de una misma línea no será inferior a dos diámetros de rotor.
- ❖ la distancia entre un aerogenerador y un núcleo habitado no será inferior a 250 metros para aerogeneradores de potencia inferior a 900 kW y a 400 metros para aerogeneradores de potencia superior.

En cuanto a la distancia mínima, el diámetro del rotor es de 57m por lo que la distancia mínima entre ambos es de 114m. Y como su potencia es inferior a los 900 kW, la distancia al núcleo de población más cercano no puede ser inferior a 250 metros. La disposición final de los aerogeneradores es la siguiente:

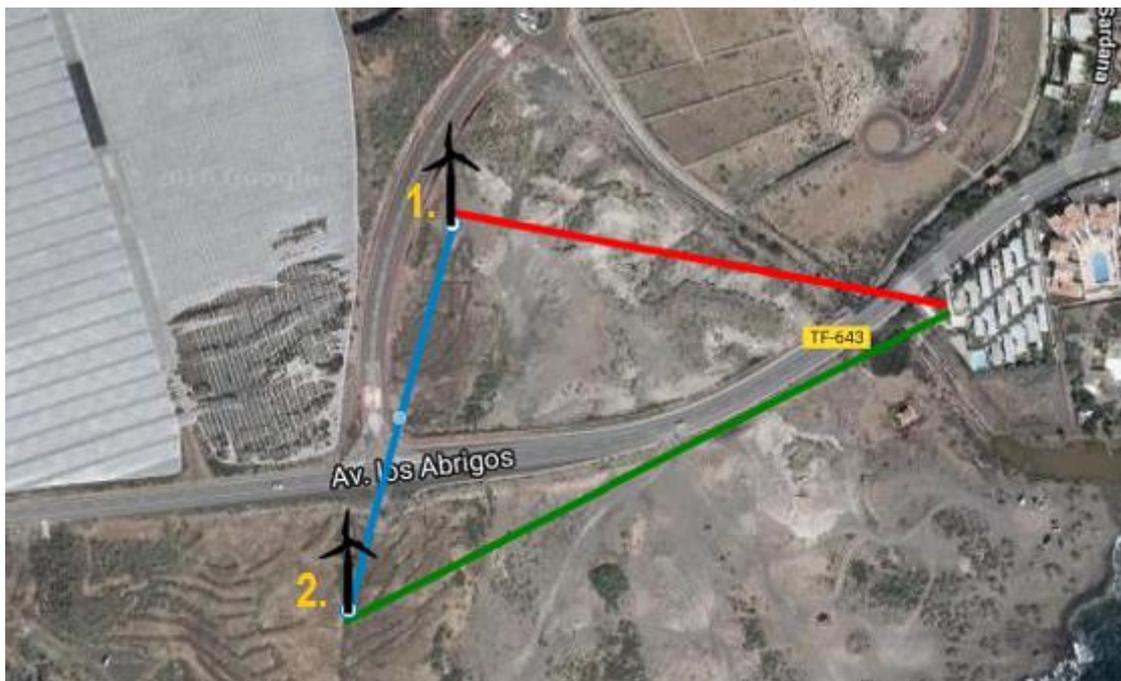


Figura 11: Disposición de los aerogeneradores (Fuente: Elaboración propia. Goolzoom)

Donde:

- La distancia entre ambos aerogeneradores es de 218 metros.
- La distancia del aerogenerador 1 con respecto al núcleo de población más cercano es de 268 metros mientras que la del aerogenerador 2 es de 364 metros.

Por tanto, se cumplen ambas condiciones y se da por bueno el emplazamiento elegido para ambos aerogeneradores.

El posible inconveniente que se presenta ahora es que al estar en emplazados en lugares distintos su potencia estimada puede ser diferente. Para realizar la comprobación se utilizará la herramienta del ITC siguiendo el procedimiento ya comentado.

Coord X (UTM):	344750 (más próxima)	
Coord Y (UTM):	3101750 (más próxima)	
Tomo detalle numérico:	<a href="#">GomeraTenerife11.pdf</a>	
Aerogenerador:	Unison U57	?
Altura:	68 m	
Cte K de Weibull (68 m):	1.7568	?
Velocidad viento (68 m):	6.3 m/s	
Dirección predominante del viento:	NE	
Energía anual estimada:	2194105.2 kWh	?
Potencia anual:	250.469 kW	?
Horas anuales equivalentes:	2925.5 h	?

Figura 12: Interfaz de la herramienta online del ITC para estimar la potencia del segundo aerogenerador (Fuente: ITC)

Se observa una disminución con respecto al emplazamiento dos. Para saber con más detalle el impacto que tiene esta variación, volveremos a calcular la potencia total generada y exceso energético.

Aerogenerador	Potencia anual estimada (kWh)	Exceso o déficit energético (kWh)	Exceso o déficit energético (%)	Factor de carga (%)	Calificación
1.	2194105,2	363375,6	8,8	33,40	Muy bueno
2.	2288494,4			34,83	Muy bueno

Tabla 13: Exceso de la configuración de dos aerogeneradores (Fuente: Elaboración propia)

Y debido a esa disminución se observa un impacto tanto en el exceso como en el factor de carga, pero que no supone un cambio drástico en sus condiciones de operación

de modo que se siguen manteniendo tanto el modelo como la disposición de los aerogeneradores.

Una vez finalizado el proceso de dimensionado se elabora una tabla con las especificaciones técnicas más relevantes y las condiciones de operación del aerogenerador.

### **Especificaciones técnicas**

<b><i>Fabricante</i></b>	<b><i>Unison</i></b>
<b><i>Modelo</i></b>	<b><i>U57</i></b>
<b><i>Potencia nominal</i></b>	<b><i>750 kW</i></b>
<b><i>Diámetro</i></b>	<b><i>57 m</i></b>
<b><i>Clase de viento</i></b>	<b><i>IEC IIIa</i></b>
<b><i>Compatible offshore</i></b>	<b><i>no</i></b>
<b><i>Área de barrido</i></b>	<b><i>2552 m<sup>2</sup></i></b>
<b><i>Densidad de potencia</i></b>	<b><i>3,41 m<sup>2</sup>/kW</i></b>
<b><i>Número de palas</i></b>	<b><i>3</i></b>
<b><i>Limitación de potencia</i></b>	<b><i>Pitch</i></b>
<b><i>Velocidad mínima del rotor</i></b>	<b><i>9 vuelta/min</i></b>
<b><i>Velocidad máxima del rotor</i></b>	<b><i>28 vuelta/min</i></b>
<b><i>Velocidad de arranque</i></b>	<b><i>2,5 m/s</i></b>
<b><i>Velocidad nominal</i></b>	<b><i>11 m/s</i></b>
<b><i>Velocidad de parada</i></b>	<b><i>25 m/s</i></b>
<b><i>Caja de cambios</i></b>	<b><i>no</i></b>
<b><i>Generador</i></b>	<b><i>SYNCPM</i></b>
<b><i>Velocidad de salida máxima</i></b>	<b><i>28 vuelta/min</i></b>
<b><i>Altura de la Góndola</i></b>	<b><i>68 m</i></b>

*Tabla 14: Especificaciones Técnicas del modelo de aerogenerador U57 de la empresa Unison (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de [www.thewindpower.net](http://www.thewindpower.net))*

### **Condiciones de operaci3n**

<b>Configuraci3n</b>	<b>2 aerogeneradores</b>
<b>F.C (aerogenerador 1)</b>	<b>33,40</b>
<b>F.C (aerogenerador 2)</b>	<b>34,83</b>
<b>Producci3n anual estimada</b>	<b>4482600 kWh</b>
<b>Potencia EDAM</b>	<b>4120224 kWh</b>
<b>Exceso energ3tico</b>	<b>8,8 %</b>

Tabla 15: Condiciones de operaci3n aerogenerador (Fuente: Elaboraci3n propia)

Y a modo complementario se adjunta una imagen del modelo seleccionado y su curva de potencia.



Figura 13: Imagen del modelo de aerogenerador U57 del fabricante Unison (Fuente: Unison)

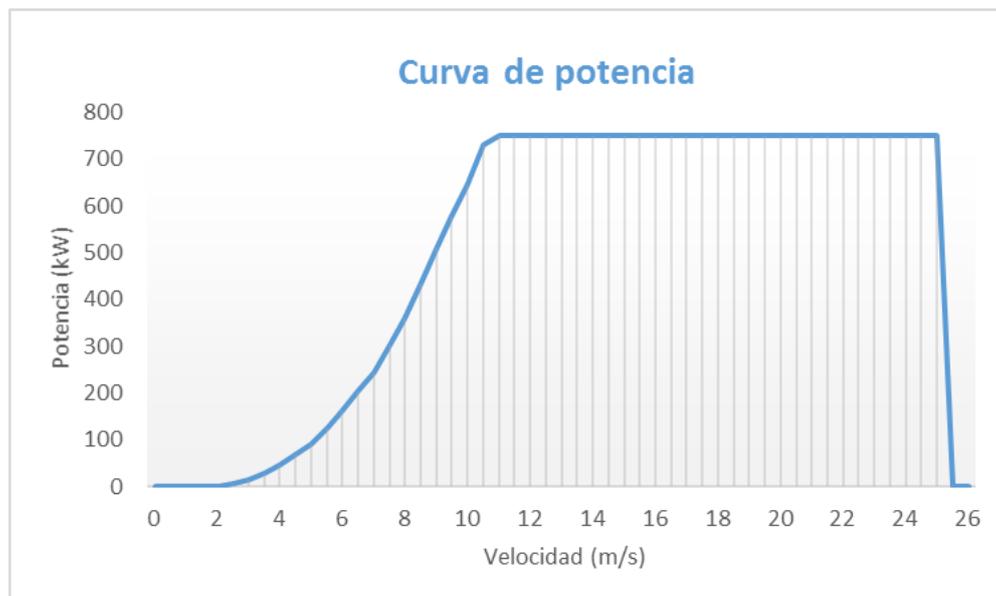


Figura 14: Curva de potencia del modelo U57 (Fuente: Elaboraci3n propia)

## 5. Abastecimiento de la EDAM

En este apartado se definirá la configuración elegida para abastecer a la EDAM y las características que esta presenta.

Para la EDAM bajo estudio se ha decidido que se cubrirá su demanda energética mediante el recurso eólico en primera instancia, y como segunda opción en caso de déficit energético se consumirá energía de la red de distribución eléctrica. Esta elección se debe principalmente a que una instalación como la que se está tratando se diseña de forma que trabaje de manera continua y en régimen estacionario. Estas dos situaciones no se compatibilizan con el uso de recursos renovables exclusivamente dado que el inconveniente principal de estos es que son aleatorios y variables a lo largo del tiempo por lo que es difícil mantener una situación estable de abastecimiento energético. En un primer momento el dimensionado realizado en este anexo garantiza un abastecimiento completo de la planta además de producir un cierto exceso, como en este caso no se baraja el uso de sistemas de aprovechamiento, sólo hay dos formas de gestionarlo. Mediante su vertido a la red eléctrica o disipándolo.

El vertido a la puede ser una buena forma de aprovechar dicho exceso ya que según lo dispuesto en la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico, se indica que la energía vertida a la red eléctrica por parte de una instalación que utilice fuentes renovables tendrá prioridad de acceso y conexión a la red. Pero a su vez el principal inconveniente es que el vertido depende del estado en el que se encuentra la red en el momento que se vaya a realizar, ya que si la demanda de la red es baja, el operador del sistema restringe el vertido de la energía procedente del recurso renovable. Por lo que no existe una garantía de que siempre se pueda realizar el vertido si hay un excedente.

En el caso de que nos encontremos en dicha situación se hará uso de la segunda opción. Que es disipar la energía desalineando el aerogenerador. Este método no implica ningún coste adicional sobre la planta dado que únicamente se modifica la orientación del aerogenerador para reducir la intensidad con la que incide el viento sobre él. Dependiendo del modelo de aerogenerador, se puede realizar el desalineado de una forma u otra. La primera forma es haciendo rotar las palas ya que se consigue que el viento incida en menor media sobre ellas lo que se traduce en una reducción de

la generación de energía. Si el aerogenerador no tiene esta opción, se puede conseguir el mismo resultado haciendo girar la góndola, que mediante la corona de orientación, provoca que a su vez se muevan las palas.

Por lo que se puede llegar a la conclusión de que este método garantiza el correcto funcionamiento de la EDAM aunque haya momentos donde no se pueda aprovechar la energía y otros donde se tenga que recurrir a la red, pagando el kWh correspondiente.

## **6. Sistema de aprovechamiento de energía**

En este apartado se buscar mostrar los diversos métodos de aprovechamiento que se podrían instalar en la EDAM para hacer uso del exceso energético que se podría dar cuando el recurso eólico genere una cantidad de energía superior a la demandada por la planta.

El dimensionado realizado en este anexo ha culminado con la selección de una configuración de aerogeneradores que se encargan de abastecer la planta. Su generación de energía es tal que producen un exceso que podría almacenarse. Pero al ser un proyecto no ejecutable, se están dejando de lado instalaciones de la EDAM que también podrían estar consumiendo de la energía eléctrica generada (instalaciones de control, alumbrado, seguridad, etc.), y tal vez el propio exceso que se tenía previamente podría destinarse enteramente a alimentarlas. O se podría dar el caso contrario, donde la demanda de energía fuese tan alta que los aerogeneradores dimensionados actualmente serían incapaces de cubrirla y habría que realizar un nuevo proceso de selección para elegir una configuración capaz de generar mayor energía. En el presente estudio no se baraja esta posibilidad ya que como únicamente se ha dimensionado el núcleo de desalación como tal, se desconoce las características y consumos que podrían tener el resto de las instalaciones.

De modo que como no se tiene conocimiento de los costes y consumos que tendrían la totalidad de las instalaciones de la EDAM, se decide que en este apartado no se realizará ningún proceso de dimensionado de ningún sistema de aprovechamiento de energía ya que son tecnologías que podrían llegar a suponer un elevado coste y su implantación podría no ser rentable con el paso del tiempo. Por tanto se realizará una

descripción de los métodos de aprovechamiento de la energía sobrante en este tipo de instalaciones para poner en conocimiento su funcionamiento por si en futuro se plantea proyectar la EDAM bajo estudio en combinación con uno de estos sistemas.

## 6.1. Bombeo hidráulico

Su principio de funcionamiento es el de almacenar a la energía eléctrica en forma de energía potencial. Para ello se hace uso del excedente de energía para alimentar un sistema de bombeo que eleve una masa de agua desde un embalse a otro que se encuentre a una mayor cota con respecto al anterior. Cuando exista demanda energética, se libera el agua almacenada para que vuelva al embalse inicial, pero mientras se está realizando el trasvase de agua, se le hace pasar a ésta a través de una turbina, que es la que se encarga de generar la energía eléctrica.

El problema de este método es que depende de la orografía ya que se requieren dos zonas de gran superficie para implantar los depósitos, además de una diferencia de cota entre ellos notoria para conseguir una alta generación de energía.



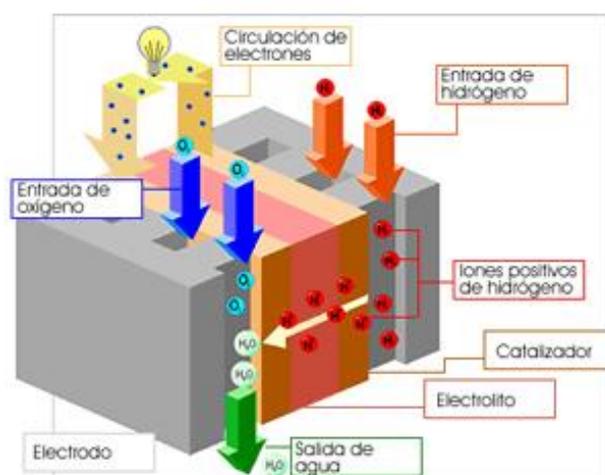
Figura 15: Bombeo hidráulico (Fuente: Energía (2013) Origo Ed. Chile)

## 6.2. Aire comprimido

El exceso de energía eléctrica se utiliza para alimentar una serie de compresores que se encargan de comprimir aire. Cuando exista un pico de demanda de energía que el sistema eólico no sea capaz de cubrir se hace pasar el aire comprimido por un conjunto de turbinas que generaran la energía eléctrica.

### 6.3. Hidŕgeno

Consiste en la producci3n de hidr3geno a partir de agua. Para conseguir la generaci3n de hidr3geno se realiza el proceso de electrolisis mediante el paso del exceso de energa el3ctrica por el agua. Esto provoca que las mol3culas de agua se separen dando as3 sus elementos fundamentales, hidrogeno y ox3geno. Este proceso presenta un elevado coste pero tiene una caracter3stica muy notoria, no produce ninguna clase de emisi3n. Una vez separado el hidr3geno se almacena en un tanque destinado para ello. Y cuando se den situaciones donde el recurso e3lico sea incapaz de cubrir la demanda de la EDAM, se extrae la energa almacenada en el hidr3geno. Este proceso se lleva a cabo mediante una pila de combustible de hidr3geno que convierte la energa qu3mica en energa el3ctrica. Para dar lugar la reacci3n se hace uso de dos elementos: el hidr3geno, el cual se hace combustionar y el ox3geno, que es el que propicia la reacci3n. Y de la reacci3n se obtiene energa el3ctrica, agua y calor.



*Figura 16. Pila de combustible de hidr3geno (Fuente: Instituto de s3ntesis qu3mica y cat3lisis homog3nea Universidad de Zaragoza)*

El hidr3geno generado tambi3n se destinar a otros usos. Por ejemplo se puede vender a industrias que hagan uso de este o emplearlo como combustible para autom3viles. El 3nico inconveniente que presenta esta tecnologa es que presenta un coste de inversi3n bastante alto, que pueden variar desde los 2000 €/kW hasta los 9000€/kW.