

ULL

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 MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA

Autores: Eduardo José Delgado Trujillo

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Julio 2016



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado en Ingeniería Mecánica

ÍNDICE GENERAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO MEDIANTE
ENERGÍA EÓLICA**

Autor: Eduardo José Delgado Trujillo

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Memoria

1.	Objeto.....	14
1.1.	Abstract.....	14
2.	Alcance.....	15
3.	Antecedentes.....	16
3.1.	Escasez de recursos hidráulicos.....	16
3.2.	Disponibilidad y distribución de los recursos hídricos.....	19
3.3.	Situación hidrológica en Canarias.....	22
3.4.	Recursos hídricos renovables en Canarias.....	27
3.5.	Recursos hídricos no convencionales en Canarias.....	28
3.5.1.	Desalinización de agua de mar o salobre.....	29
3.5.2.	Reutilización de aguas residuales.....	34
3.6.	Desalación.....	36
3.6.1.	Sistemas de desalación.....	37
3.6.2.	Comparación entre los diferentes sistemas de desalación.....	44
3.7.	Configuración de planta desaladora de ósmosis inversa.....	47
3.7.1.	Captación del agua de mar.....	48
3.7.2.	Pretratamientos físico-químicos.....	51
3.7.3.	Núcleo de desalación.....	52
3.7.4.	Posttratamiento del permeado.....	56
3.7.5.	Salmuera.....	57
3.8.	Energías renovables aplicadas a la desalación.....	58
3.8.1.	Uso indirecto.....	58
3.8.2.	Uso directo.....	59
3.8.3.	Uso mixto.....	60
3.9.	Ejemplo de aplicación en Canarias.....	60
3.10.	Energía eólica.....	62
3.10.1.	El viento.....	63
3.10.2.	Energía contenida en el viento.....	65
3.10.3.	Aerogeneradores.....	65
3.10.4.	Evolución de la energía eólica.....	69

4.	Normas y referencia.....	73
4.1.	Disposiciones legales y normas aplicadas.....	73
4.2.	Bibliografía.....	73
4.3.	Programas de cálculo.....	75
5.	Definiciones y abreviaturas.....	76
5.1.	Definiciones.....	76
5.2.	Abreviaturas.....	76
6.	Requisitos de diseño.....	77
6.1.	Datos del peticionario.....	77
6.2.	Situación y emplazamiento.....	77
6.3.	Capacidad de la planta.....	90
6.4.	Temperatura del agua.....	92
6.5.	Composición del agua de alimentación.....	94
7.	Análisis de soluciones.....	95
7.1.	Pretratamiento.....	96
7.1.1.	Pretratamiento físico.....	96
7.1.2.	Pretratamiento químico.....	97
7.2.	Selección de las membranas de ósmosis inversa.....	98
7.3.	Selección del sistema de recuperación de energía.....	111
7.3.1.	Comparación entre distintos sistemas de recuperación de energía.....	111
7.3.2.	Selección del intercambiador de presión.....	112
7.4.	Selección de la bomba booster.....	115
7.5.	Selección de la bomba de alta presión.....	117
7.6.	Selección de la bomba de captación.....	119
7.7.	Selección de la bomba de distribución.....	122
7.8.	Rechazo de salmuera.....	125
7.9.	Cálculos energéticos del sistema de desalación.....	125
7.10.	Elección del aerogenerador.....	127
8.	Resultados finales.....	132
8.1.	Ubicación y finalidad de la planta.....	132
8.2.	Sistema de captación.....	132
8.3.	Pretratamiento.....	133

8.4.	Núcleo de desalación.....	133
8.4.1.	Membranas de ósmosis inversa.....	133
8.4.2.	Bomba de alta presión.....	134
8.4.3.	Sistema de recuperación de energía.....	134
8.5.	Sistema de distribución.....	135
8.6.	Salmuera.....	135
8.7.	Tabla de resultados.....	135
9.	Conclusiones.....	136
10.	Conclusions.....	138

Anexos

1.	Cálculo de la matriz de membranas.....	10
1.1.	Software de dimensionado.....	10
1.2.	Introducción de datos.....	11
1.2.1.	Composición del agua de alimentación.....	11
1.2.2.	Temperatura del agua de alimentación.....	13
1.2.3.	Introducción de datos a través de la interfaz del programa.....	15
1.3.	Elección de las membranas.....	17
1.3.1.	Cálculo del número de membranas.....	19
1.4.	Comparación entre diferentes membranas.....	27
1.5.	Selección de la membrana y resultados obtenidos.....	28
2.	Selección de bombas y recuperación de energía.....	32
2.1.	Comparativa entre distintos sistemas de recuperación de energía	32
2.1.1.	Turbo-charger	32
2.1.2.	Turbina Pelton.....	33
2.1.3.	Intercambiador de presión.....	34
2.2.	Selección del sistema de recuperación más adecuado.....	37
2.3.	Intercambiador de presión seleccionado.....	38
2.4.	Elección de la bomba booster.....	43
2.4.1.	Bomba Booster seleccionada.....	54
2.5.	Elección de la bomba de alta presión.....	55
2.5.1.	Bomba de alta presión seleccionada	62
2.6.	Elección de la bomba captación.....	63
2.6.1.	Método de captación	64
2.6.2.	Pozos captación.....	66
2.6.3.	Tuberías.....	68
2.7.	Elección de la bomba de distribución.....	86
2.7.1.	Bomba de distribución seleccionada	99
3.	Dimensionado del sistema eólico.....	101
3.1.	Estudio de las condiciones eólicas.....	101
3.2.	Selección del aerogenerador.....	106

3.3.	Solución para la variabilidad de producción eólica.....	112
4.	Cálculos energéticos.....	115
4.1.	Consumo específico de la planta.....	115
4.2.	Costes de producción y consumo energético anual.....	117

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado en Ingeniería Mecánica

MEMORIA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO
MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA**

Autor: Eduardo José Delgado Trujillo

Tutor: Vicente José Romero Ternero

HOJA DE IDENTIFICACIÓN

TÍTULO DEL PROYECTO

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA

DATOS DEL COLEGIO

NOMBRE: ESCUELA SUPERIOR DE INGENERÍA Y TECNOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DIRECCIÓN: CAMINO SAN FRANCISCO DE PAULA, S/N. CAMPUS DE ANCHETA. CÓDIGO POSTAL 38206, SAN CRISTOBAL DE LA LAGUNA, TENERIFE, ESPAÑA

TELEFONO: 922845059

DATOS DEL AUTOR

NOMBRE: EDUARDO JOSÉ DELGADO TRUJILLO

DNI: 78638820-A

DATOS DEL TUTOR

NOMBRE: VICENTE JOSÉ ROMERO TERNERO

FECHA

JULIO 2016

Índice

1. Objeto.....	15
1.1. Abstract	15
2. Alcance	16
3. Antecedentes	17
3.1. Escasez de recursos hidráulicos.....	17
3.2. Disponibilidad y distribución de los recursos hídricos.....	20
3.3. Situación hidrológica en Canarias.....	23
3.4. Recursos hídricos renovables en Canarias	28
3.5. Recursos hídricos no convencionales en Canarias	29
3.5.1. Desalinización de agua de mar o salobre	30
3.5.2. Reutilización de aguas residuales	35
3.6. Desalación	37
3.6.1. Sistemas de desalación.....	38
3.6.2. Comparación entre los diferentes sistemas de desalación	45
3.7. Configuración de planta desaladora de ósmosis inversa	48
3.7.1. Captación del agua de mar	49
3.7.2. Pretratamientos físico-químicos.....	52
3.7.3. Núcleo de desalación.....	53
3.7.4. Postratamiento del permeado	57
3.7.5. Salmuera.....	58
3.8. Energías renovables aplicadas a la desalación	59
3.8.1. Uso indirecto	59
3.8.2. Uso directo	60
3.8.3. Uso mixto	61
3.9. Ejemplo de aplicación en Canarias	61
3.10. Energía eólica	63
3.10.1. El viento.....	64
3.10.2. Energía contenida en el viento.....	66
3.10.3. Aerogeneradores.....	66
3.10.4. Evolución de la energía eólica	70
4. Normas y referencia.....	74
<i>Estudio de un sistema de desalación alimentado mediante energía eólica</i>	5

4.1.	Disposiciones legales y normas aplicadas	74
4.2.	Bibliografía	74
4.3.	Programas de cálculo	76
5.	Definiciones y abreviaturas	77
5.1.	Definiciones	77
5.2.	Abreviaturas	77
6.	Requisitos de diseño	78
6.1.	Datos del peticionario	78
6.2.	Situación y emplazamiento	78
6.3.	Capacidad de la planta	91
6.4.	Temperatura del agua	93
6.5.	Composición del agua de alimentación.....	95
7.	Análisis de soluciones.....	96
7.1.	Pretratamiento	97
7.1.1.	Pretratamiento físico.....	97
7.1.2.	Pretratamiento químico	98
7.2.	Selección de las membranas de ósmosis inversa	99
7.3.	Selección del sistema de recuperación de energía	112
7.3.1.	Comparación entre distintos sistemas de recuperación de energía	112
7.3.2.	Selección del intercambiador de presión	113
7.4.	Selección de la bomba booster	116
7.5.	Selección de la bomba de alta presión.....	118
7.6.	Selección de la bomba de captación	120
7.7.	Selección de la bomba de distribución.....	123
7.8.	Rechazo de salmuera.....	126
7.9.	Cálculos energéticos del sistema de desalación.....	126
7.10.	Elección del aerogenerador.....	128
8.	Resultados finales.....	133
8.1.	Ubicación y finalidad de la planta	133
8.2.	Sistema de captación.....	133
8.3.	Pretratamiento	134
8.4.	Núcleo de desalación	134

8.4.1.	Membranas de ósmosis inversa	134
8.4.2.	Bomba de alta presión.....	135
8.4.3.	Sistema de recuperación de energía	135
8.5.	Sistema de distribución	136
8.6.	Salmuera.....	136
8.7.	Tabla de resultados	136
9.	Conclusiones	137
10.	Conclusions	139

Índice de figuras

Figura 1. Distribución del agua en el planeta Tierra.....	18
Figura 2. Distribución del agua dulce sobre la superficie de la Tierra.....	19
Figura 3. Crecimiento de la población mundial (1951-2015).	20
Figura 4. Desarrollo de la población en Canarias (1768-2015).....	23
Figura 5. Recursos en Canarias según su porcentaje.	25
Figura 6. Consumos en Canarias según sus porcentajes.	25
Figura 7. Uso medio de agua por superficie en parcela según tipos de cultivo en metro cúbico por hectárea y año.	26
Figura 8. Recursos en la isla de Tenerife según sus porcentajes (PHT, 2010).	27
Figura 9. Consumos en la isla de Tenerife según sus porcentajes (PHT, 2010).	27
Figura 10. Balance hídrico subterráneo de la isla de Tenerife (Gobierno de Canarias).	29
Figura 11. Primera desaladora de Canarias, isla de Lanzarote 1964 (Diario Atlántida).	30
Figura 12. Capacidad operativa de desalación en metros cúbicos día y porcentaje de desalación por Comunidades Autónomas respecto al total desalado en España (Gobierno de Canarias).....	32
Figura 13. Capacidad de producción y número de plantas desaladoras instalado en Canarias (Gobierno de Canarias).....	34
Figura 14. Porcentaje de producción de agua desalada según tecnologías aplicadas.	35
Figura 15. Volumen reutilizado en metros cúbicos días y porcentaje de volumen utilizado frente al volumen depurado en España (Gobierno de Canarias).	36
Figura 16. Consumo de aguas regeneradas en Canarias.	37
Figura 17. Clasificación de los procesos de desalación.	38
Figura 18. Esquema de una etapa de un evaporador MSF (Autor: José Miguel Veza).....	39
Figura 19. Esquema de un efecto horizontal de evaporación (Autor: José Miguel Veza).	40
Figura 20. Esquema del proceso de compresión de vapor (Autor: José Miguel Veza).....	42
Figura 21. Proceso de electrodiálisis (Autor: Antonio Ros Moreno).	43
Figura 22. Proceso de ósmosis natural.....	44
Figura 23. Proceso de ósmosis inversa.....	44
Figura 24. Precio en euros del metro cúbico según la tecnología usada (Wade, 2001).....	46

Figura 25. Esquema de la distribución de los elementos de una planta desaladora de ósmosis inversa.....	49
Figura 26. Bomba de alta presión Multitec RO (KSB).....	54
Figura 27. Esquema de una membrana de arrollamiento en espiral.	55
Figura 28. Interior de un intercambiador de presión (Energy Recovery).....	56
Figura 29. Uso indirecto de energías renovables para la desalación (Autor: José Miguel Veza).	60
Figura 30. Uso directo de energías renovables para la desalación (Autor: José Miguel Veza).	61
Figura 31. Fotografía de los aerogeneradores que abastecen energéticamente a la desaladora de Corralejo (Fotografía: Carlos González).	62
Figura 32. Sistema Dessol para la desalación de agua de mar o salobre (ITC).....	63
Figura 33. Circulación de las diferentes masas de aire en la Tierra.....	65
Figura 34. Potencia eólica anual instalada en el mundo en el periodo 2000-2015 (GWEC). ..	70
Figura 35. Potencia eólica instalada en el mundo (GWEC).	71
Figura 36. Evolución de la potencia eólica instalada en año a año en España (AEE).	71
Figura 37. Potencia instalada por Comunidades Autónomas en 2015 (AEE).	72
Figura 38. Evolución de la potencia eólica instalada en Canarias (Gobierno de Canarias).	73
Figura 39. Precipitación convencional media entre los años 1944- 2010 (PHT).	80
Figura 40. Estado cuantitativo de las masas de aguas subterráneas (PHT).....	81
Figura 41. Índices de potencia eólico en Tenerife (PIOT, 2011).	82
Figura 42. Mapa eólico de Tenerife, zonas de compatibilidad e incompatibilidad (PIOT, 2011)	83
Figura 43. Población y crecimiento de la misma en los distintos municipios de Tenerife. Elaboración a partir de los datos de ISTAC (PHT).	84
Figura 44. Empleo total en 2008 y crecimiento del mismo entre los años 2003 y 2008 en media anual y total acumulado. Elaboración a partir de datos de la EPA.....	85
Figura 45. Demanda de regadío en Tenerife (PHT).	86
Figura 46. Espacios naturales protegidos en la isla de Tenerife (PIOT, 2011).	87
Figura 47. Usos del suelo (PIOT, 2011).....	88
Figura 48. Ordenación del territorio en la zona de estudio (Grafcan).	89
Figura 49. Parcela elegida para la ubicación de la planta desaladora.....	89

Figura 50. Referencia catastral de la parcela elegida.....	90
Figura 51. Mapas de cultivos en los alrededores del aeropuerto Tenerife Sur (en rojo el cultivo de tomate).....	92
Figura 52. Datos de temperaturas máximas y mínimas por mes obtenidas por la boya de Tenerife Sur (Puertos del Estado).....	94
Figura 53. Datos de temperaturas medias por mes obtenidas por la boya de Tenerife Sur (Puertos del Estado).	94
Figura 54. Interfaz de selección de filtro de cartucho Winflows.....	98
Figura 55. Interfaz de elección del pretratamiento Winflows.....	99
Figura 56. Interfaz de introducción de datos de composición del agua de alimentación Winflows.	102
Figura 57. Esquema del núcleo de desalación que muestra el Winflows.....	103
Figura 58. Series de membranas específicas para agua de mar (Winflows).	104
Figura 59. Modelos ofrecidos en la serie AE HR (Winflows).	105
Figura 60. Parámetros de funcionamiento típicos de las membranas de la serie AE HR (Winflows).	106
Figura 61. Interfaz de errores obtenidos a partir del primer procedimiento (Winflows).	108
Figura 62. Valores obtenidos para la configuración de 51 tubos de presión de 6 membranas cada uno.....	110
Figura 63. Valores obtenidos para la configuración de 44 tubos de presión de 7 membranas cada uno.....	111
Figura 64. Esquema del núcleo de desalación ofrecido por la hoja Excel de Flowserve.	115
Figura 65. Curvas características de la bomba Booster elegida.	117
Figura 66. Curvas características de la bomba de alta presión elegida.....	119
Figura 67. Curvas características de la bomba de captación elegida.	122
Figura 68. Recorrido a seguir por el permeado hasta el depósito.	123
Figura 69. Perfil de alturas obtenido en el recorrido de la tubería de distribución (Goolzoom).	124
Figura 70. Distribución de velocidades frente a la frecuencia con la que se dan las mismas.	129
Figura 70. Rosa de los vientos de frecuencias.....	129
Figura 71. Rosa de los vientos de velocidades.	129
<i>Estudio de un sistema de desalación alimentado mediante energía eólica</i>	11

Figura 73. Disposición de los aerogeneradores..... 132

Figura 74. Distancias entre aerogeneradores y respecto la población. 132

Índice de tablas

Tabla 1. Países con mayores recursos hídricos.	21
Tabla 2. Países con menores recursos hídricos.	21
Tabla 3. Recursos y consumos de agua en Canarias.....	24
Tabla 4. Recursos y consumos de agua desalada en Canarias (FCCA).....	33
Tabla 5. Volúmenes de agua de mar desalada (FCCA).	33
Tabla 6. Capacidad de desalación según tecnologías aplicadas.	34
Tabla 7. Composición química del agua de mar de alimentación.	96
Tabla 8. Parámetros físico-químicos de importancia del agua de mar de alimentación.....	96
Tabla 9. Datos de temperatura Boya de Tenerife Sur 1998-2016 (Puertos del Estado).....	100
Tabla 10. Datos de relevancia de los modelos de membrana de la serie AE HR (Winflows).105	
Tabla 11. Número de membranas y tubos de presión calculados según primer procedimiento usado.....	107
Tabla 12. Número de membranas y tubos de presión calculados según primer procedimiento usado.	109
Tabla 13. Comparación entre distintas configuraciones de membranas según número de tubos de presión.....	112
Tabla 14. Consumos específicos calculados para el núcleo de desalación incorporando diferentes sistemas de recuperación de energía.	113
Tabla 15. Valores a introducir en la hoja de cálculo del intercambiador de presión.	114
Tabla 16. Rendimiento del intercambiador dependiendo de cantidad instalada.	114
Tabla 17. Intercambiador de presión elegido.	116
Tabla 18. Condiciones de funcionamiento de la bomba Booster.....	116
Tabla 19. Modelos de bomba Booster comparados.	116
Tabla 20. Bomba Booster elegida.....	118
Tabla 21. Condiciones de funcionamiento de la bomba de alta presión.	118
Tabla 22. Modelos de bomba de alta presión comparados.	119
Tabla 23. Bomba de alta presión elegida.	120
Tabla 24. Condiciones de funcionamiento de la bomba captación.....	121
Tabla 25. Modelos de bomba de captación comparados.	121
Tabla 26. Bomba de captación seleccionada.....	123
Tabla 27. Condiciones de funcionamiento de la bomba de distribución.	125
<i>Estudio de un sistema de desalación alimentado mediante energía eólica</i>	13

Tabla 28. Modelos de bombas de distribución comparados	125
Tabla 29. Bomba de distribución seleccionada.	126
Tabla 30. Potencias y consumos energéticos de las distintas bombas.	127
Tabla 31. Costes y consumos energéticos.....	128
Tabla 32. Valores eólicos obtenidos en la zona de ubicación de la desaladora (IDEA).	128
Tabla 33. Factor de carga y producción energética anual para los aerogeneradores seleccionados.	130
Tabla 34. Parámetros de importancia del aerogenerador seleccionado.....	131
Tabla 35. Tabla de resultados finales.	137

1. Objeto

La finalidad de este trabajo es demostrar que se han adquirido las competencias y conocimientos necesarios a lo largo de los cuatro años del Grado de Ingeniería Mecánica, a través de la redacción de este proyecto.

Es objeto del presente proyecto el estudio de una planta de desalación que se instalará en la zona sur de la isla de Tenerife, más concretamente en el municipio de Granadilla. Esta planta está destinada a proveer el agua de riego de dicho municipio evitando problemas de suministro de agua para dicho fin debido a la escasez de recursos hídricos de la zona. La instalación pretende ser respetuosa con el medio ambiente con lo cual, será diseñada para que la energía para la alimentación de la misma proceda de energías limpias y renovables, más concretamente gracias al aprovechamiento de la energía eólica, evitando de esta manera el consumo de combustibles fósiles.

1.1. Abstract

The purpose of this paper is to demonstrate that I have acquired the necessary skills and knowledge throughout the four years of the Degree of Mechanical Engineering, through the writing of this project.

The object of this project is the study of a desalination plant that is going to be installed in the southern part of the island of Tenerife, more specifically in the town of Granadilla. This plant is intended to supply water for irrigation of the municipality avoiding problems of water supply for this purpose because of the scarcity of water resources in the area. The installation aim is mainly to be respectful with the environment. It will be designed so that the energy for powering the plant comes from clean and renewable energy, more specifically through the use of wind energy, thereby preventing fuel consumption fossils.

2. Alcance

Este proyecto está destinado al estudio de una planta de desalación abastecida gracias a la instalación de aerogeneradores en torno a la misma, con el fin de que nuestra planta sea totalmente ecológica. Más concretamente nos centraremos en el dimensionado y estudio del núcleo de desalación de nuestra planta.

La desalación se llevará a cabo a través del método de osmosis inversa con una producción diaria de 4500 m³/día, con el fin de abastecer los regadíos del municipio de Granadilla de Abona.

A continuación se enumeran los apartados que serán objeto de estudio en la elaboración de nuestro proyecto:

- ❖ Núcleo de desalación.
 - Situación de la planta
 - Capacidad diaria de la planta
 - Estudio y dimensionado del núcleo de desalación
 - Elección de la bomba de alta presión
 - Elección de la bomba booster
 - Elección del recuperador de energía
 - Elección de las membranas
 - Cálculo de las potencias consumidas por cada uno de los elementos de los que se compone nuestra planta, así como de sus consumos específicos y coste energético de los mismos.

- ❖ Energía eólica
 - Cálculo del recurso eólico
 - Elección del aerogenerador que alimentará energéticamente la planta de cogeneración

Quedarán excluidos de nuestro proyecto los apartados enumerados a continuación:

- Estudio de seguridad y salud
- Pliego de condiciones
- Mediciones y presupuesto
- Elementos de control tales como válvulas u otros dispositivos
- Elementos de conducción.
- Postratamiento del agua.
- Todo de tipo de instalaciones (eléctricas, climatización, contraincendios, automatización, saneamiento, etc.)
- Planificación del proyecto
- Obra civil en su totalidad (cálculo de zapatas, estructura, etc.)
- Estudio geotécnicos

Como se puede apreciar a partir de los elementos incluidos y excluidos de nuestro proyecto, el mismo se centra en el análisis y dimensionado de los diferentes procesos de producción que engloban la producción de agua desalada y energía eléctrica a partir del recurso eólico. Cabe destacar que si este proyecto se fuera a llevar a cabo deberían incluirse todos los puntos anteriores, pero se ha tenido que acotar el mismo por cuestiones de tiempo.

3. Antecedentes

3.1. Escasez de recursos hidráulicos

El agua es uno de los compuestos más abundantes en la naturaleza, ocupando las tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta (aproximadamente un 71%), pudiendo encontrarse la misma en prácticamente cualquier punto de la biosfera. Además de ser el compuesto más abundante, el agua es imprescindible para todos los seres vivos y a su vez el mayor constituyentes de los mismos. Mismamente, en el conjunto de los seres vivos, el agua constituye aproximadamente el 80% de sus componentes (llegando hasta un 90% en

el caso de las algas), si bien en el caso de los animales superiores la proporción de agua se reduce ligeramente hasta un 60-70%.

A lo largo de la Tierra hay aproximadamente unos 1386 millones de kilómetros cúbicos de agua de los cuales la gran mayoría es agua salada (aprox. un 97,5%) distribuida en océanos y mares (96,53%) y aguas salobres (0,98%).

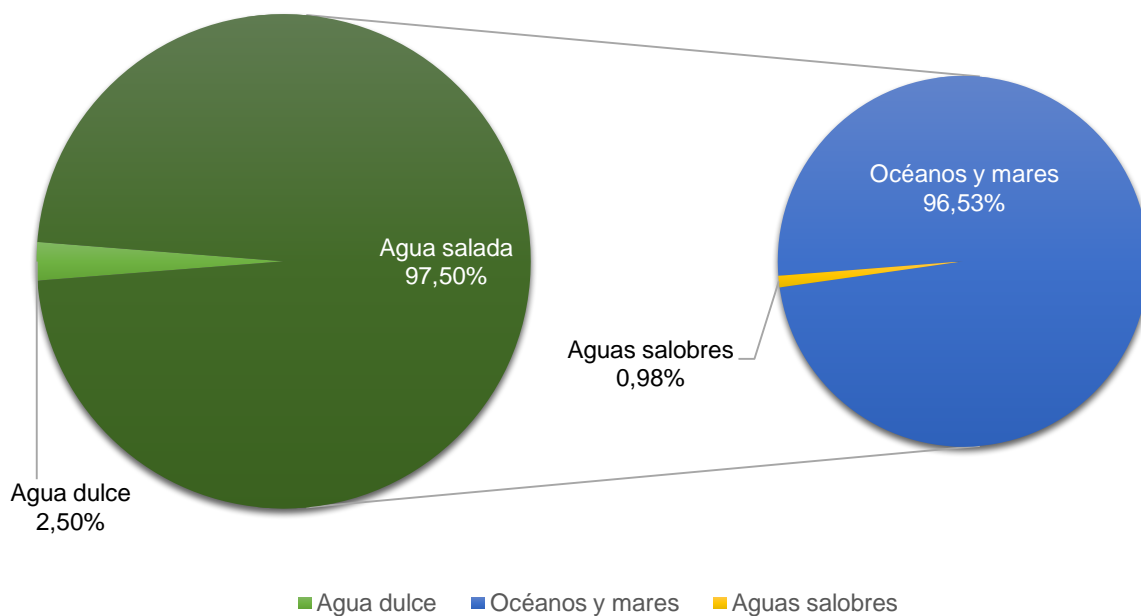


Figura 1. Distribución del agua en el planeta Tierra

Como se puede observar en la figura 1, únicamente el 2,5 % del total de agua que hay en la superficie del planeta (aproximadamente unos 35 millones de kilómetros cúbicos) se corresponde a agua dulce entre ríos, lagos y aguas subterráneas. La distribución de este masa de agua dulce en el planeta es muy heterogénea, ya que existen regiones en el mundo que están ampliamente dotadas de este recurso natural mientras que en otros lugares están sometidos a sequía constante, siendo en numerosos casos imposible mantener la supervivencia de los seres vivos en ellas.

Además, cabe destacar que todo el agua dulce que se encuentra en nuestro planeta no es utilizable por los seres vivos debido al estado en que se encuentra la misma en la

naturaleza o la imposibilidad del acceso a la misma. Dentro de este tipo de agua el 68,7% se encuentra en los glaciares situados principalmente en los casquetes polares, pero también en las altas cumbres nevadas, un 30,1% se encuentran en acuíferos subterráneos, el 0,8% se encuentra en una zona conocida como el permafrost que es la capa de suelo permanentemente congelado, aunque no permanentemente cubierto de hielo o nieve, de las regiones muy frías o periglaciares y por último el 0,4% se corresponde con las aguas superficiales y el agua que se encuentra en la atmósfera.

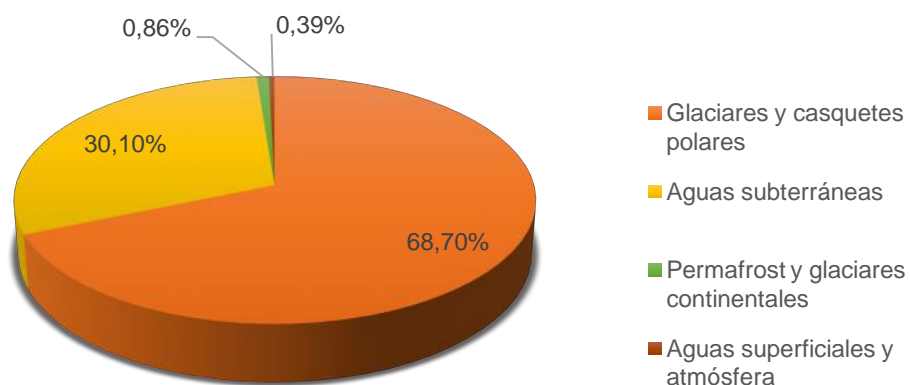


Figura 2. Distribución del agua dulce sobre la superficie de la Tierra.

En base a lo anterior se puede decir que los recursos hidráulicos en el planeta son relativamente escasos, sobre todo si se relacionan con la población o con las diferentes demandas de todo tipo, como por ejemplo de tipo agrario o industrial, y su irregular distribución por todo el mundo.

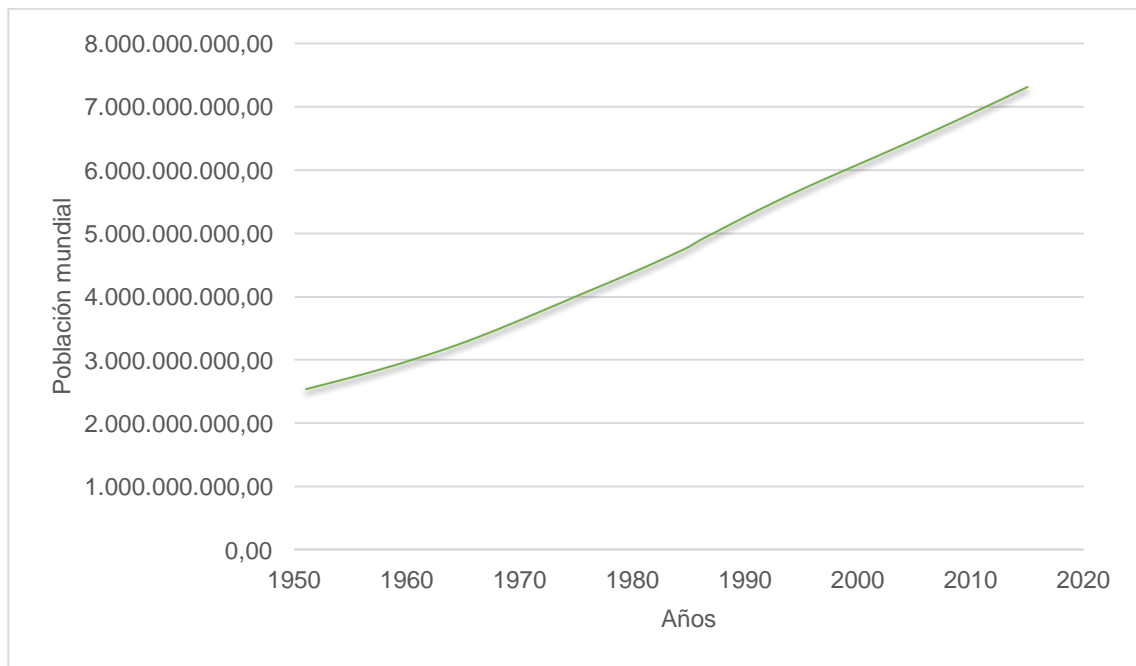


Figura 3. Crecimiento de la población mundial (1951-2015).

En vista de los datos aportados por la figura 3, vemos como un gran problema de escasez de recursos hídricos el considerable aumento de población en las últimas décadas. Este aumento ha llevado consigo un crecimiento de sectores como el industrial y el agrícola. Este desarrollo de los sectores comentados, sumado al crecimiento de la población y al aumento del consumo de agua por parte de la misma debido al desarrollo y modernización en los hábitos de vida de la sociedad ha dado como resultado un incremento en la necesidad de recursos hídricos que en muchas ocasiones difícilmente puede ser abarcada por los recursos aportados por la naturaleza.

3.2. Disponibilidad y distribución de los recursos hídricos

Como se ha comentado en puntos anteriores, la distribución del agua dulce en el planeta Tierra es muy heterogénea por motivos muy diversos como por ejemplo la situación geográfica, proximidad a ríos, lagos u otra fuente de agua natural, orografía del terreno, existencia de acuíferos, etc. Esto es algo que se puede observar en las tablas que se presentan a continuación en las que se presentan los valores de los países con mayor y menores recursos hídricos respectivamente.

País	Km ³ /Año
Brasil	8233
Rusia	4508
Estados Unidos	3069
Canadá	2902
China	2840
Colombia	2132
Indonesia	2019
Perú	1913
India	1911
República Democrática del Congo	1283

Tabla 1. Países con mayores recursos hídricos.

País	Km ³ /Año
Bahréin	0,116
Chipre	0,78
Israel	1,78
Jordania	0,937
Kuwait	0,02
Libia	0,7
Malta	0,0505
Qatar	0,058
Singapur	0,6
Emiratos Árabes Unidos	0,2

Tabla 2. Países con menores recursos hídricos.

Como podemos observar existe una gran variedad en la distribución de los países tanto con mayores como con menores recursos hídricos de nuestro planeta. Esto es debido a los motivos ya comentados anteriormente. Sirva como ejemplo el caso de Brasil, que es el país con mayores recursos hídricos entre otros motivos debido a la existencia de bajo su superficie de uno de los mayores acuíferos conocidos en la Tierra, que recibe el nombre de

Acuífero Guaraní considerándose en la actualidad que contiene aproximadamente unos 40000 km³ de agua dulce.

Centrándonos en el caso de España, también podemos observar como hay una gran desigualdad entre los recursos hídricos disponibles a lo largo de todo su territorio con zonas con recursos abundantes, como por ejemplo el norte de la Península Ibérica, que contrasta con el sur del propio territorio peninsular donde se sufren continuos periodos de sequía debido a la falta de recursos suficientes para poder abastecer a los diferentes sectores de la sociedad llegándose a producir cortes en el suministro en algunas situaciones. Este hecho se puede apreciar en la siguiente figura.

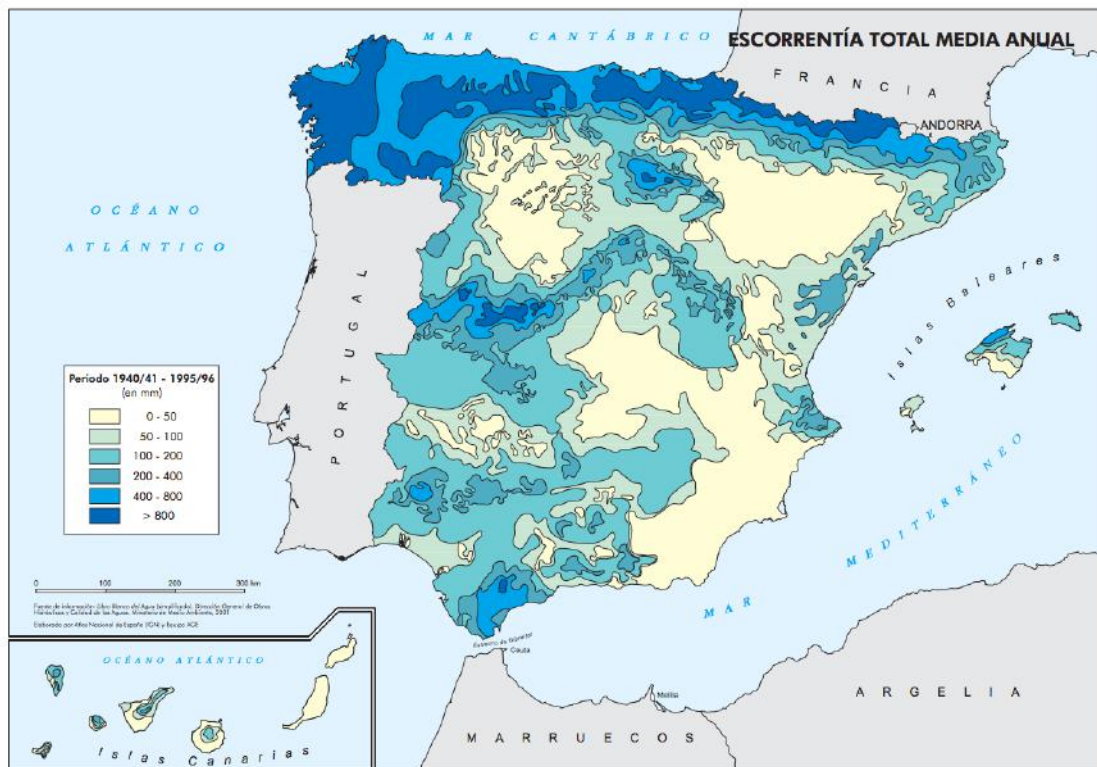


Figura 3. Escorrentía media anual en España

Como se puede observar en la figura anterior hay una distribución bastante heterogénea de los recursos hídricos en la Península Ibérica, destacando la diferencia ya comentada entre el norte y el resto de la misma. Esta diferencia se ha ido acrecentando más en los últimos años, aumentando a su vez el riesgo de desertización de las zonas más afectadas, viéndose por este motivo afectada tanto la población, como la industria y el

sector agrícola, además del obvio daño que como consecuencia sufren en resto de sectores y actividades.

3.3. Situación hidrológica en Canarias

El agua es un recurso natural indispensable para el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico de Canarias. La distribución de este recurso en el archipiélago es muy diversa debido a factores ya comentados anteriormente como pueden ser las diferentes condiciones geográficas, climáticas, geológicas, económicas o políticas. No obstante, la característica representativa de la mayoría de las islas es la escasez de los recursos hídricos de origen natural, particularmente acusada en las islas más orientales.

El problema de déficit de recursos hídricos en Canarias, ha sido uno de los mayores obstáculos históricos para el desarrollo de algunas zonas de las mismas. El caso más considerable del poco progreso que se daba, debido a la carencia de un suministro de agua que cubriera las necesidades de la población tenía lugar en las islas orientales, Lanzarote y Fuerteventura. En estos lugares era tal la falta de recurso hídrico que el desarrollo del nivel de vida permanecía prácticamente estacionario, sin posibilidad alguna de avance. En estos casos la agricultura era el medio principal de vida de su exigua población, aunque debido a la falta de recursos gran parte de estos habitantes comenzaron a desarrollar una industria pesquera que fue ineficiente por falta de medios. El desarrollo limitado de estas islas, se puede hacer extensible a otras zonas del archipiélago debido al mismo motivo.

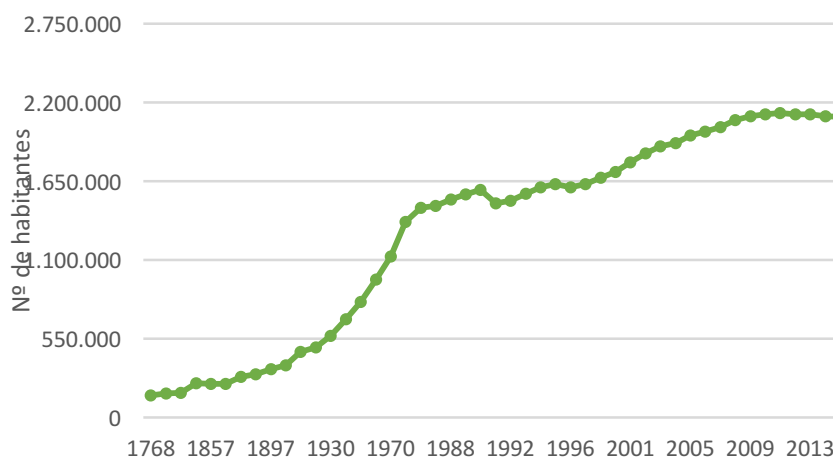


Figura 4. Desarrollo de la población en Canarias (1768-2015).

En la figura anterior se puede observar cómo la población de las islas se mantuvo en periodo estacionario, hasta aproximadamente los años 40 y 50 del siglo pasado. Este estancamiento en el incremento del número de habitantes fue debido sobre todo a la falta de recursos hídricos en gran parte del archipiélago. Este hecho lo podemos contrastar, ya que como se puede observar en la gráfica a partir de los años 40 y 50 empieza a haber un crecimiento exponencial de la población debido a que es justamente a partir de estos años cuando se empiezan a mejorar el suministro de agua en las islas. Además este crecimiento es aún mayor a partir de los años sesenta, momento a partir del cual se empieza a utilizar nuevas tecnologías como la desalación, que se explicará en los puntos siguientes, para obtener agua dulce a través de agua de mar.

En la actualidad las islas tienen una extensión superficial de 7442 km² y una población de 2.100.306 habitantes de derecho en 2015, con un consumo medio por habitante de aproximadamente 150 litros de agua por persona y día. Si a este consumo de la población le sumamos el gasto que tienen el resto de sectores tenemos, según datos extraídos de la página web del Gobierno de Canarias, un consumo total de 496,1 hm³.

Recursos	hm ³	Consumos	hm ³
Superficiales	18,9	Agrícola	231,8
Subterráneos	344,6	Urbano	174,3
Desalación	121,0	Turístico	54,4
Reutilización	28,3	Industrial	14,6
		Recreativo	18,5
		Otros usos	2,5
Total	512,8	Total	496,1

Tabla 3. Recursos y consumos de agua en Canarias.

Además en los siguientes gráficos se pueden observar que porcentaje supone cada uno de los recursos y consumos para el total de los mismos.

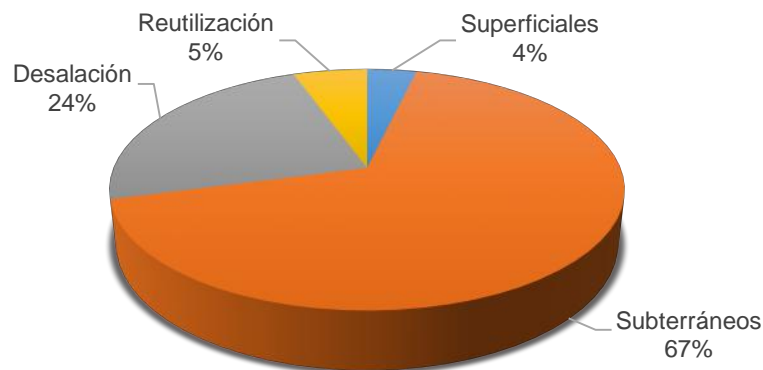


Figura 5. Recursos en Canarias según su porcentaje.

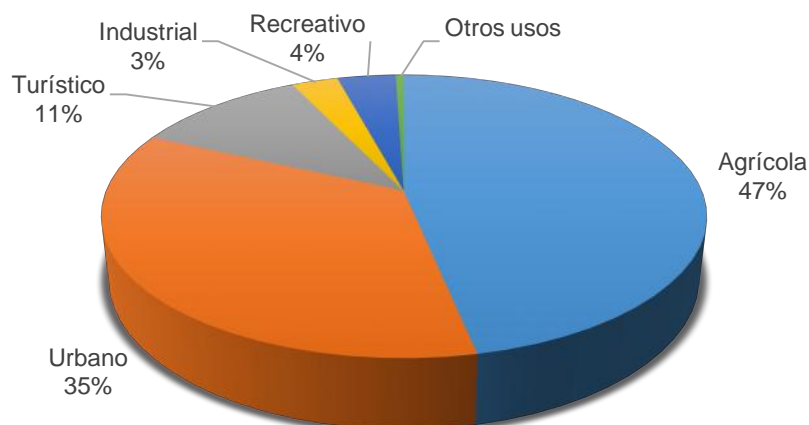


Figura 6. Consumos en Canarias según sus porcentajes.

A partir de los datos anteriores considerando el global de las islas, la demanda de agua es superior a los recursos convencionales existentes en las mismas (aguas superficiales y subterráneas), lo cual ha obligado a la utilización de fuentes de obtención no alternativas no convencionales para cubrir el déficit de dicho recurso. Además, como puede verse, un 30% de los recursos hídricos de Canarias proceden de fuentes no convencionales, las cuales son básicamente dos, la desalación de agua de mar y la reutilización de aguas residuales.

Además, es de interés resaltar que en Canarias el agua está en un alto porcentaje vinculada al sector turístico (aportando una importante población estacional), el cual cada año requiere más cantidad de recurso debido al crecimiento de dicho sector. Esta demanda cobra especial importancia dado que el uso medio de agua por habitante es superior al de la población urbana. Igualmente un importante foco de consumo del recurso hídrico está destinado usos recreativos, principalmente de campos de golf. Éstos representan tienen una importante demanda, ya que en términos absolutos representan un 2,5% de la demanda hídrica anual.

Asimismo, a través de las figuras anteriores también se puede observar como el sector que posee una mayor demanda es el sector agrícola, ocupando casi el 50 % de la misma, si bien en las últimas décadas ha ido reduciendo su participación en el consumo total debido en gran parte al auge de otros sectores como el turístico y la complejidad de poder tener un mercado competitivo al tener que enfrentarse a obstáculos como el déficit de recursos, sobre todo hídrico, en muchos lugares. A pesar de ello, la superficie total cultivada en Canarias es del orden de 51600 ha, correspondiendo las mayores extensiones de cultivos a la vid (18394 ha), la platanera (9563 ha), la papa (4262 ha) y el tomate (2260 ha). En relación a la demanda de los cultivos, exceptuando la vid, por ser éste un cultivo de secano, la platanera es el que mayor consumo de agua necesita. El importante consumo hídrico de este cultivo se puede ver claramente reflejado en el caso de la isla de Tenerife, en donde supone el 60 % del consumo agrícola.

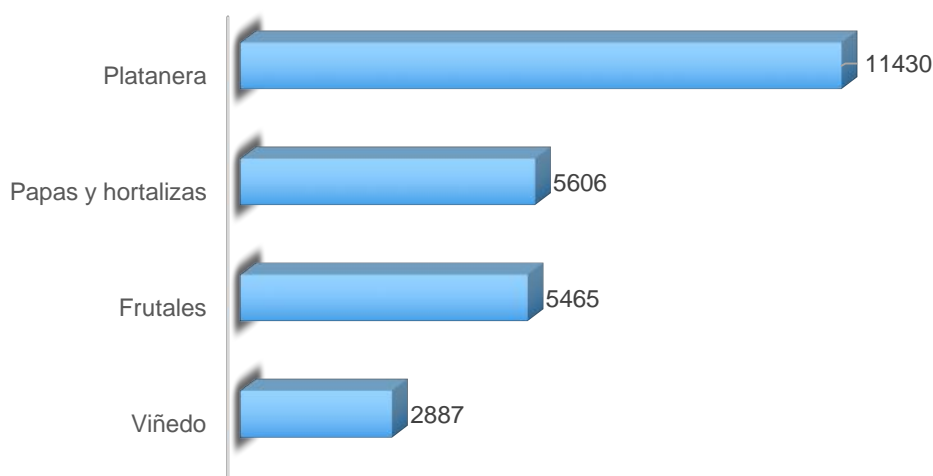


Figura 7. Uso medio de agua por superficie en parcela según tipos de cultivo en metro cúbico por hectárea y año.

En el caso de la isla de Tenerife, como se puede observar en las siguientes figuras, se sigue la misma tendencia en cuestión de recursos y consumos que el resto de islas. De ahí la importancia de la utilización de fuentes de obtención de agua no renovables, ya que al igual que en el resto de Canarias, el aumento de población, de turismo, de infraestructuras, etc. ha hecho que la demanda de recursos hídricos también haya aumentado convirtiendo en insuficientes el agua obtenido a través de las fuentes de obtención convencionales.

Cabe destacar que como también se observa en la figura 8, Tenerife obtiene mayor porcentaje de agua a través de fuentes subterráneas pero como se verá en apartados posteriores la calidad del agua de éstas ha decaído en los últimos años como consecuencia de la sobreexplotación de las mismas. Además, los acuíferos están situados principalmente en la vertiente norte de la isla quedando práctica desprovista de los mismos la sur.

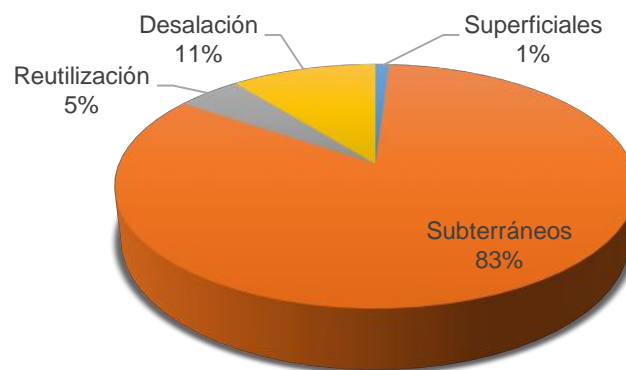


Figura 8. Recursos en la isla de Tenerife según sus porcentajes (PHT, 2010).

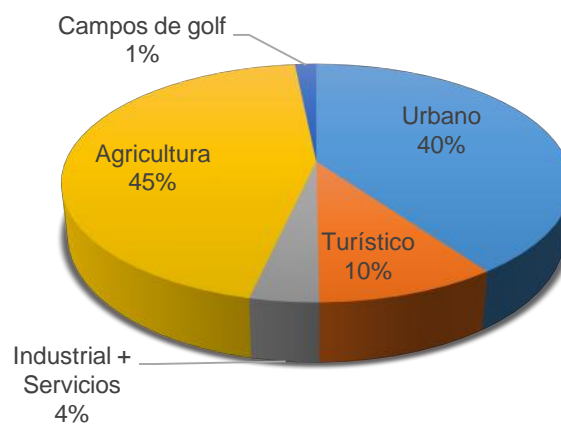


Figura 9. Consumos en la isla de Tenerife según sus porcentajes (PHT, 2010).

3.4. Recursos hídricos renovables en Canarias

Cuando hacemos referencia a recursos hídricos renovables nos referimos a todo aquel recurso hídrico que provenga naturalmente de la naturaleza. En Canarias este tipo de recursos se centra básicamente en las aguas subterráneas debido principalmente a la orografía del terreno y las condiciones climatológicas que se dan en esta zona.

En Canarias se dan dos situaciones que hacen que el recurso hídrico principal sean las aguas subterráneas y que el aprovechamiento y disponibilidad de los recursos superficiales sea poco importantes o prácticamente inexistente:

- El clima seco y cálido de las islas orientales, con unas precipitaciones medias anuales inferiores a 250 mm (excepto en las zonas montañosas orientadas al norte de la isla de Gran Canaria, donde la lluvia llega a superar los 700 mm).
- Las condiciones geológicas especiales de las islas occidentales, entre las que se encuentran sus elevadas pendientes, zonas con alta permeabilidad del terreno, etc.

Por lo tanto, se puede decir que el recurso tradicional en Canarias ha sido las aguas subterráneas. A pesar de su vital importancia para el desarrollo del conjunto de las islas, durante las últimas décadas se ha experimentado una importante disminución tanto de la cantidad como de la calidad de estas aguas. Esto es debido a dos motivos principales, la sobreexplotación de los acuíferos y las infiltraciones de vertidos. Además de estos dos inconvenientes algunos acuíferos, situados en algunas zonas del norte y oeste de Gran Canaria y al noroeste de la isla de Tenerife, están contaminados de manera natural debido a la interacción agua-roca y a la actividad volcánica residual.

Otro problema que se presentan en el uso de los acuíferos es que algunos de ellos debido a su proximidad con el medio marino sufren intrusiones del mismo. Éstas provocan la salinización de los mismos, volviéndolos inservibles.

Cabe destacar que como se puede observar en la figura anterior el descenso en la última década se ha atenuado parcialmente gracias a la introducción de recursos no convencionales de obtención del agua.

Todo ello se ha visto agravado por la intensificación de consumo de algunos sectores como puede ser el agrícola, el turístico o el propio aumento de la demografía canaria, además de una inexistente legislación adecuada. Como consecuencia los niveles freáticos de los acuíferos de algunas islas han disminuido hasta llegar a los 500 metros de profundidad. Un ejemplo de este problema se puede ver en el balance hídrico subterráneo de la isla de Tenerife que se presenta a continuación.

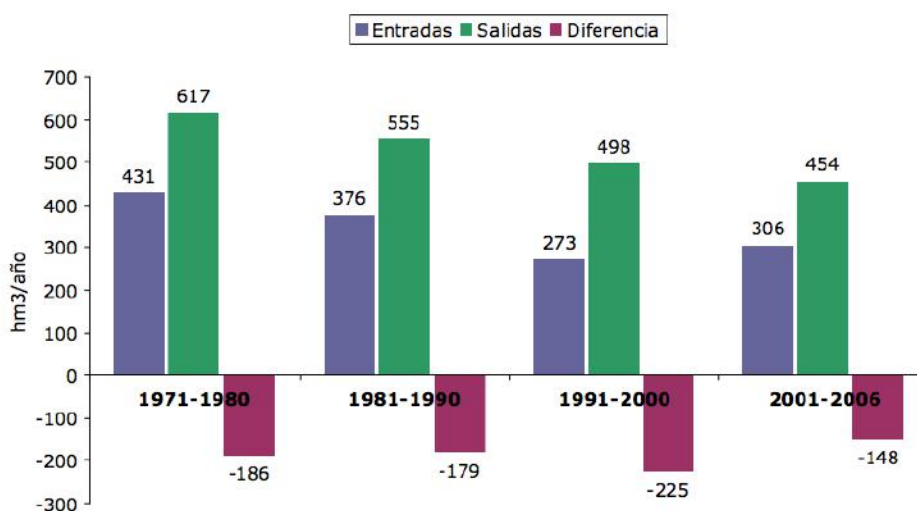


Figura 10. Balance hídrico subterráneo de la isla de Tenerife (Gobierno de Canarias).

3.5. Recursos hídricos no convencionales en Canarias

En este apartado se comentarán los recursos hídricos no convencionales que en la actualidad tienen un uso vital para el desarrollo de las islas. Cuando hacemos referencia a este tipo de recursos, estamos hablando de los que obtenemos a través de técnicas como la desalación de agua de mar, la reutilización de aguas residuales, etc. Nos centraremos en los dos casos anteriores que son los que se usan en Canarias.

3.5.1. Desalinización de agua de mar o salobre

3.5.1.1. Antecedentes históricos

Canarias ha sido una de las pioneras, a nivel europeo, en desalinización de agua de mar. Todo ello ha sido debido a la necesidad imperiosa que ha habido en las islas del recurso hídrico y la imposibilidad en muchos casos de acceso al mismo. Esto ha hecho que las islas hayan sido un referente en este tipo de tecnología, sirviendo en muchos casos como lugar para que los fabricantes pusieran a punto sus tecnologías.

La primera planta desaladora que hubo en Canarias comenzó su funcionamiento en el año 1964, en la isla de Lanzarote. Ésta tenía la capacidad de producir 2300 metros cúbicos al día de agua desalada, utilizando una unidad de evaporación súbita multietapa (MSF). Seguidamente, con esta misma tecnología se instaló otra planta en Gran Canaria, la planta desaladora Las Palmas I, entrando en servicio en el año 1969 con una producción diaria de 20000 metros cúbicos. Fue una de las más grandes del mundo, teniendo además un carácter dual ya que podía producir tanto agua desalada como energía eléctrica para verter a la red. Un año más tarde entraría en funcionamiento la primera desaladora situada en Fuerteventura, con una capacidad de 2000 metros cúbicos al día.



Figura 11. Primera desaladora de Canarias, isla de Lanzarote 1964 (Diario Atlántida).

En el año 1972 comenzó a usarse una nueva tecnología de desalación en las islas, más concretamente en la isla de Fuerteventura donde se instaló la primera desaladora a

través de compresión de vapor (CV). Dicha tecnología tuvo un gran desarrollo en Canarias, al contrario que en otras zonas del mundo.

Hacia mita de los años setenta se instaló en las islas una pequeña planta desaladora a través de ósmosis inversa (RO), con una producción de 80 metros cúbicos al día para abastecer a una comunidad de regantes en Gran Canaria. Esta planta tuvo que ser desmantelada debido a que no funcionaba como se esperaba, debido a la colmatación de las membranas, debido al uso de membranas de fibra hueca desconocimiento sobre la necesidad de un adecuado pretratamiento. Posteriormente en la misma finca se instaló una segunda planta desaladora pero en este caso haciendo uso de membranas de arrobamiento es espiral, que cumplió con lo que se esperaba. Esta última planta fue sin duda, la pionera de la tecnología de la ósmosis inversa en Canarias, siendo ésta la tecnología más extendida y de mayor uso.

En años posteriores se instalaron un gran número de plantas desaladoras con mayores capacidades de producción. Además se aplicaron nuevas tecnologías como la electrodiálisis (ED), en 1986 situada en Gran Canaria con una producción de 22000 metros cúbicos al día, o la destilación multiefecto (ME), la cual se usó en una planta situada en la isla de Tenerife con una producción diaria de 3600 metros cúbicos al día puesta en marcha en 1994. Ésta planta fue de especial importancia por dos razones principales. La primera de ellas es que fue la primera planta de este tipo de tecnología que se instalaba en el Archipiélago y la segunda es que fue la primera planta de capacidad media que se instaló en la isla de Tenerife, dejando ver la necesidad de agua desalada que tenía la isla para mantener el crecimiento del consumo.

Es difícil imaginar cómo habría sido la vida en Canarias hoy en día sin la aplicación extensiva que se ha hecho de las diferentes técnicas de desalación, ya que hubiera sido imposible mantener el desarrollo de las islas hasta los niveles que se han alcanzado en nuestros días.

3.5.1.2. Situación actual

Debido a la falta de recursos hídricos renovables, en Canarias los recursos no convencionales se han convertido en indispensables. Entre ellos destaca la desalinización que se ha usado de manera masiva para el abastecimiento urbano y el riego de cultivos agrícolas. Como resultado de ello, las islas ocupan un lugar relevante en España, e incluso de Europa, en volumen de agua desalinizado.

Centrándonos en el caso de España, las islas encabezan la lista de Comunidades Autónomas con mayor capacidad de desalación operativa, con 0,74 hectómetros cúbicos al día, seguida de Andalucía y Murcia, con 0,54 y 0,43 hectómetros cúbicos día. Estos valores se pueden visualizar mejor en la siguiente figura.

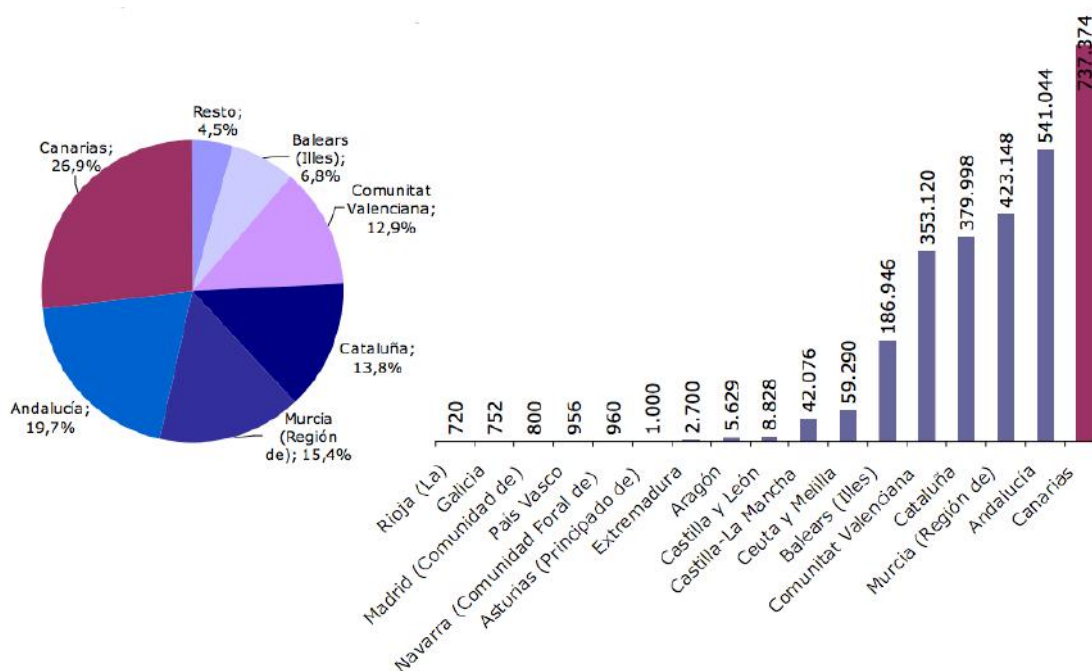


Figura 12. Capacidad operativa de desalación en metros cúbicos día y porcentaje de desalación por Comunidades Autónomas respecto al total desalado en España (Gobierno de Canarias).

Si nos centramos únicamente en la producción en las distintas islas, vemos que como se ha indicado anteriormente en las islas orientales la desalinización es el principal recurso hídrico y éste supone un elevado porcentaje respecto al total consumido en dichas islas como se puede observar en la siguiente tabla de valores.

	Lanzarote	Fuerteventura	Gran Canaria	Tenerife	La Gomera	El Hierro	La Palma
Nº total de desaladoras	49	66	129	46	0	2	1
Volumen total de agua desalada (hm ³ /a)	16,9	11,9	77,1	18,0	0,0	0,5	0,1
% del volumen total del agua consumido en la isla	99 %	86 %	52 %	9 %	0 %	19 %	0 %

Tabla 4. Recursos y consumos de agua desalada en Canarias (FCCA).

Como se puede observar en la tabla anterior, en número absolutos, la isla de Gran Canaria es la que produce un mayor volumen agua desalinizada al año. Además como se había comentado anteriormente, el porcentaje de agua desalada respecto al total consumido en las islas orientales es muy elevado debido a que en estas islas la escasez de recurso hídrico renovable tiene mayor relevancia que en el resto. También cabe destacar las grandes desigualdades entre las diferentes islas en cuanto a la existencia o no de desaladoras. Esta diferencia es sobre todo plausible entre La Gomera y La Palma y el resto, debido a las condiciones que se dan en estas islas que favorece la obtención de aguas subterráneas.

Años	Lanzarote	Fuerteventura	Gran Canaria	Tenerife	La Gomera	El Hierro	La Palma
2000	17	11	57	7	0	0	0
2004	18	17	81	13	0	0	0
2008	20	23	94	20	0	0	0
2012	27	31	102	27	0	0,5	0,1

Tabla 5. Volúmenes de agua de mar desalada (FCCA).

En el conjunto del Archipiélago, la producción de agua desalada ha sufrido un considerable aumento en los últimos años como se puede observar en la tabla anterior. Este crecimiento como se ha comentado anteriormente, no lo tienen las islas más occidentales por los motivos ya expuestos.

Teniendo en cuenta el conjunto del archipiélago, el destino final de estas aguas se distribuye principalmente entre abastecimiento a poblaciones (74 %) y riego agrícola (23 %), siendo el volumen para usos industriales insignificante.

En referencia a las plantas desaladoras instaladas en Canarias, se debe recalcar que su capacidad de producción es baja-moderada ya que solo tres de ellas superan una producción de 30000 metros cúbicos al día, con un amplio predominio de las estaciones desaladoras con capacidades inferiores a 10000 metros cúbicos diarios.

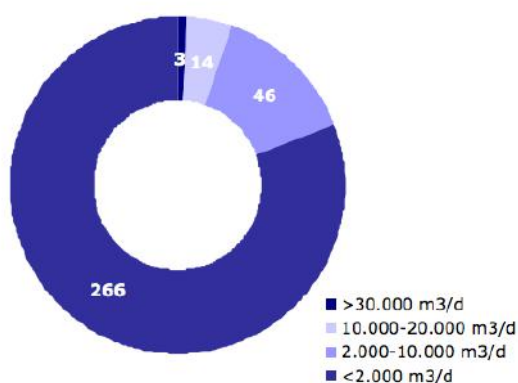


Figura 13. Capacidad de producción y número de plantas desaladoras instalado en Canarias (Gobierno de Canarias).

Respecto a las tecnologías de desalación usadas, Canarias cuenta con un amplio abanico de ellas que van desde las denominadas térmicas hasta las de separación con membranas. Esto se puede observar en la siguiente tabla donde se presenta la capacidad instalada para cada una de las tecnologías y el tipo de agua tratada.

Tecnología	Origen del agua	Capacidad instalada (m ³ /d)
Destilación multiefecto (ME)	Agua de mar	36600
Compresión de vapor (VC)	Agua de mar	11730
Ósmosis inversa (RO)	Agua de mar/Aguas salobres	489982
Electrodialísis reversible (EDR)	Aguas salobres	42373

Tabla 6. Capacidad de desalación según tecnologías aplicadas.

Como se había comentado en puntos anteriores a través de los datos se refleja claramente la preferencia por la tecnología de ósmosis inversa. Esto se debe principalmente es que en la actualidad es la que menor consumos específicos presenta, a la vez que es la de mayor simplicidad en su diseño. El porcentaje que ocupan sobre el total las diferentes tecnologías se puede ver en la siguiente figura.

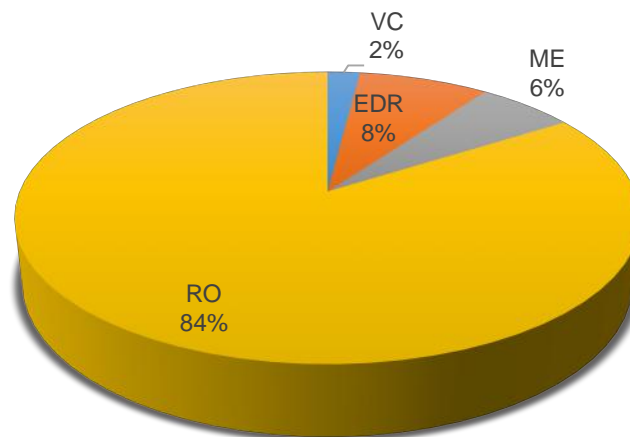


Figura 14. Porcentaje de producción de agua desalada según tecnologías aplicadas.

3.5.2. Reutilización de aguas residuales

Otro recurso hídrico no convencional de uso extendido en Canarias es la reutilización de las aguas residuales. El aprovechamiento de este tipo de aguas es posible gracias a la acción de las depurados que se encargan de limpiar el agua residual procedente de distintos sectores para darle un nuevo uso.

En este ámbito, las islas también han sido pioneras con los primeros sistemas de aprovechamiento, principalmente con fines agrícolas. En la actualidad es la cuarta Comunidad Autónoma en porcentaje de reutilización respecto al volumen depurado como se puede ver en la siguiente figura.

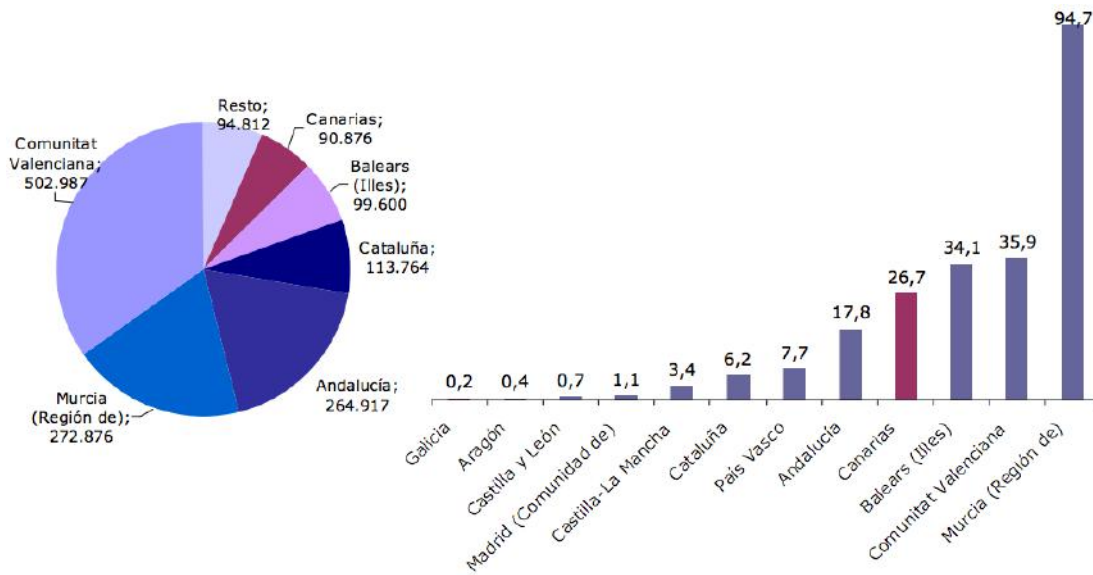


Figura 15. Volumen reutilizado en metros cúbicos días y porcentaje de volumen utilizado frente al volumen depurado en España (Gobierno de Canarias).

Cabe destacar que según el ISTAC (Instituto Canario de Estadística), en el año 2008 se depuraron en Canarias alrededor de 124 hm³ de aguas residuales, de las cuales solo se aprovecharon unos 33 hm³. Esto indica que el 73 % de las aguas residuales no fueron aprovechadas, las cuales podían haber sido usadas para subsanar el problema con el recurso hídrico en determinados sectores.

El uso de la totalidad de las aguas residuales depuradas no es posible ya que presenta multitud de inconvenientes. El primero de ellos y más importante, es que debido a la procedencia de dichas aguas la calidad del agua es muy baja con lo cual no sería apta para su uso. Además otro inconveniente es el elevado coste de las mismas, al igual que la inexistencia de la infraestructura necesaria para distribuir las mismas.

En la siguiente figura podemos observar que los usos principales que se le da a las aguas residuales potabilizadas que son básicamente tres (agrícola, recreativos y servicios urbanos), debido al ya comentado problema de la baja calidad de las mismas, lo que imposibilita su uso para su distribución por ejemplo para el consumo humano.

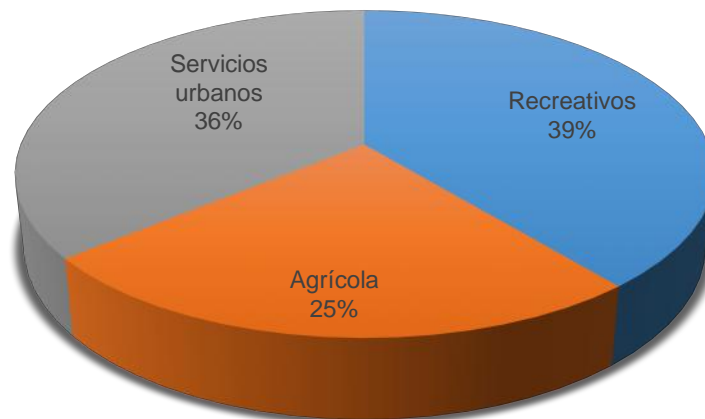


Figura 16. Consumo de aguas regeneradas en Canarias.

Como podemos observar la distribución de la cantidad de agua regenerada destinada a los diferentes sectores de uso es bastante similar. El uso de este recurso se centra básicamente en el sector servicios y en la agricultura.

3.6. Desalación

La desalación es un proceso que en sentido amplio se considera como un procedimiento para la separación de sales de una solución, aunque su extensión a las tecnologías existentes permite distinguir entre procesos que separan el agua de las sales y los que realmente efectúan la separación de sales de la solución. Aunque entendiendo en uno u otro sentido, el proceso de separación de sales del agua en el que se encuentran disueltas, tienen en común que requieren de una u otra formada energía y es dicha forma en la que se aplica la energía uno de los principales elementos diferenciados de estos procesos.

Como se ha comentado anteriormente la principal diferencia entre los diferentes procesos de desalación es la forma de aplicación de la energía necesaria para desalar el agua. En unos procesos se utiliza el vapor como fuente principal para eliminación de las sales, éstos son los procesos que genéricamente se conocen con el nombre de destilación y de los que se han desarrollado tres tecnologías principales: Destilación Súbita Multietapa

(MSF), Destilación Multiefecto (MED) y Compresión de Vapor (CV), cada uno de ellos con distintas variantes. En otros casos la energía que se usa para realizar el proceso de desalación es la energía eléctrica, respondiendo a este tipo la Electrodiálisis (ED). Por último, el sistema más divulgado utiliza la presión, conocido como Osmosis Inversa (RO). A continuación se presenta una tabla donde se clasifican cada uno de los sistemas de desalación según diferentes parámetros.

Clase de separación	Energía utilizada	Proceso	Sistema
Separación agua de sales	Vapor	Evaporación	Destilación solar
			Destilación súbita simple
			Destilación en tubos sumergidos
			Destilación súbita multietapa
			Destilación multiefecto de tubos horizontales
			Destilación multiefecto de tubos verticales
			Compresión mecánica de vapor
	Termocompresión		
	Frío	Cristalización	Formación de hidratos
			Congelación
Presión	Membrana	Ósmosis inversa	
Separación sales de agua	Carga eléctrica	Membrana selectiva	Electrodiálisis
	Atracción química	Resina	Intercambio iónico

Figura 17. Clasificación de los procesos de desalación.

3.6.1. Sistemas de desalación

3.6.1.1. Destilación Súbita Multietapa (MSF)

El proceso de Destilación Súbita Multietapa, también conocido como Evaporación Súbita Multietapa o proceso multietapa flash, es el procesos más antiguo en uso industrial, y

aun hoy tiene un uso bastante extendido en cuanto a capacidad de producción en el mundo se refiere. El proceso se basa en la ebullición de agua en un evaporador de numerosas cámaras que operan a distintas temperaturas y presiones progresivamente decrecientes. Con ello se consigue evaporar agua en cada una de las etapas, para formar el conjunto de la producción total.

Cabe destacar que este tipo de tecnología ha caído en desuso en los últimos años debido al alto consumo de energía que precisa para llevar a cabo el proceso de desalación.

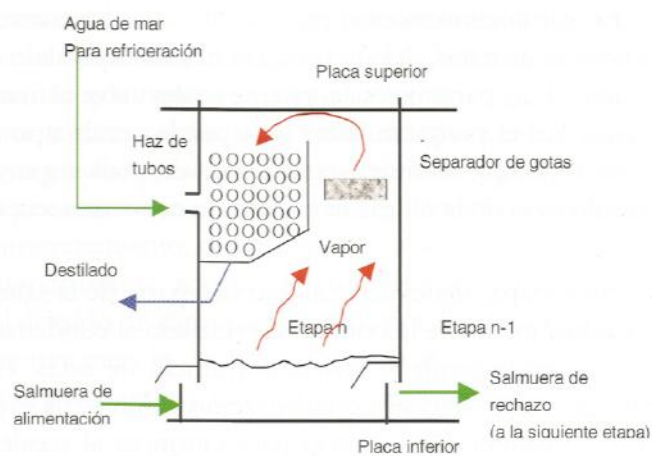


Figura 18. Esquema de una etapa de un evaporador MSF (Autor: José Miguel Veza).

El sistema se basa en el hecho de que el agua, repentinamente expuesta a una presión menor que la de saturación correspondiente a la temperatura a la que se encuentre, evapora parcialmente, de forma que el calor de evaporación necesario lo toma del resto del líquido, que se enfría. El proceso tiene lugar en una cámara, conocida como cámara flash. En cada etapa se produce la evaporación súbita de parte del agua que arrastra gotas de humedad, las cuales se separan en una malla. El vapor condensa en el exterior de un haz de tubos que se encuentran en la parte superior de la cámara. Este procedimiento se repite tantas veces como etapas tenga nuestra estación desaladora, siendo el volumen de agua total desalada la suma del condensado obtenido en cada una de las etapas.

3.6.1.2. Destilación Multiefecto (MED)

El proceso de Destilación Multiefecto, conocido también como Evaporación Multiefecto, tiene ciertas similitudes con el de evaporación multietapa ya explicado aunque se diferencia en importantes aspectos.

El principio de funcionamiento es el mismo que en el caso ya que se ayuda de la evaporación del agua para realizar la separación de la misma de las sales. La principal diferencia radica en que en este tipo de sistema de desalación la evaporación se realiza generalmente sobre superficies de intercambio de calor, normalmente de morfología tubular. Al igual que en la MSF el proceso se lleva a cabo en sucesivas etapas, cada una de ellas conocidas como efecto. Cada efecto constituye un evaporados-condensador de tubos, en el que se introduce vapor en el interior de los tubos (habitualmente horizontales) que constituyen el haz intercambiados. Este vapor condensa, y la energía liberada se transfiere hacia el exterior de los tubos donde se utiliza para evaporar parte del agua de mar que fluye por el exterior de los mismos. El caudal de agua de mar, el cual previamente se ha recalentado, se socia sobre los tubos a través de pulverizadores. Finalmente el vapor producido se tiene que condensar en sucesivos efectos, mientras que el condensado interior formará parte del producto de la planta.

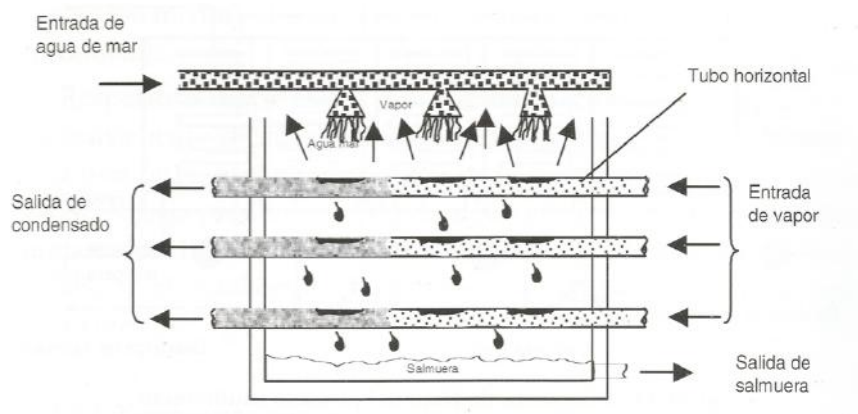


Figura 19. Esquema de un efecto horizontal de evaporación (Autor: José Miguel Veza).

Al igual que en el caso anterior, la capacidad de producción total de la planta es igual a la suma del agua desalada en cada uno de los efectos.

3.6.1.3. Compresión de Vapor (CV)

En el caso de este tipo de sistema de desalación la alimentación de agua de mar pasa por un pretratamiento sencillo, que se suele limitar a una filtración de sólidos y dosificación de un antiincrustante, para de esta forma evitar problemas en las conducciones de nuestra instalación. Seguidamente el agua de captación pasa por uno o varios precalentados (suelen ser intercambiadores de calor de placas corrugadas, muy eficientes) para de esta manera elevar la temperatura de la misma hasta niveles próximos a la de evaporación. El flujo caliente de estos precalentados suele ser las corrientes de agua producto y de salmuera. A continuación el agua de mar pretratada se mezcla con una parte de la salmuera de rechazo, y esa mezcla se introduce en el evaporador, mediante boquillas de dispersión con el fin de conseguir una pulverización del agua de alimentación sobre los tubos del evaporador. Por el lado exterior de dichos tubos se calienta hasta la temperatura de ebullición y se evapora parcialmente. La energía necesaria proviene del interior de los tubos, donde hay vapor de calefacción que está condensado a una temperatura de saturación ligeramente superior a la del exterior.

El vapor que se ha generado se aspira a través de un conducto hacia el compresor, donde se aumenta ligeramente su presión y su temperatura, y se descarga como vapor sobrecalentado al interior de los tubos del evaporador, donde actúa como medio de calefacción. Debido al paso de este vapor a través de los tubos del evaporador, el mismo, pierde su calor latente por enfriamiento hasta la temperatura de saturación, y condensa convirtiéndose en el producto de nuestro sistema de desalación. La parte de la alimentación que no ha evaporado es la que forma el flujo de salmuera.

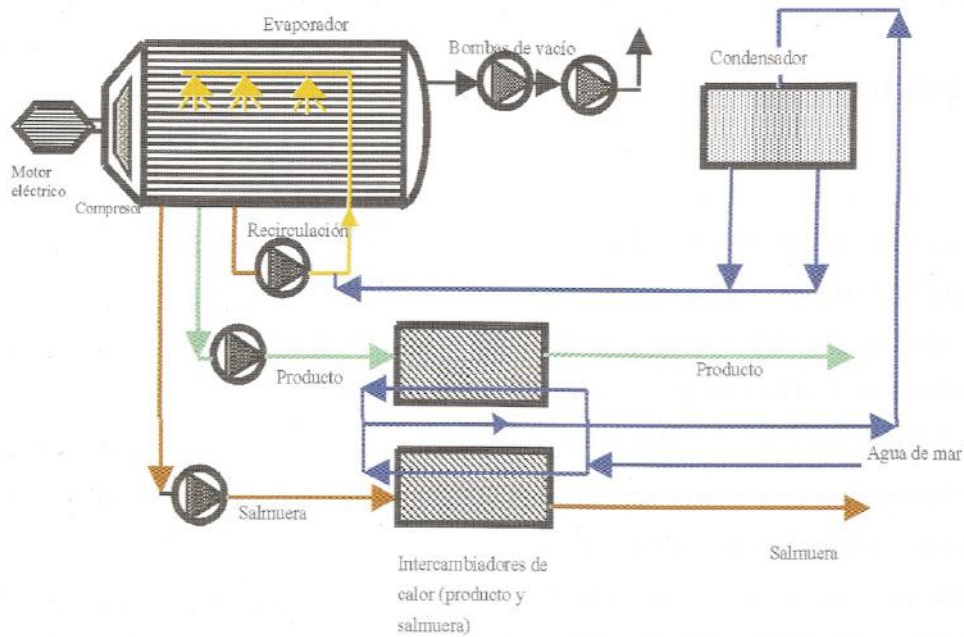


Figura 20. Esquema del proceso de compresión de vapor (Autor: José Miguel Veza).

3.6.1.4. Electrodiálisis (ED)

La electrodiálisis es una técnica de separación basada en el conocido fenómeno mediante el cual, si hacemos pasar una corriente eléctrica de carácter continuo a través de una solución iónica situada en una cuba, los iones positivos (cationes) se desplazarán hacia el electrodo negativo (cátodo), mientras que los iones negativos harán lo contrario, desplazándose hacia el electrodo positivo (ánodo). Si entre ambos electrodos se colocan dos membranas selectivas semipermeables, restringiendo el paso de Na^+ o de Cl^- dependiendo del tipo de membrana. El procedimiento anterior hace que el agua contenida en el centro de la celda electrolítica (conjunto constituido por la cuba, la solución y los dos electrodos) se desaliniza progresivamente, hasta obtener agua desalinizada con las características que se requiera.

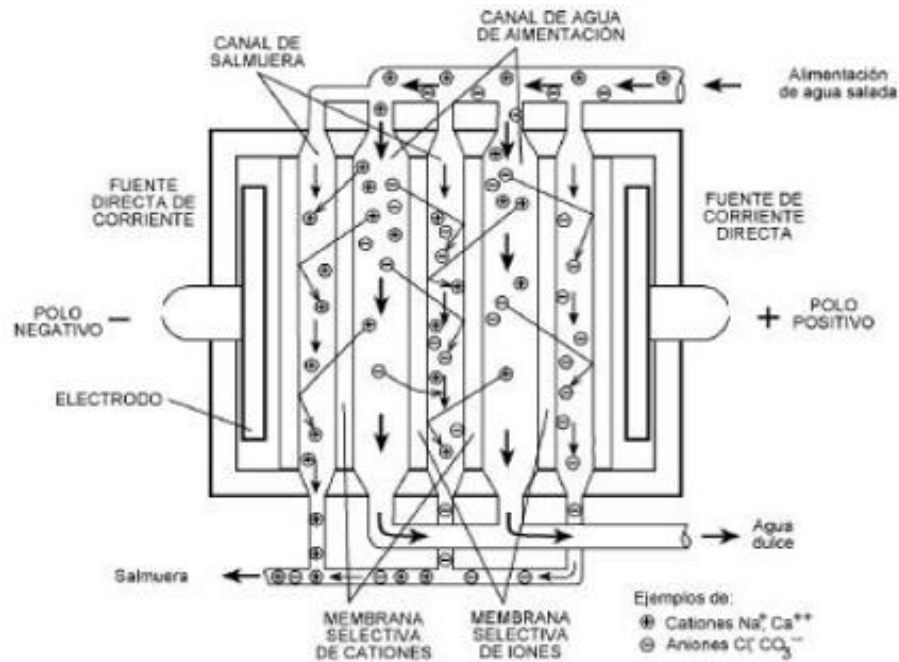


Figura 21. Proceso de electrodiálisis (Autor: Antonio Ros Moreno).

Cabe destacar que existe otro tipo de proceso de desalación por electrodiálisis, conocido como la Electrodiálisis Reversible (EDR). Este procedimiento es una versión del ya comentado pero en este caso se invierte la polaridad de los electrodos un determinado número de veces por hora, con el fin de inducir una autolimpieza química. Gracias a este proceso permite la desalinización de flujos de agua factores de reconversión muy elevados (alrededor de un 90%).

3.6.1.5. Osmosis Inversa (RO)

Este tipo de tecnología se basa en el proceso natural de la ósmosis, que es un proceso físico natural que interviene en la vida de todos los seres vivos, a partir del cual dos soluciones de distinta concentración de sales puestas en contacto a través de una membrana semipermeable tienden a igualar sus concentraciones. Para ello, se produce un movimiento desde la concentración más diluida hacia la más concentrada, el cual se detiene en el momento en el que ambas están equilibradas.

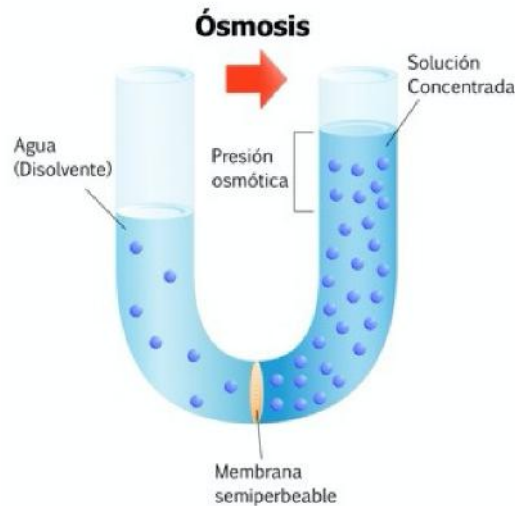


Figura 22. Proceso de ósmosis natural.

Teniendo en cuenta la diferencia de concentraciones existentes entre las dos concentraciones, puestas en contacto a través de una membrana semipermeable, podemos obtener la medida de la presión osmótica de dicha solución. Es decir, la presión que se debe aplicar a la solución más concentrada para impedir que se produzca la ósmosis natural. En el momento en que la presión aplicada sobre la solución concentrada sea mayor que la presión osmótica ocurrirá el fenómeno denominado como ósmosis inversa. A través de dicho proceso el agua pasará en dirección contraria a través de la membrana, dejando detrás de sí una solución más concentrada en sales.

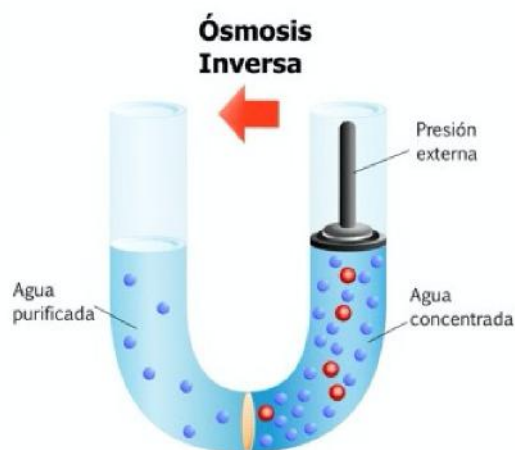


Figura 23. Proceso de ósmosis inversa.

Este tipo de técnica de desalación de aguas se puede aplicar tanto a agua de mar como a aguas salobres. Esencialmente para llevar a cabo este proceso el agua de alimentación debe ser bombeada a alta o media presión (dependiendo de las condiciones en las que queramos el agua producto) hacia una membrana semipermeable dando como resultado dos flujos, uno de alta concentración en sales conocido como salmuera, y otro con baja concentración que se conoce como agua producto o permeado. Dicha membrana semipermeable ha de ser seleccionada cuidadosamente dependiendo de las condiciones del agua de alimentación al igual en base a la calidad de agua producto que se requiera. En el caso de la desalación de agua de mar las membranas han de ser seleccionadas para soportar elevadas presiones osmóticas y altas concentraciones en sales, en cambio para las aguas salobres las membranas deben ser capaces de soportar bajas concentraciones de sales y medias o bajas presiones osmóticas. En conclusión las membranas han de ser capaces de reunir las siguientes características:

- Deben ser capaces de resistir las presiones a las que es sometida la disolución para invertir el proceso.
- Han de ser lo suficientemente permeables al agua para que el flujo que proporciona sea elevado.
- Rechazar un porcentaje de sales elevado para que el producto sea de buena calidad.

3.6.2. Comparación entre los diferentes sistemas de desalación

En este punto se van a comparar las tecnologías de desalación más extendidas a lo largo del mundo, éstas son la destilación (MSF, MED, CV...), la ósmosis inversa y la electrodiálisis.

Los procesos de destilación necesitan una fuente de calor para provocar e, cambio de estado de líquido a vapor, que prácticamente es independiente de la salinidad que posea el agua. Esto quiere decir que dichos procesos requieren un cambio de estado en el cual existe una pérdida importante de energía. Es por este motivo, que a pesar de ser los más antiguos, han ido perdiendo importancia en las últimas décadas a favor de los procesos de membrana más eficientes energéticamente.

En cuanto a la ósmosis inversa basa su funcionamiento en la aplicación de una presión con el objetivo de superar la presión osmótica del agua a tratar. En este caso, al contrario que en el caso de la destilación en la cual prácticamente es independiente la salinidad para llevar a cabo el proceso, debemos aplicar mayor presión cuanto mayor sea dicha salinidad ya que habrá que superar una presión osmótica más elevada.

De la misma manera en el caso de la electrodiálisis, cuanto mayor sea la salinidad del agua a desalar mayor será la intensidad de corriente que hay que aplicar para que se pueda producir el desplazamiento de los iones que componen el agua.

La principal diferencia entre las tecnologías anteriormente comentadas, es que se basan en diferentes principios de funcionamiento. Tanto la ósmosis inversa como la electrodiálisis emplean para realizar la separación una membrana y además efectúan el procesos a temperatura ambiente, mientras que la destilación hace uso del vapor producido en el calentamiento del agua.

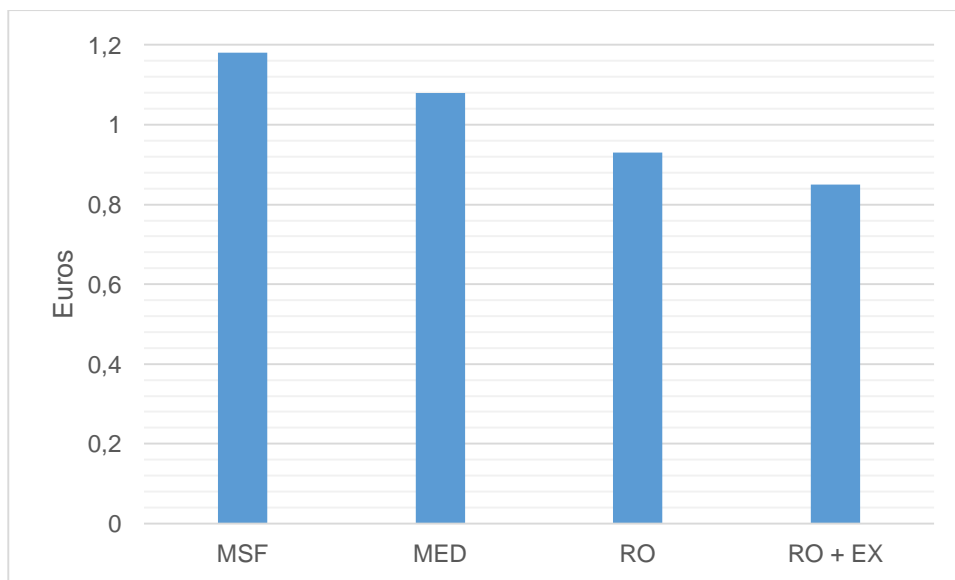


Figura 24. Precio en euros del metro cúbico según la tecnología usada (Wade, 2001).

Como se puede observar a partir de la figura anterior, la tecnología con la que cuesta más producir un metro cúbico de agua desalada es a partir de los diferentes procesos de destilación: MSF (1,18 euros/metro cúbico) seguida de la MED (1,08 euros/metro cúbico).

Aún con un precio por metro cúbico de agua desalada más bajo se encuentra la ósmosis inversa (0,93 euros/metro cubico), pudiendo bajar más aún el precio si le agregamos un recuperador de energía (0,85 euros/metro cúbico). La electrodiálisis, a pesar de no aparecer en la figura la podríamos situar con similar coste por metro cúbico desalado que la ósmosis inversa cuando traba en condiciones de salinidad bajas.

Por todo lo anterior se entiende que a nivel comercial solo se emplee la destilación para aguas de mar, la electrodiálisis para desalar aguas salobres y la ósmosis inversa tanto para agua de mar como para aguas salobres. Además de todo ello, a continuación se enumeran una serie de aspectos destacables de cada una de las tecnologías de desalación.

➤ Destilación

- Alto consumo energético
- Elevada inversión inicial
- Extensión de terreno para su instalación importante
- Baja eficiencia
- No depende de la salinidad del agua a desalar
- La calidad del agua producto es prácticamente la del agua pura
- Necesita una fuente de vapor que según los casos puede o no ser independiente del proceso
- Tiene la posibilidad de acoplarse a una central eléctrica productora de energía.

➤ Electrodiálisis

- Consumo energético medio que en el caso de aguas de salinidad bajas puede ser similar al de la ósmosis inversa.
- Necesita menores tratamientos y tiene un consumo de reactivos menor que otras tecnologías.
- Necesidades de espacio e inversión intermedias.
- Coste de instalación superior al de la ósmosis inversa.
- Agua producto de peor calidad que otros sistemas.
- Sencillez en el uso

➤ Ósmosis inversa

- Posee el menor consumo energético.
- Posibilidad de uso sobre agua salobre y agua de mar.
- Inversión dependiente de las características del agua que se pretende desalar y en general menores que a la de otras tecnologías.
- Necesidad de pretratamientos físico-químicos que pueden llegar a ser importantes.
- Precisa de una extensión de terreno medio.
- Necesidad de fuente de energía externa.
- Además de la separación de iones también logra la separación de bacterias y virus con lo cual tiene aplicaciones como sistema de desinfección.
- La presencia de iones específicos pueden llegar a limitar las posibilidades de su aplicación.
- Su uso se complica en función de las propiedades del agua de alimentación.

3.7. Configuración de planta desaladora de ósmosis inversa

La instalación de una planta desaladora puede llegar a ser más o menos compleja dependiendo cual sea el tamaño y el tipo de agua a tratar de la misma, además debe de contener todos los elementos desde la toma de agua salada hasta el depósito final en el cual se almacena el permeado. En este tipo de instalaciones se han de contemplar todos los elementos anteriores con el fin de que responda a las prestaciones que se le deben exigir a un sistema sofisticado y por tanto caro. Cabe recalcar que a pesar de resultar caro, el sistema de ósmosis inversa es uno de los más usados por su sencillez de diseño y por ser el más económico.

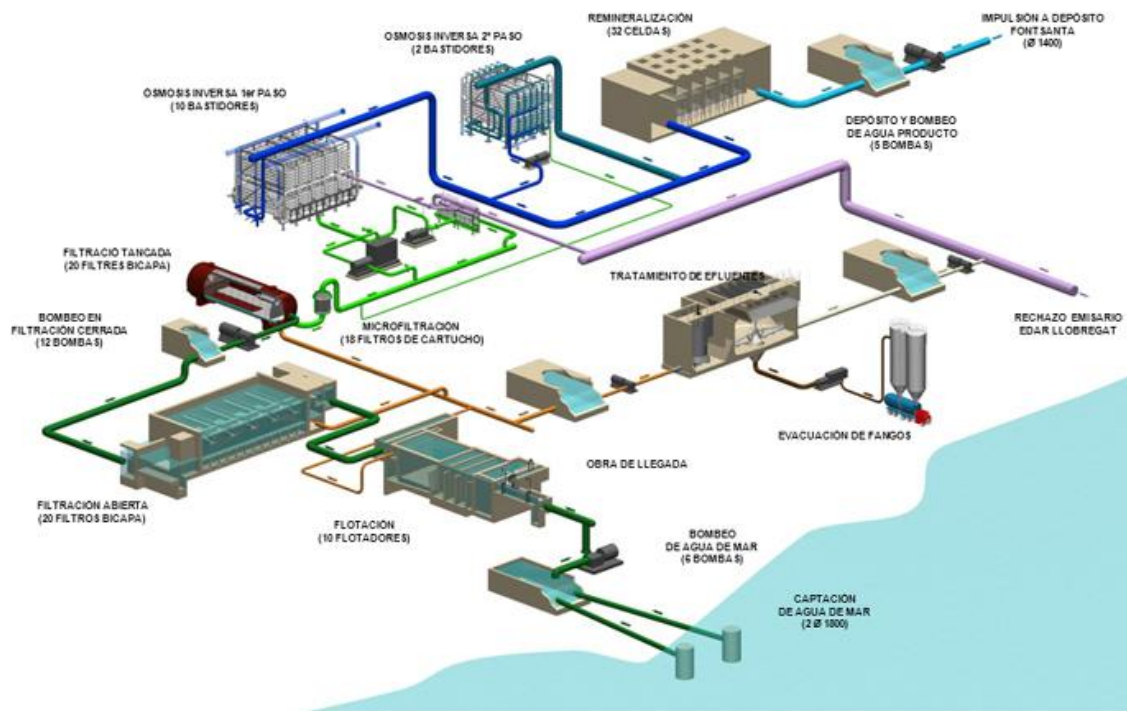


Figura 25. Esquema de la distribución de los elementos de una planta desaladora de ósmosis inversa.

En la figura anterior se puede observar el esquema típico de una instalación desaladora de agua de mar (IDAM), haciendo uso de la tecnología de ósmosis inversa. Este tipo de instalaciones se componen de cuatro partes bien diferenciadas entre sí:

- Captación del agua de mar.
- Pretratamientos físico-químicos
- Núcleo de desalación compuesto por los equipos de alta presión y las membranas de ósmosis inversa.
- Postratamiento del permeado.

3.7.1. Captación del agua de mar

El diseño de la instalación se inicia con la toma o punto de captación del agua que va a alimentar a la instalación. Además la localización de dicha toma y el caudal de extracción del agua bruta que se realiza a través de la misma son factores determinantes en el diseño del pretratamiento requerido para el fluido de alimentación.

Desde el punto de vista de las dificultades que a posteriori van a plantear en el proceso de desalación, se distinguen dos formas de realizar la captación del agua de alimentación:

3.7.1.1. Tomas cerradas, mediante pozos aislados o mediante una cántara común

Si hacemos referencia a la solución mediante pozos aislados, estos se ejecutan con máquinas de perforación llegando a alcanzar profundidades superiores a los 40 metros. Esta profundidad es más o menos grande dependiendo de la profundidad a la que se encuentre la suficiente permeabilidad del terreno para garantizar el caudal de extracción demandado. Normalmente estas perforaciones se entuban con tuberías de PVC y diámetros del orden de 350 mm, aunque depende del caudal que se desee extraer. Las bombas de captación, que se usan en este caso, son bombas sumergibles instaladas en el interior de cada perforación. Si se opta por la solución de cántara común, la principal diferencia radicaría en las bombas ya que serían de carácter horizontal, habría menor cantidad de las mismas y un caudal unitario mayor para cada una.

Una vez comentadas las principales características de este tipo de captación de agua de alimentación, se enumeran a continuación las principales ventajas:

- Limpieza del agua debido a su filtrado a través del terreno, con lo cual la misma posee unos índices de turbidez (NTU) y de colmatación (SDI) bajos.
- Ausencia de actividad biológica y orgánica.
- Bajo contenido de oxígeno disuelto.
- Baja contaminación.
- Temperaturas sin variaciones importantes.

El aprovechamiento de las citadas ventajas abre la posibilidad de abaratar considerablemente los costes de los tratamientos, especialmente químicos, de la instalación, y en ocasiones incluso los equipos debido a la comentada buena calidad del agua de alimentación.

Como inconvenientes más importantes en zonas continentales, se pueden presentar los que se enumeran a continuación:

- Contenidos importantes de algunos elementos secundarios como el hierro, aluminio, flúor u otros que exijan un tratamiento previo antes de alimentar las membranas. También puede afectar este problema a la eficiencia del proceso ya que debido a este motivo se suele optar por un diseño más conservador.
- Contaminación por diversos motivos como la presencia de nitratos, pesticidas, etc.
- Variaciones en la composición química del agua a lo largo del tiempo e incluso dependiendo de la época del año.

3.7.1.2. Tomas abiertas superficiales o a través de un emisario

En este tipo de método de extracción no existe ningún tipo de problema con el caudal de extracción, pero sin embargo, se reduce el rendimiento de la instalación, ya que normalmente al agua de alimentación captada tiene una calidad bastante inferior pudiendo estar afectadas por cualquiera de las siguientes causas:

- Actividad orgánica y biológica importante.
- Contenido en sólidos en suspensión importante y variable según las condiciones.
- Mayor exposición a la contaminación.
- Contenido de oxígeno disuelto más alto.
- Margen de variación de temperatura bastante amplio.

En el caso de optar por el uso de un emisario submarino, es conveniente anclar el mismo siempre y cuando las condiciones del terreno lo permitan, con el fin de evitar que el oleaje pudiera afectar al funcionamiento de la instalación.

Únicamente se recurre a este tipo de toma de captación en las instalaciones de agua de mar, cuando la permeabilidad es sumamente baja imposibilitando el uso de pozos para la

extracción del agua de alimentación. Cabe destacar que este tipo de estructuras sí que se suele usar en ocasiones en instalaciones de aguas salobres.

3.7.2. Pretratamientos físico-químicos

La misión del pretratamiento consiste en suprimir o reducir los atascamientos que se pudieran llegar a producir en las membranas, con la finalidad de que el rendimiento de la planta no se vea afectado. Básicamente lo que se consigue sobre el agua de captación realizándole el pretratamiento es aumentar la calidad de la misma antes de su entrada en las membranas.

En la mayoría de las ocasiones en las que una planta desaladora por ósmosis inversa pierde rendimiento es debido a la acumulación de materias atrapadas en el módulo de membranas. Con el objetivo de que no se produzcan este tipo de acumulaciones que reducen drásticamente en ocasiones la eficiencia de las membranas, se realiza sobre el caudal de agua de alimentación dos tipos principales de pretratamientos, el físico y el químico.

El pretratamiento físico consiste en hacer pasar el agua por diferentes tipos de filtros. Primero se usan filtros de arena en los que se retiran partículas o sólidos de hasta veinte micras y seguidamente se emplean filtros de cartucho para poder garantizar un nivel de filtración mínimo de cinco micras, que es el requerido por los fabricantes de membranas. Además de los filtros ya mencionados, tras el paso por los mismos, también se pueden emplear otros tipo de filtros, como los precapa, u otros tipos de sistemas de filtración, como la ultrafiltración, la microfiltración o la nanofiltración, dependiendo de la calidad del agua de alimentación o de si se requiere unas determinadas condiciones a la entrada de las membranas.

Por otra parte, el pretratamiento químico consiste en primer lugar en la desinfección del agua de alimentación, generalmente a través de la aplicación de hipoclorito sódico que es un líquido que se debe aplicar con bombas dosificadoras. Seguidamente se procede a la regulación del pH, para lo cual se usa ácido sulfúrico de elevada concentración (96-98%) con

lo cual se ha de tener mucha precaución con su manipulación. Luego se aplican distintos productos como el coagulante (cloruro férrico o distintos polímeros), el reductor (bisulfito o metabisulfito sódico) y los estabilizares en el caso de que sea necesario. Con el fin de garantizar que los productos se repartan homogéneamente por todo el agua de alimentación se usan los sistemas de dilución, los mezcladores y los agitadores.

3.7.3. Núcleo de desalación

El núcleo de desalación de las instalaciones de desalación, es la zona de la misma donde se produce la separación del agua de las sales. Dicho núcleo está compuesto principalmente por cuatro equipos: la bomba de alta presión, el bastidor de membranas (equipo donde se produce la ósmosis inversa), el recuperador de energía (en nuestro caso nos centraremos en el intercambiador de presión) y la bomba booster asociada al intercambiador.

3.7.3.1. Bomba de alta presión

La bomba de alta presión constituye una de las partes más importantes para llevar a cabo el proceso de ósmosis inversa, porque es la encargada de aportar al fluido la presión necesaria para superar la presión osmótica y que se pueda llevar a cabo el proceso.

Para seleccionar la bomba de alta presión en estos casos se tienen en cuenta generalmente dos factores: la presión de bombeo necesaria y el caudal que ha de aportar la bomba para cumplir con la producción deseada. La representación de estos dos parámetros en una gráfica es lo que se conoce como curva característica de la bomba. No obstante a pesar de que los dos parámetros son los fundamentales para la elección de la bomba, también debemos de tener en cuenta a la hora de la elección de la misma otros como lo son el rendimiento (interesa siempre trabajar con la bomba que posea el mayor rendimiento), los materiales de construcción, el mantenimiento, el nivel de ruido y de vibraciones, su coste, etc.



Figura 26. Bomba de alta presión Multitec RO (KSB).

3.7.3.2. Bastidor de membranas

Los bastidores de membrana están constituidos por una estructura metálica sobre la que se colocan los distintos tubos de presión, con sus correspondientes membranas, debidamente sujetos con el fin de evitar posibles desplazamientos debido a los golpes de ariete que se producen en los arranques de la instalación. Hay que tener en cuenta que al aumentar la capacidad del bastidor también aumentará la altura del mismo, haciendo que algunas operaciones de mantenimiento o manipulación pudieran resultar incómodas. Esto hace que deba estudiarse minuciosamente la distribución de los tubos de presión para evitar alturas innecesarias. Además sobre estos bastidores se sujetan los colectores de alta presión de alimentación y rechazo, como los de baja presión del agua producto. Asimismo también es conveniente la colocación de otros dispositivos como llaves de purga para la eliminación del aire en los arranques de la instalación y canaletas debajo de cada fila de tubos de presión, fijada al bastidor, con el fin de recoger los correspondientes goteos y conducirlos al drenaje general.

En el interior de cada tubo de presión están colocadas un número de entre seis y ocho membranas, colocadas seguidamente una tras otra. El número de membranas por tubo de presión es un parámetro importante a tener en cuenta, ya que dependiendo del mismo afectará a la calidad del permeado.

Las membranas es el elemento gracias al cual se produce la separación entre el agua y las sales. Existe una gran variedad de tamaños y tipos de membranas, dependiendo de numerosos parámetros como la cantidad de agua a desalar, la calidad del permeado deseada, la calidad del agua de alimentación, etc.

Las membranas que tienen un uso más extendido en la actualidad son las de fibra hueca y las de arrollamiento en espiral (la explicación se centrará en la descripción de estas últimas). Están formadas por varias láminas rectangulares, que constituyen las membranas propiamente dichas, enrolladas alrededor de un eje cilíndrico provisto de perforaciones que permite recoger el agua producto. Para el arrollamiento de las láminas desaladoras se disponen las mismas alternadas con un separador impermeable y una malla, de forma que en una membrana arrollada en espiral existen tantas láminas como separadores y mallas.

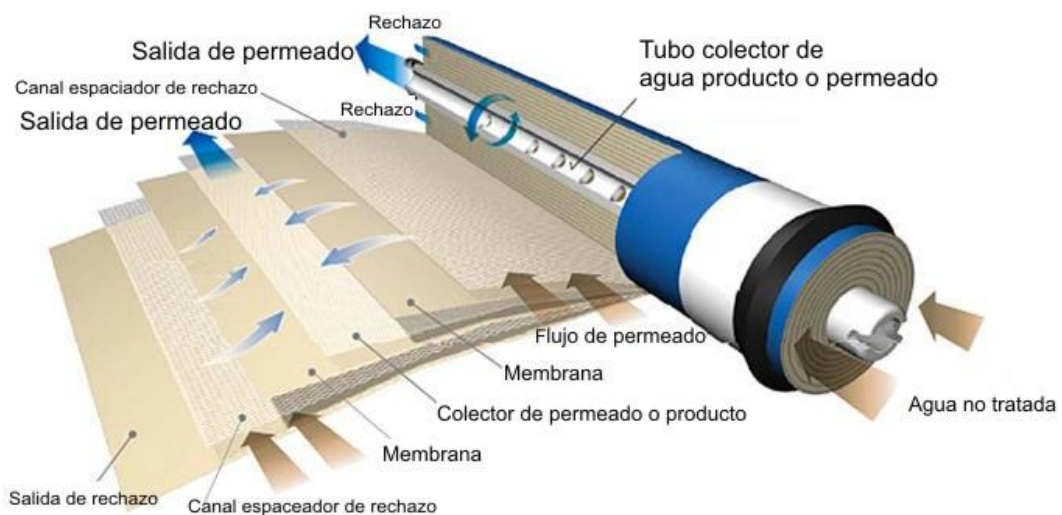


Figura 27. Esquema de una membrana de arrollamiento en espiral.

La malla plástica determina los canales hidráulicos por los que circula el agua a tratar y gracias a la forma cuadrículada de las mismas se garantiza un régimen de funcionamiento turbulento lo que reduce las posibilidades de obstrucción por elementos extraños. A su vez el separador impermeable permite aislar el caudal que pasa por cada una de las láminas o membranas y separarlo de la salmuera.

El conjunto de membranas, mallas y separadores se sella mediante un pegamento por tres de los lados, mientras que por el cuarto lado que constituye la única salida posible para el agua que ha atravesado las membranas, se une al eje perforado. Finalmente, se cierra el conjunto con una envoltura exterior de poliéster con fibra de vidrio, logrando una gran estanqueidad.

3.7.3.3. Recuperador de energía

En las instalaciones de desalación por ósmosis inversa, cuya recuperación es baja, se suelen instalar dispositivos de recuperación de energía con el fin de recuperar la energía de la salmuera y reducir el consumo energético. Existen de diferentes tipos aunque los más comunes son la turbina Pelton (en desuso) y los intercambiadores de presión.



Figura 28. Interior de un intercambiador de presión (Energy Recovery).

Los intercambiadores de presión son elementos de recuperación de energía, que se encargan de transmitir directamente la alta presión de la salmuera de rechazo al agua de mar de alimentación sin convertirla previamente en energía mecánica de rotación. Según su funcionamiento se pueden distinguir los intercambiadores de presión de rotación y los intercambiados de presión fijos por desplazamiento.

3.7.3.4. Bomba booster

La bomba booster es la bomba encargada de aumentar la presión del agua de alimentación desde la presión de salida del intercambiador de presión hasta igualarla con la presión de salida de la bomba de alta presión. Esto es debido a que en las membranas, en las conducciones y en el propio intercambiador se producen pérdidas de presión.

Cabe destacar que al igual que para la selección de la bomba booster los principales parámetros a tener en cuenta son el caudal que tiene que asumir y la presión que le tiene que aportar al mismo.

3.7.4. **Postratamiento del permeado**

Dentro del postratamiento dos son los procesos principales a los que se ha de someter el agua desalada, el ajuste del pH y la post-cloración.

El ajuste del pH es necesario debido a que el agua desalada mediante membranas tiene el mismo bajo (aproximadamente 5,5), es pobre en calcio y de baja alcalinidad, todo ello como resultado del elevado rechazo de estos iones por las membranas. Es por tanto un agua desequilibrada. Su baja alcalinidad y la presencia de CO₂ la hacen corrosiva pudiendo disolver los precipitados de las tuberías e incluso incumplir aspectos de la normativa técnico-sanitaria.

El CO₂ se forma por la reacción del sulfúrico con los bicarbonatos y pasa fácilmente a través de la membrana por lo que se acumula en el permeado. Para estabilizarla hay que llevar esto parteros a su equilibrio de saturación de CaCO₃.

También en ocasiones contiene SH₂, especialmente cuando se tratan aguas subterráneas. Por tanto hay que estabilizarla con respecto al CO₃Ca llevando el pH a 6,5-8. En definitiva la estabilización se consigue por tres procedimientos que son:

- Descarbonatación o desgasificación
- Adición de productos químicos

- Mezcla con otras aguas.

Por último, debemos realizar la etapa de post-cloración, debido a que como el agua se va a desalar ha sido desprovista de sus características oxidables mediante la dosificación de bisulfito sódico (añadido en el pretratamiento como reductor), en el producto no existen rastros de cloro residual. Es por este motivo que si el agua se va a dedicar a abastecimientos urbanos es necesario volver a clorarla para cumplir con la normativa sanitaria en cuanto a la presencia de cloro residual en la red.

3.7.5. Salmuera

La salmuera, también conocido como rechazo, es el agua de alta contenido en sal que tiene como resultado el paso del agua de mar por las membranas de ósmosis inversas.

Este flujo de salmuera de rechazo causa impactos sobre el medio, ya que aunque se le devuelven al mar los mismos iones que se la habían extraído previamente, se hace con una mayor concentración de los mismos (aproximadamente entre el 1,6 – 2,5 la salinidad del agua de mar). Los principales afectados por este aumento en la concentración de iones, son las especies que habitan en zonas de vertido de salmuera.

Los organismos marinos se encuentran en equilibrio osmótico con el medio que los rodea, de modo que al aumentar la concentración del medio, para igualar concentraciones el agua de las células tiende a salirse del organismo, produciéndose la deshidratación de los mismos. La sensibilidad ante estos incrementos de salinidad varía de unas especies a otras, llegando algunas a aclimatarse con el tiempo.

El organismo más sensible a estos cambios de concentración de sales en el medio marino son las Posidonias oceánicas. Esta planta crece en los fondos arenosos y que solo existe en el Mar Mediterráneo ocupando grandes superficies.

Con el fin de mitigar las variaciones de salinidad que se pueden dar en el agua de mar debido a vertidos de salmuera, existen diversos métodos entre los que destacan los dos que se muestran a continuación a continuación:

- Descarga mediante emisario submarino
- Descarga tras la dilución de la salmuera

3.8. Energías renovables aplicadas a la desalación

La utilización de fuentes de energía renovables para llevar a cabo el proceso de desalación es el objetivo a conseguir en numerosas ocasiones, debido a que en numerosas ocasiones coinciden en una misma zona geográfica tanto la escasez de agua como la existencia, e incluso abundancia, de recursos energéticos renovables. Además la posibilidad de poder abastecer los sistemas de desalación con una energía de bajo coste, es beneficioso para reducir el coste final del mismo. La desalación es un proceso que necesita grandes cantidades de energía para llevarse a cabo, con lo cual se podría beneficiar de energías más baratas, como por ejemplo la energía eólica.

Cuando se hace referencia al uso de energías renovables en desalación, hay que distinguir entre tres formas diferentes de utilización de dicha energía, uso directo, uso indirecto y uso mixto.

3.8.1. Uso indirecto

En este caso, la energía renovable se convierte en otra forma energética, normalmente electricidad, que se inyecta a la red general. La desaladora se nutre de esa red general, pero no hay una utilización directa de la energía captada y convertida en la instalación de renovables. En este caso no es necesario que la energía obtenida a través de las energías renovables tenga que ser la misma que consume la planta de desalación, ya que esta última funciona alimentada directamente por la red. A través de este tipo de uso, abarataremos el coste energético a través de la venta de la energía eléctrica producida a partir

de las energías renovables. La principal ventaja que tiene es que el funcionamiento de la planta no depende de la producción de energía eléctrica a partir de las renovables.

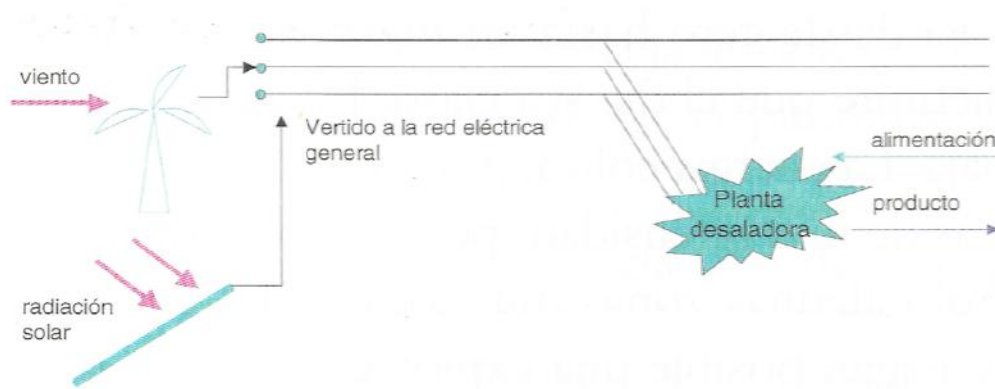


Figura 29. Uso indirecto de energías renovables para la desalación (Autor: José Miguel Veza).

3.8.2. Uso directo

Por otro lado, se pueden aplicar las renovables directamente a la desalación. En este segundo caso, la energía captada por los dispositivos eólicos, solares u otros, se aplica directamente a la unidad de desalación sin pasar por ninguna fase intermedia. Al contrario que en el uso indirecto, no hay volcado de energía a una red general de distribución, sino que la instalación opera de forma aislada de la red.

Este tipo de uso tiene algunos problemas ya que las características que poseen las energías renovables implican ciertas dificultades de adaptación o de acoplamiento para alimentar unos sistemas de desalación inicialmente concebidos para operar de manera continua y en régimen estacionario. Es por ello que las energías renovables para usos directos se han visto limitadas a casos dentro de algunas de las siguientes situaciones:

- Instalaciones de pequeña capacidad, en la mayoría de los casos
- Instalaciones en las que no es precisa una explotación continua.
- Instalaciones sobredimensionadas en las que se puede almacenar agua durante las horas de aportación de energía renovable, para compensar las horas de baja o nula producción.
- Instalaciones en fase de investigación y desarrollo.

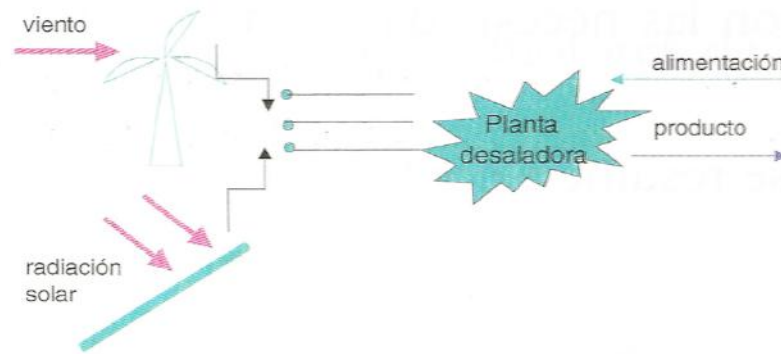


Figura 30. Uso directo de energías renovables para la desalación (Autor: José Miguel Veza).

3.8.3. Uso mixto

Este tercer tipo de uso es una combinación de los explicados anteriormente, adquiriendo las ventajas ellos. En este tipo de uso la planta desaladora está conectada con la instalación de energías renovables, y a su vez, ambos a la red eléctrica. La planta desaladora siempre será suministrada de energía a través de la instalación de renovables, siempre que esta pueda abastecer a la desaladora. En el caso de que no sea suficiente con la energía producida por la instalación de renovables, la planta de desalación estará alimentada tanto por la red como por la instalación. Por otro lado, si la instalación de renovables producen más energía de lo que la planta desaladora requiere se cederá a la red eléctrica este sobrante.

Gracias a este tipo de uso solucionamos los problemas que nos planteaban los anteriores, y aprovechamos de manera más eficiente la energía eléctrica tanto la producida por la instalación de renovables como la aportada por la red, abaratando lo máximo posible el proceso de desalación.

3.9. Ejemplo de aplicación en Canarias

Canarias debido a sus características es un sitio ideal para desarrollar y probar este tipo de tecnología, ya que hay numerosas zonas a lo largo de su territorio en las que coinciden la falta de recurso hídrico con la existencia de recursos renovables. Es por ello que

ya existen plantas desaladoras que poseen instalaciones de energías renovables para su propio autoconsumo, tanto a partir de energía eólica como energía solar.

En Canarias destacan dos ejemplos de desaladoras alimentadas gracias a la acción tanto del viento (energía eólica) como a la del sol (energía fotovoltaica). A continuación se presentan a ambos ejemplos:

- La desaladora de Corralejo. Esta planta de desalación situada en el municipio de Corralejo en la isla de Fuerteventura, tiene la singularidad de estar asociada a un parque eólico de autoconsumo de 1,7 MW con una capacidad de producción de 4000 m³/día.

El parque eólico de autoconsumo está formado por dos aerogeneradores de 850 kW cada uno, los cuales tienen una producción energética anual de 3400 MWh aproximadamente. Con dicha energía se cubre el 83% de la electricidad necesaria para el funcionamiento de la planta, aunque se pretende llegar en los próximos años al 100 %. Además cabe destacar, que hay pico de producción en los que se cubre el total del consumo de la planta.



Figura 31. Fotografía de los aerogeneradores que abastecen energéticamente a la desaladora de Corralejo (Fotografía: Carlos González).

- Dessol. Esta tecnología ha sido desarrollada por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) gracias a las investigaciones realizadas en los últimos años, y se basa en la desalación por ósmosis inversa mediante energía solar fotovoltaica.



Figura 32. Sistema Dessol para la desalación de agua de mar o salobre (ITC).

Es un sistema concebido para pequeñas poblaciones (1-1500 habitantes), puesto que el factor escala/coste que posee el mismo limita la producción instalada a 100 m³/día. Ello implica una producción real de unos 30 m³/día por disponibilidad solar.

En este proyecto se estudiará únicamente la obtención de energía a través del aprovechamiento del viento, debido a que como se puede observar en las explicaciones anteriores los sistemas abastecidos por energía fotovoltaica están limitados a una producción de unas decenas de metros cúbicos al día.

3.10. Energía eólica

La energía eólica es la energía obtenida del viento. Es uno de los recursos energéticos más antiguos por el ser humano y es a día de hoy la energía más madura y eficiente de todas las energías renovables.

La energía eólica es una fuente de energía no contaminante, inagotable y además con su uso se reduce el uso de combustibles fósiles, los cuales son origen de las emisiones de efecto invernadero que causan el calentamiento global. Además de ello, la energía eólica está disponible en prácticamente toda la Tierra, lo que podría contribuir a reducir las importaciones energéticas y crear riqueza y empleo derivados de su uso.

Algunas de las principales ventajas de la energía eólica frente a las fuentes energéticas tradicionales son las siguientes:

- Es una energía inagotable, ya que tiene su origen en procesos atmosféricos debidos a la energía del Sol.
- No produce ningún tipo de contaminación. La energía generada a través del viento es la que menor impacto tiene sobre el medio.
- Impacto menos agresivo sobre el suelo, ya que la generación de la misma no tiene un impacto tan agresivo sobre la composición del suelo o su erosionabilidad, como sí lo son los combustibles fósiles.
- El agua permanece inalterada. Esta energía no produce alteraciones sobre las fuentes de agua, al no hacer uso de ellas

Por todo ello, la energía eólica comienza a tener cada vez más un posicionamiento creciente en la producción de energía a nivel mundial.

3.10.1. El viento

La existencia del viento en el planeta es consecuencia de la acción del Sol, pues es su radiación, en combinación con otros factores como la inclinación y el desplazamiento de la Tierra en el Espacio o la distribución de los continentes y los océanos, lo que activa la circulación de las masas de aire a lo largo del planeta debido al calentamiento desigual de las mismas. El aire que más se calienta se vuelve más ligero y por tanto se desplaza hacia capas

superiores de la atmósfera, siendo ocupado el lugar dejado por el mismo a capas más frías. Éste hecho se puede observar en la siguiente figura.

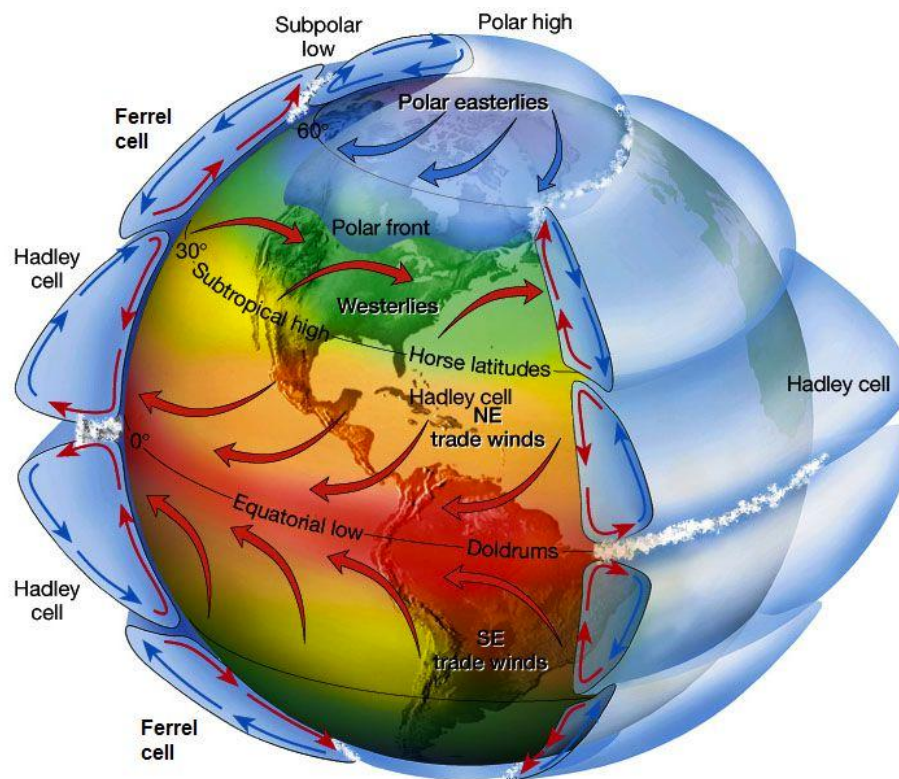


Figura 33. Circulación de las diferentes masas de aire en la Tierra.

Se pueden distinguir dos “tipos” de viento a lo largo del planeta según la escala de los mismos:

- Gran escala. Existe una serie de corrientes de vientos dominantes que circulan por todo el mundo en capas de la estratosfera. Estos vientos se rigen por los cambios de temperatura y de presión atmosférica, pero también por otros factores como, por ejemplo, la fuerza de Coriolis.
- Escala local. Cerca de la superficie terrestre soplan otros vientos más específicos caracterizados por el relieve del terreno y otras variables como la rugosidad y la altura del mismo.

Los dos valores clave para analizar el viento son su velocidad (medida con un anemómetro) y su dirección (medida con una veleta).

3.10.2. Energía contenida en el viento

Como se ha explicado anteriormente, la principal razón de la existencia de los vientos es la acción de la energía procedente del Sol sobre la atmósfera de la Tierra. Únicamente el 2 % de dicha energía se transforma en energía cinética de los vientos atmosféricos. El 35 % de esta energía se disipa en la capa atmosférica a tan solo un kilómetro por encima del suelo, el porcentaje restante se estima que por su aleatoriedad y dispersión solo podría ser reutilizada 1/13 parte. Aun así, si se aprovechara ese pequeño porcentaje de energía reutilizable sería suficiente para abastecer 10 veces el consumo de energía primaria mundial, de ahí el enorme potencia e interés de la energía eólica.

Hoy en día la manera de aprovechar la energía contenida en el viento es a través del uso de aerogeneradores.

3.10.3. Aerogeneradores

Un aerogenerador es un dispositivo que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica. En la actualidad, casi la totalidad de las turbinas eólicas son de eje horizontal y tripala.

Los primeros aerogeneradores basaban su funcionamiento en el principio de la resistencia al arrastre que ofrecen las palas frente a la acción del viento. Ese diseño, no aerodinámico, conducía a un rendimiento de conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica en el eje de la máquina muy pequeño, con valores en torno al 12%. En cambio, las turbinas modernas funcionan bajo el principio de la fuerza de sustentación que se desarrolló en la pala debido a su diseño aerodinámico, de modo similar al ala de un avión. El avance en el diseño aerodinámico y estructural de las palas, ha permitido incrementar el rendimiento de conversión a valores cercanos al límite teórico.

Este límite teórico, también conocido como Límite de Betz, dice que únicamente se puede extraer el 59% de la energía que llega al rotor. Este valor surge de la imposibilidad de extraer el 100 % de energía del viento ya que eso significaría que el aire saldría de la turbina a velocidad nula, es decir, no podría abandonarla, con lo que no se podría extraer de esa manera energía.

Hoy en día, los aerogeneradores modernos, son capaces de aprovechar el 40% de la energía almacenada por el viento, lo cual es un porcentaje bastante alto si lo comparamos con el máximo aprovechable, dado por el Límite de Betz ya comentado, un 59%.

3.10.3.1. Elementos de un aerogenerador

Los elementos básicos, para el funcionamiento adecuado y eficiente de un aerogenerador son los siguientes:

- Torre. Es el elemento encargado de soportar la góndola y el rotor. Hoy en día suelen ser tubulares de acero. Las torres de celosía (perfiles de acero soldados) son más económicas, pero por motivos estéticos y de seguridad se han dejado de usar. En terrenos rugosos, las torres más altas captarán vientos de mayor velocidad.
- Rotor. Conjunto formado por las palas y el buje que las une. Es el elemento que se encarga de realizar la transformación de energía cinética del viento en energía mecánica. Por normal general, cuanto mayor sea el área del barrido del rotor mayor será la producción. Además, los rotores pueden ser de paso variable (permiten girar sobre sí mismas a las palas con el fin de aprovechar mejor la energía del viento) o de paso fijo (en el que no pueden girar).
- Palas. Similares a las alas de un avión. En la actualidad, la mayoría de las turbinas cuentan con tres palas, siendo las mismas de poliéster o epoxi reforzado con fibra de vidrio.

- Góndola. En su interior contiene los diferentes dispositivos encargados de transformar la energía mecánica procedente del rotor en energía eléctrica. Además, en el exterior de la misma se encuentran instalados elementos de medición, una veleta y un anemómetro, que facilitan información continua al sistema de control del aerogenerador.
- Multiplicador. Elemento encargado de multiplicar la velocidad de giro que llega del rotor, con el fin de adaptarla a las necesidades del generador.
- Generador. Es el dispositivo que transforma la energía mecánica en energía eléctrica, pudiendo ser asíncrono o síncrono.
- Controlador electrónico. Ordenador que se encarga de realizar el control continuo de las condiciones de funcionamiento del aerogenerador.
- Sistema hidráulicos. Elemento auxiliares que permiten el accionamiento del giro de las palas sobre su eje, así como el frenado del rotor o el giro y frenado de la góndola.
- Sistema de orientación. Sistema encargado de colocar el rotor de manera perpendicular al viento, a través del análisis de los datos recogidos por la veleta.

3.10.3.2. Impactos ambientales

Como cualquier otro sistema de generación de energía, la instalación de aerogeneradores tiene impactos negativos sobre el medioambiente, los cuales han de tenerse en cuenta para ser mitigados en la medida de lo posible:

- Deterioro del paisaje. El mayor impacto provocado por la energía eólica es de tipo visual. Esto suele ser debido a que los emplazamientos más ventosos donde suelen colocarse los aerogeneradores corresponden por lo general a entornos naturales poco humanizados y, por lo tanto, con preciados valores paisajísticos. Este impacto

podría mitigarse con el reemplazo de máquinas más potentes en los parques existentes, técnica conocida como “Repowering” o “Repotenciación”.

- Efectos sobre las aves. La colisión de las aves con los aerogeneradores o las molestias causadas a la avifauna por la construcción y funcionamiento de un parque eólico constituyen impactos que por lo general son bastante limitados. Sin embargo, suelen tener cierta importancia en lugares especialmente valiosos para el paso o la nidificación de aves. Una manera de disminuir esta problemática es mediante la instalación de elementos que destaquen la presencia de las instalaciones eólicas, con el fin de llamar la atención de las aves y evitar las colisiones.
- Ocupación del territorio. La energía eólica necesita instalar muchos aerogeneradores por todo el territorio para acercarse a la producción de las centrales térmicas tradicionales. Este problema tiene fácil solución, ya que las turbinas ocupan poco espacio sobre el terreno, pudiéndose aprovechar el mismo para la agricultura o la ganadería.
- Ruido. Otro de los problemas que presentan los aerogeneradores son las vibraciones y ruido que provocan. Por esta razón suelen ubicarse en zonas alejadas de viviendas. Normalmente se observa una distancia mínima de unos 7 diámetros de rotor o 300 metros de los vecinos más cercanos. Aunque cabe destacar que cuando las velocidades del viento son altas, el propio ruido ambiente enmascara el originado aerodinámicamente por las palas del aerogenerador.
- Impactos en el mar. En el caso de las instalaciones off-shore, la separación de la costa determina el impacto visual o el ruido, pudiendo disminuir o desaparecer algunas de estos problemas. Por otra parte, puede que el impacto para las aves y otras especies marinas sea importante, lo que deberá de tenerse en cuenta.

Cabe destacar que para mitigar en la medida de lo posible todos los impactos comentados se deben de realizar los estudios pertinentes.

Por último, se ha de comentar que a pesar de los posibles inconvenientes comentados, el producir un kilovatio-hora con aerogeneradores tiene un impacto ambiental:

- 4 veces menor que con gas natural
- 10 veces menor que con plantas nucleares
- 20 veces menor que con carbón o petróleo

Todo ello sin considerar otros aspectos negativos de los anteriores sistemas de generación de energía.

3.10.4. Evolución de la energía eólica

En los últimos años, debido a la subida de los precios de los combustibles fósiles, el aumento de la conciencia social por el medioambiente y sobre todo gracias a la mejora de la eficiencia de la energía eólica, se ha producido un importante aumento de la potencia eólica instalada en el mundo como se puede observar en las siguiente figura.

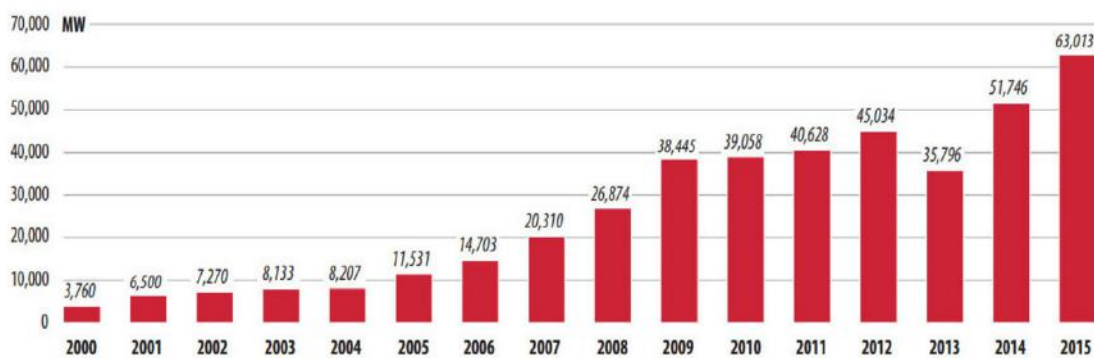


Figura 34. Potencia eólica anual instalada en el mundo en el periodo 2000-2015 (GWEC).

Actualmente la potencia eólica instalada en el mundo ha crecido hasta situarse en 432.419 MW en el año 2015, denotando la gran importancia y potencial de la energía eólica.

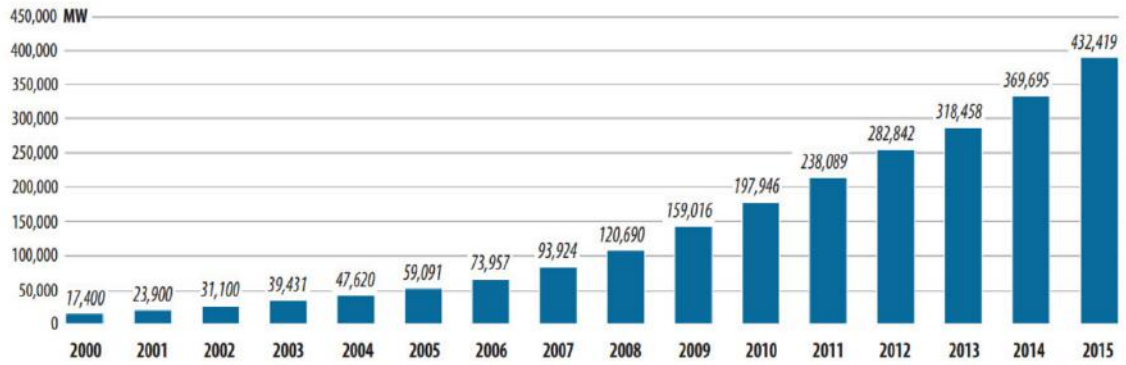


Figura 35. Potencia eólica instalada en el mundo (GWEC).

En España en cambio, este aumento no se ha visto reflejado ya que debido a las políticas llevadas a cabo en los últimos años en el sector energético, el progreso de las energías renovables se ha visto frenado, como se puede ver en la figura que se muestra a continuación.

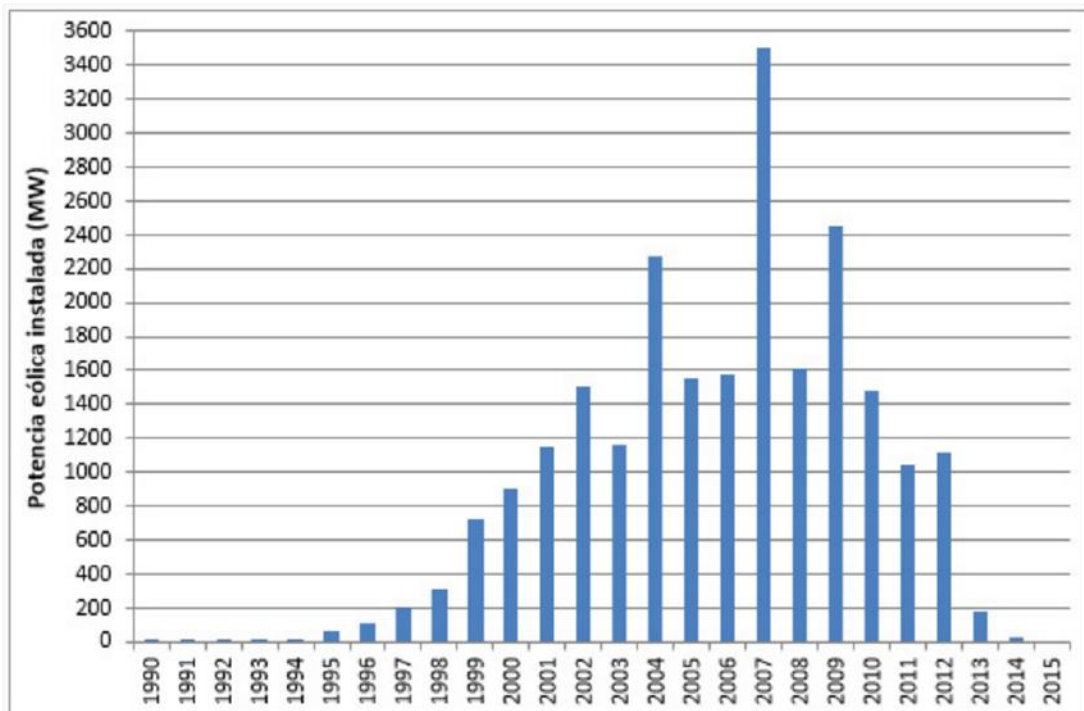


Figura 36. Evolución de la potencia eólica instalada en año a año en España (AEE).

A pesar de esta paralización en el desarrollo de la industria eólica en España en los últimos años, se espera un crecimiento de este sector en un futuro cercano según datos aportados por la Asociación Europea de Energía Eólica (EWEA).

Según los mismos, España pasará de tener 23.002 MW instalados (según datos de finales de 2014 recogidos por Red Eléctrica de España) a contar con 35.005 MW en el peor de los casos y 52.500 MW en el mejor de ellos.

Si hacemos referencia al caso de Canarias, la potencia instalada acumulada hasta el año 2015, tiene un valor de 177 MW.

COMUNIDAD AUTÓNOMA	Potencia acumulada a cierre de 2015 (MW)	Nº de parques
Castilla y León	5.561	241
Castilla-La Mancha	3.807	139
Andalucía	3.338	153
Galicia	3.328	161
Aragón	1.893	87
Cataluña	1.269	47
Comunidad Valenciana	1.189	38
Navarra	1.004	49
Asturias	518	21
La Rioja	447	14
Murcia	262	14
Canarias	177	56
País Vasco	153	7
Cantabria	38	4
Baleares	4	46
TOTAL	22.988	1.077

Figura 37. Potencia instalada por Comunidades Autónomas en 2015 (AEE).

Como se puede ver en la figura siguiente, a pesar de que Canarias es una zona excelente debido a sus condiciones climatológicas para implantar sistema de generación de energía eólicos, la potencia eólica instalada en el Archipiélago se ha visto frenada en los últimos años debido en gran medida a las ineficientes políticas que imposibilitan el desarrollo de la misma.

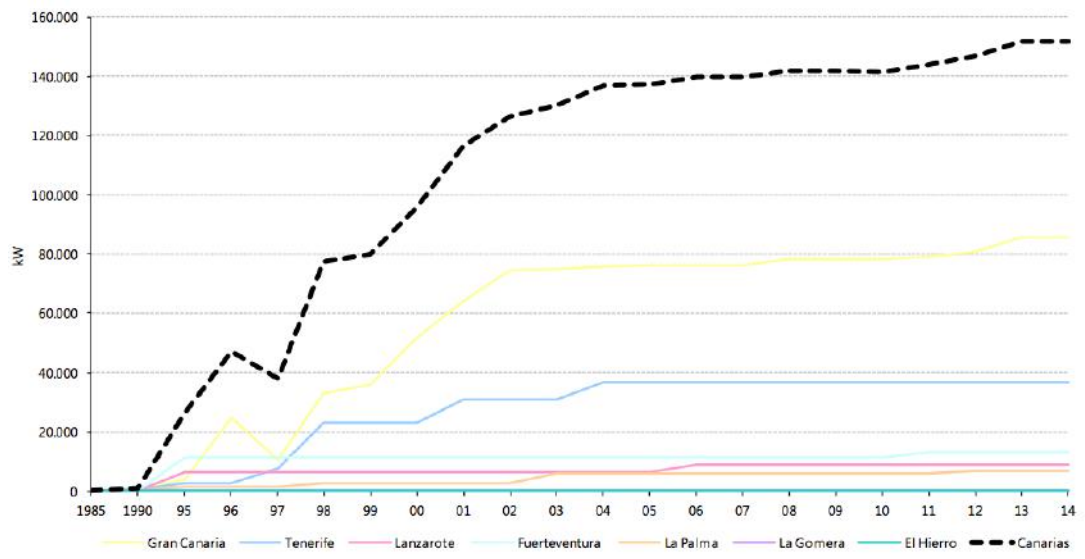


Figura 38. Evolución de la potencia eólica instalada en Canarias (Gobierno de Canarias).

4. Normas y referencia

4.1. Disposiciones legales y normas aplicadas

- Plan Hidráulico de Tenerife
- Plan Insular de Ordenación del Territorio 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.
- DECRETO 6/2015, de 30 de enero, por el que se aprueba el Reglamento que regula la instalación y explotación de los Parques Eólicos en Canarias.
- Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.

4.2. Bibliografía

- Agüera Soriano, José. Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas. Madrid: Editorial Ciencia, 2002.
- Ibrahim Perera, Juan Carlos. Desalación de aguas. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1998.
- Rodríguez Amenedo, J.L., Burgos Díaz, J.C. y Arnalte Gómez, S. Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica. Madrid: Editorial Rueda, 2003.
- 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: servicio de publicaciones y producción documental de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2002.
- Ruifernández Guitián, José Manuel. Energía Eólica. Fundamentos y aerogeneradores. La Laguna: Universidad de La Laguna, 2005.
- Wade N.M. Distillation plant development and cost update. 2001.
- Centro Canario del Agua: www.fcca.es
- Agricultura y desarrollo rural en Tenerife: www.agrocabildo.org
- Cabildo de Tenerife: www.tenerife.es
- Gobierno de Canarias: www.gobiernodecanarias.org

- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente: www.magrama.gob.es
- Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas: www.minhap.gob.es
- Ministerio de Industria, Energía y Turismo: www.minetur.gob.es
- Sede Electrónica del Catastro: www.sedecatastro.gob.es
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía: www.idae.es
- Instituto Tecnológico de Canarias: www.itccanarias.org
- Instituto Canario de Estadística: www.gobiernodecanarias.org/istac/
- Instituto Nacional de Estadística: www.ine.es
- Asociación Empresarial Eólica: www.aeolica.org
- Vestas: www.vestas.com
- Gamesa: www.gamesacorp.com
- Enercon: www.enercon.de
- Nordex: www.nordex-online.com
- Made: www.windmade.org
- Senvion Wind Energy Solutions: www.senvion.com
- Acciona: www.acciona.com/es/
- European Wind Energy Association: www.ewea.org
- UNESCO: www.unesco.org/es
- Empresa Mixta de Aguas de Santa Cruz de Tenerife: www.emmasa.es
- Consejo Insular de Aguas de Tenerife: www.aguastenerife.org
- KSB: www.ksb.com
- Flowserve: www.flowserve.com/es_ES
- Lowara: www.lowara.com
- Grundfos: es.grundfos.com
- Sulzer: www.sulzer.com
- Flowtite: www.flowtite.com
- Goolzoom: www.goolzoom.com
- Grafcan: www.grafcan.es
- Puertos del Estado: www.puertos.es
- General Electric: www.ge.com
- Toray: www.toray.com

- Hydranautics: membranes.com
- Asociación Española de Desalación y Reutilización: www.aedyr.com
- Escuela de Organización Industrial: www.eoi.es
- Wikipedia: www.wikipedia.org
- Red Eléctrica de España: www.ree.es
- Repositorio Institucional Universidad de La Laguna: riull.ull.es/

4.3. Programas de cálculo

- Aplicación online para la selección de bombas del fabricantes KSB (KSB Easy Select).
- Aplicación online para la selección de bombas del fabricantes Flowserve (Affinity).
- Aplicación online para la selección de bombas del fabricantes Lowara (Xylect).
- Aplicación online para la selección de bombas del fabricantes Grundfos (Grundfos Product Center).
- Aplicación online para la selección de bombas del fabricantes Sulzer (Sulzer Select).
- AutoCAD.
- Microsoft Office Word 2016.
- Microsoft Office Excel 2016.
- Software para el dimensionado de membranas Winflows.
- Software para el dimensionado del intercambiador de presión del fabricante Flowserve (hoja Excel proporcionado por el propio fabricante).
- Aplicación online de estimación de la energía producida por un aerogenerador proporcionada por el Instituto Tecnológico de Canarias.

5. Definiciones y abreviaturas

En el presente apartado se hace referencia a los diferentes conceptos y abreviaturas que se nombran en la redacción del proyecto que puedan llevar a equívoco, ordenados de manera alfabética.

5.1. Definiciones

- Conversión: Porcentaje que relaciona la cantidad de agua producto con la de alimentación.
- Consumo específico: parámetro característica de las instalaciones desaladoras que indica el consumo externo de energía por metro cúbico de agua producida.
- Permeado: Caudal de agua producto de un planta desaladora.
- Salmuera: Caudal de agua de rechazo con un alto contenido en sales.
- Mezcla volumétrica: Mezcla que se produce en el interior del intercambiador de presión entre la salmuera y el agua de alimentación.

5.2. Abreviaturas

- CV: Compresión de Vapor
- ED: Electrodialisis
- EDAM: Estación Desaladora de Agua de Mar
- IDAE: Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía
- IDAM: Instalación Desaladora de Agua de Mar
- ITC: Instituto Tecnológico de Canarias
- MED: Multi-effect Distillation
- MSF: Multistage Flash Evaporation
- NTU: Nephelometric Turbidity Unit
- RO: Reverse Ósmosis
- SDI: Silt Density Index
- TDS: Total Dissolved Solids

6. Requisitos de diseño

En los siguientes puntos de este apartado se fijarán los parámetros necesario para realizar los cálculos y las simulaciones a través del software del fabricante de membranas y los programas de selección de bombas. Estos parámetros son fijados debido a las necesidades del peticionario del proyecto y de las características de la zona donde se encuentra el emplazamiento de nuestra planta desaladora.

6.1. Datos del peticionario

El peticionario del presente proyecto, la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna, encomienda la realización del estudio de una planta desaladora de agua de mar autoabastecida a partir de energías renovables. Dicho estudio ha de ceñirse a las siguientes premisas emitidas por el peticionario.

- La planta usará como tecnología de desalación la ósmosis inversa.
- La energía será obtenida a partir del recurso eólico de la zona de instalación de la EDAM.
- Se ha de definir el emplazamiento de nuestra planta desaladora de agua de mar teniendo en cuenta tanto la necesidad de curso hídrico así como la existencia de recurso eólico suficiente para el abastecimiento de la misma.
- Se ha de fijar la capacidad de producción teniendo en cuenta las posibles las necesidades a cubrir.

Se toman los requisitos exigidos por el peticionario como las consideraciones iniciales para iniciar el estudio de la planta desaladora de agua de mar, ya que se ha de encontrar el lugar que cumpla con todas las condiciones planteadas.

6.2. Situación y emplazamiento

La elección del emplazamiento de la planta desaladora es esencial, debido a que es imprescindible situarla en el lugar más idóneo para aprovechar de manera más eficiente los

recursos disminuyendo la necesidad de recursos energéticos de la instalación. Esto quiere decir que debemos de tener en cuenta las condiciones más favorables para la obtención tanto del recurso hídrico como del eólico.

Optimizando el aprovechamiento de los recursos también se consigue consumir una cantidad menor de energía por metro cúbico desalado, alcanzando un menor consumo específico de la instalación. Este aspecto de especial interés en el caso de estudio del proyecto ya que el recurso energético es renovable y tiene ciertas limitaciones, como por ejemplo la escasez energética en las horas valle de dicho recurso. Con un consumo menor de la planta se minimiza el riesgo de sufrir problemas de abastecimiento energético por parte de la instalación de energías renovables, a la vez que en las horas punta habría un mayor sobrante de energía que se podría introducir a la red y conseguir un reducir la factura del costo energético.

Teniendo en cuenta los aspectos comentados anteriormente, se señalan a continuación las premisas seguidas para la elección de la localización de la EDAM:

- Debe de tener necesidades de recursos hídricos convencionales.
- Disponibilidad de recurso hídrico no convencional y de recursos eólico.
- Debe localizarse lo más cercano a la costa posible con el fin de disminuir al máximo los consumos.
- Debe de respetar el Plan de Ordenación Territorial de la zona de locación.
- Debe de respetar las leyes referentes a la protección de espacios naturales.
- Necesidad de una localización con una separación respecto a zonas urbanas, para disminuir al máximo las alteraciones para la población en temas como el referente al ruido.

Planteados los requisitos que debe de cumplir el emplazamiento donde se sigue la planta desaladora, comenzamos con la elección del mismo.

Primeramente hemos decidido situar nuestra planta desaladora en la isla de Tenerife ya que cumple con las condiciones de falta de recurso hídrico convencional y disponibilidad

Estudio de un sistema de desalación alimentado mediante energía eólica

de recurso eólico y recurso hídrico no convencional. Una vez tomada esta decisión el siguiente paso que se sigue es la búsqueda de las zonas con mayores necesidades hídricas de todo el territorio insular. Para ello se hace uso de los diagramas que se presentan a continuación.

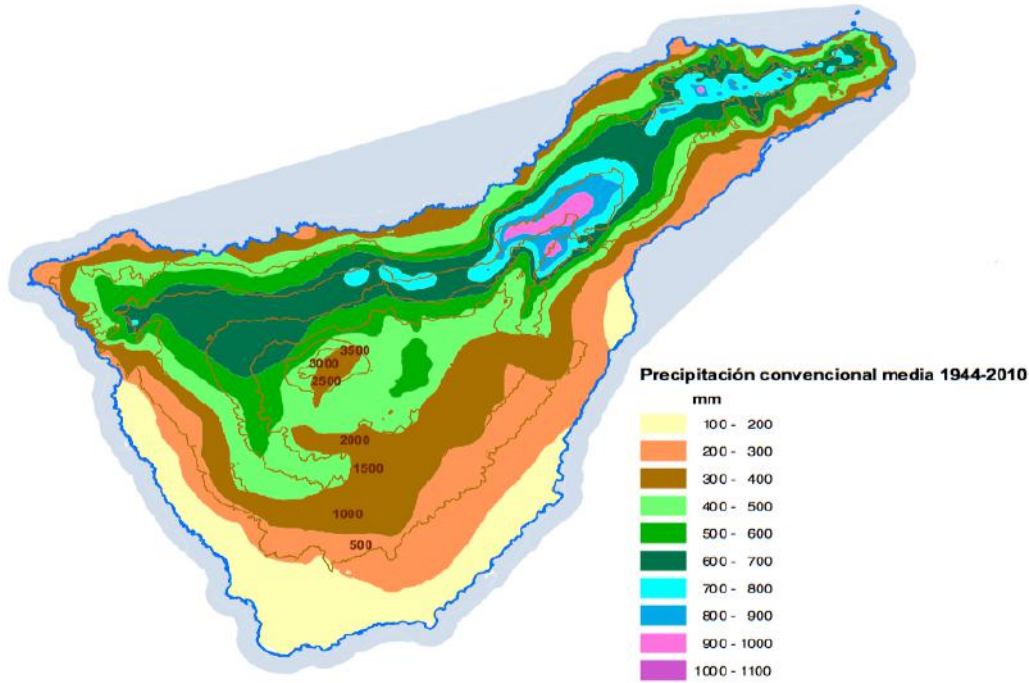


Figura 39. Precipitación convencional media entre los años 1944- 2010 (PHT).

Como se puede observar, la figura anterior muestra datos de la precipitación convencional media que se ha dado en la isla en las últimas décadas. Se aprecia que la zona de la isla más afectada por la escasez de precipitaciones la vertiente sur de la misma con unas precipitaciones que en algunos casos se encuentran por debajo de los 100 mm anuales. Además de ello, y a pesar de que en otras zonas de la isla las precipitaciones tengan un valor bastante más elevado, el estado de las masas de aguas subterráneas no es bueno como se puede observar en la siguiente figura.

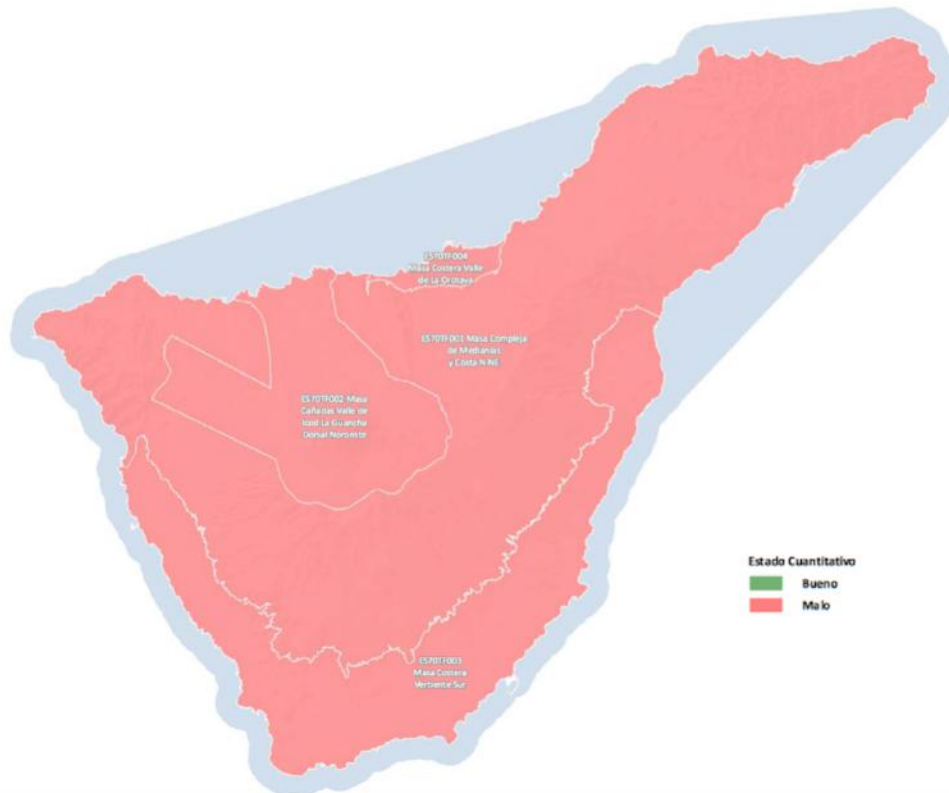


Figura 40. Estado cuantitativo de las masas de aguas subterráneas (PHT).

Este mal estado general de las masas de agua subterráneas, es debido a una sobreexplotación de los acuíferos que posee la isla, los cuales han disminuido su capacidad en las últimas décadas. Además, el problema también reside en el cambio de la forma en la que se producen las precipitaciones, esto es debido a que a medida que pasan los años como consecuencia de procesos como el cambio climático se produce unos cambios climatológicos más adversos. Como consecuencia de ello, se producen con más frecuencia menos días de lluvias pero mayor número de tormentas lo que perjudica la filtración de las aguas al subsuelo debido a la imposibilidad debido a la velocidad con la que se produce su paso por la superficie. Es por este motivo, que a pesar de que en muchos casos precipitan la misma cantidad de agua, no se renuevan las aguas subterráneas con la velocidad que debieran.

Una vez comprobadas las necesidades hídricas de la distintas zonas de la isla de Tenerife, se observa que la zona sur de la misma parece el lugar más factible para la instalación de la planta desaladora. Con el fin de comprobar la viabilidad del proyecto en

dicha zona, se pasa a realizar la comprobación de la coexistencia o no del recurso eólico suficiente para abastecer las necesidades energéticas de la EDAM.

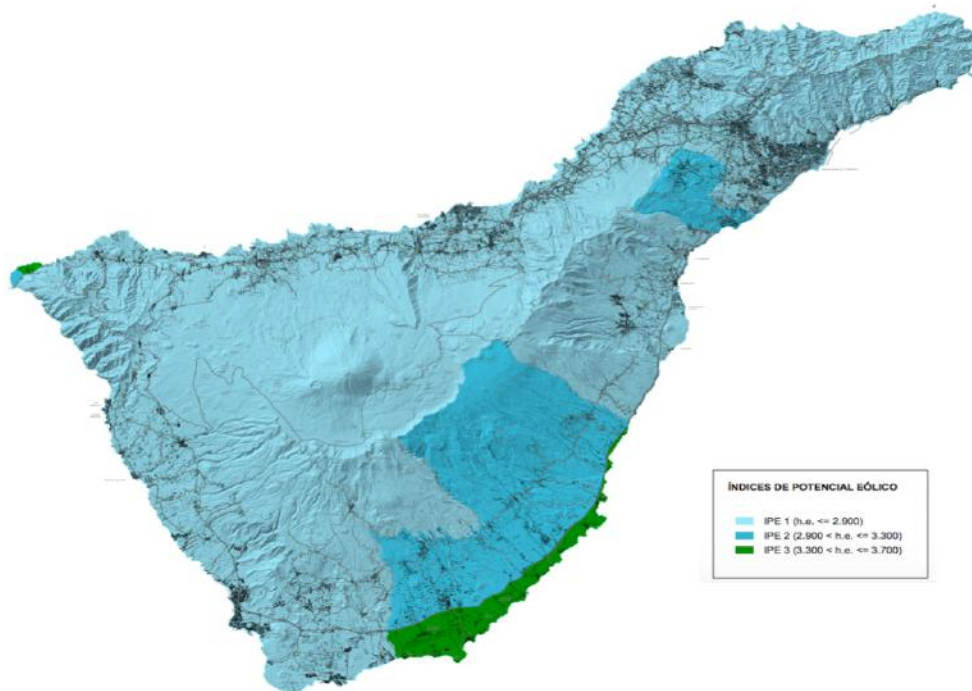


Figura 41. Índices de potencia eólico en Tenerife (PIOT, 2011).

A tenor de los datos expuestos en la figura anterior se observa en que existen dos zonas con el índice de potencial eólico más alto en la isla, siendo estas las más adecuadas para el aprovechamiento del propio recurso con unas horas equivalentes de entre 3300 y 3700. Estas zonas son la punta de Teno, en el noroeste de la isla, y la zona sureste comprendida entre el municipio de Fasnia y el núcleo urbano de Los Abrigos, en el municipio de Granadilla de Abona.

De las zonas dos zonas comentadas se suprime la zona de Teno debido a que no cumple con los requisitos deseados. Este lugar se encuentra prácticamente deshabitado y además, el transporte y suministro de agua desde la planta al núcleo de población más cercano (caserío de Teno o el municipio de Buenavista del Norte) conllevaría multitud de gastos. Además de ello la zona está declarada como Parque Rural imposibilitando la viabilidad de nuestro proyecto.

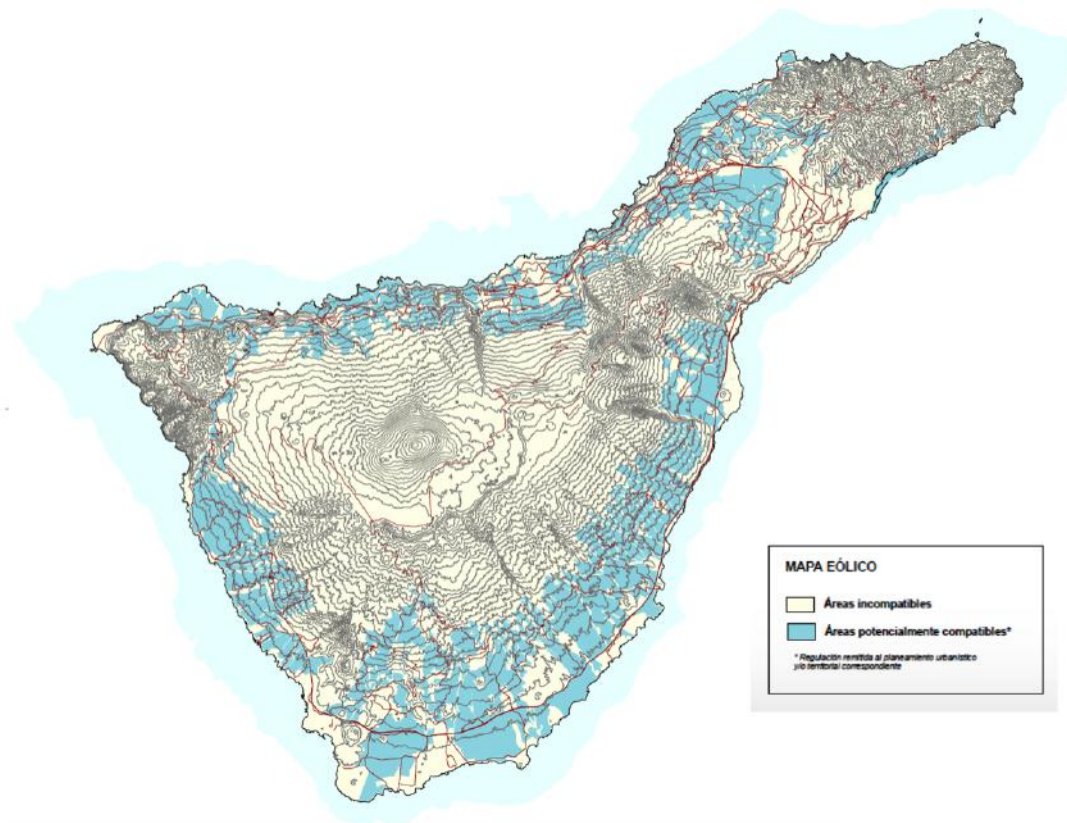


Figura 42. Mapa eólico de Tenerife, zonas de compatibilidad e incompatibilidad (PIOT, 2011)

Analizando el mapa anterior, el cual está regulado por el planteamiento urbanístico y territorial, se consigue acotar aún más la ubicación de la planta ya que en el mismo se clasifican las zonas compatibles e incompatibles. Como se puede observar, la mayoría de zonas del litoral sur de la isla, clasificadas anteriormente con potencial eólico 3, son compatibles, con lo cual podrías ubicar nuestra EDAM en prácticamente cualquier zona del litoral sur de Tenerife. Por tanto la zona acotada, la cual cumple hasta ahora con los requisitos comentados, para ubicar nuestro proyecto se extiende desde el municipio de Fasnia hasta el núcleo urbano de Los Abrigos, en el municipio de Granadilla de Abona.

Seguidamente, para acotar más aún la búsqueda de la localización y terminar eligiendo la más idónea para la planta se han de tener en cuenta otros parámetros. Para ello se han escogido indicadores de crecimiento tanto de población como de empleo, ya que ligado a ellos hay un aumento del consumo de recursos hídricos que unido a la necesidad de los mismos crea un desequilibrio que se puede solventar en buena medida con la producción de agua desalada.

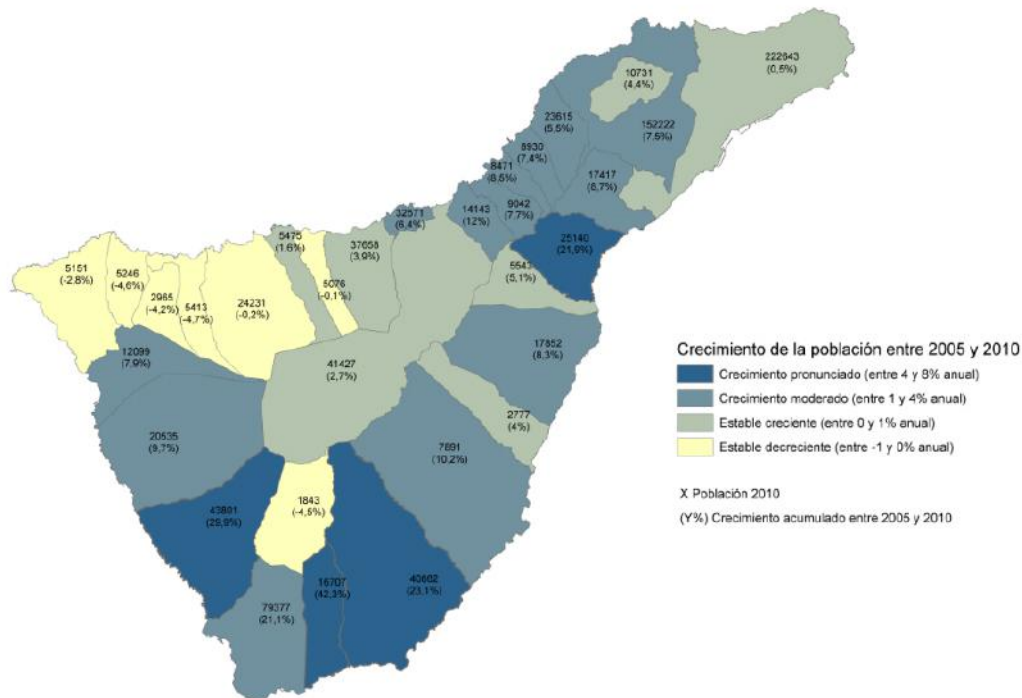


Figura 43. Población y crecimiento de la misma en los distintos municipios de Tenerife. Elaboración a partir de los datos de ISTAC (PHT).

Analizando la figura anterior, se puede ver como el municipio con mayor crecimiento de población en los últimos años que está dentro de los posibles candidatos a albergar la ubicación de la planta desaladora es el municipio de Granadilla de Abona con un crecimiento del 23,1 % entre los años 2005 y 2010. Este aumento de población tan pronunciado en los últimos años, hace que el consumo de recursos hídricos destinados al sector poblacional también aumente de manera notable.

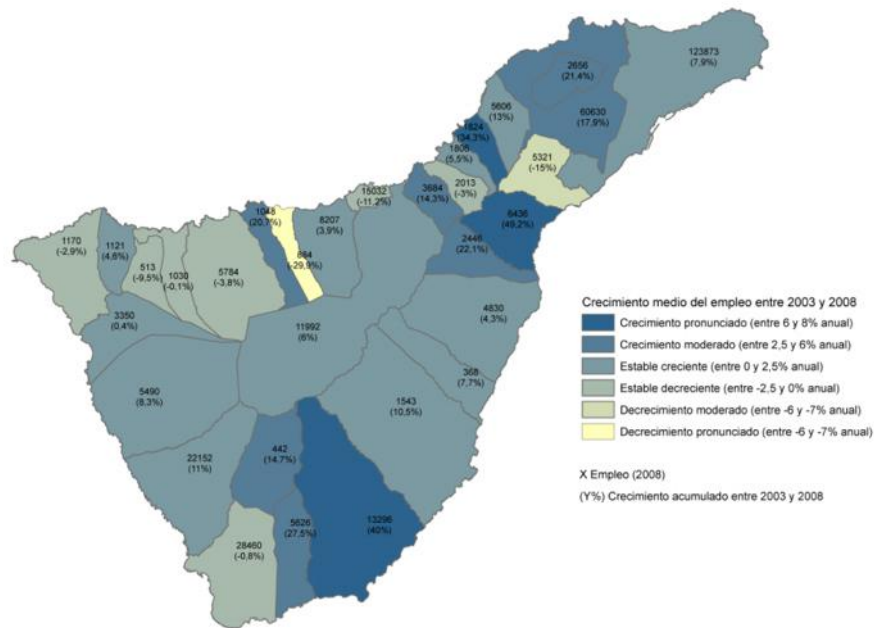


Figura 44. Empleo total en 2008 y crecimiento del mismo entre los años 2003 y 2008 en media anual y total acumulado. Elaboración a partir de datos de la EPA.

Además de ello, como se puede observar en la figura X, en dicha población también es en la que el crecimiento del empleo es más elevado alcanzado un 40 % entre los años 2005 y 2008. Esto hace que además del consumo para el sector poblacional también crezca la demanda de recursos hídricos en otros sectores como el referente a servicios, agricultura e industria.

Como resultado de la recolección de datos comentados, se ha seleccionado el municipio de Granadilla de Abona como lugar para albergar la planta desaladora bajo estudio en el presente proyecto. Esta decisión se ha tomado debido a que el municipio reúne todos los requisitos necesarios para la instalación de la EDAM, presentando necesidad de recursos hídricos y existencia de recursos energéticos renovables, además de que se espera un aumento del consumo en el mismo como resultado del crecimiento de la población y del empleo.

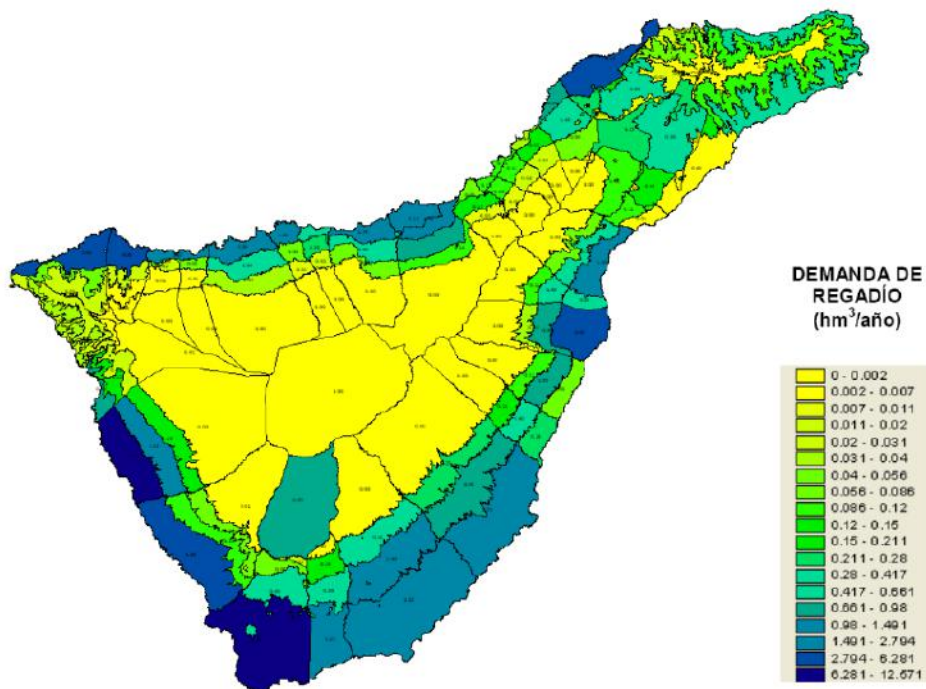


Figura 45. Demanda de regadío en Tenerife (PHT).

Además, observando la figura anterior en la cual se puede comprobar que la demanda de regadío en las zonas más costeras de Granadilla de Abona es relativamente alta, se ha decidido que el agua producida en la planta desaladora vaya destinada a un consumo agrícola ya que los recursos hídricos convencionales para este sector en el municipio resultan insuficientes para cumplir con la demanda del mismo. Debido a ello se han producido problemas en los últimos años en el abastecimiento de agua para regadíos en épocas de sequía, lo que ha derivado en numerosas pérdidas de cultivo y a su vez económicas. No obstante, debido a que el permeado obtenido en la planta es de una calidad excelente, como se verá en el Anexo I, se puede destinar si las necesidades lo requieren a consumo humano.

Para finalizar con la elección del emplazamiento, una vez elegido el municipio donde localizaremos la instalación y el uso que le dará al agua desalada, se ha de elegir una ubicación más exacta para el mismo. Para ello dicho lugar se debe situar en un punto lo más cercano posible al mar y al punto de abastecimiento, manteniendo una distancia prudencial con la población y respetando las zonas naturales protegidas. Todo ello para reducir al

mínimo tanto el consumo de la instalación como el impacto que produciría la construcción de la misma.

Teniendo en cuenta las premisas anteriores, lo primero que se debe comprobar es la existencia de espacios naturales protegidos en la zona.

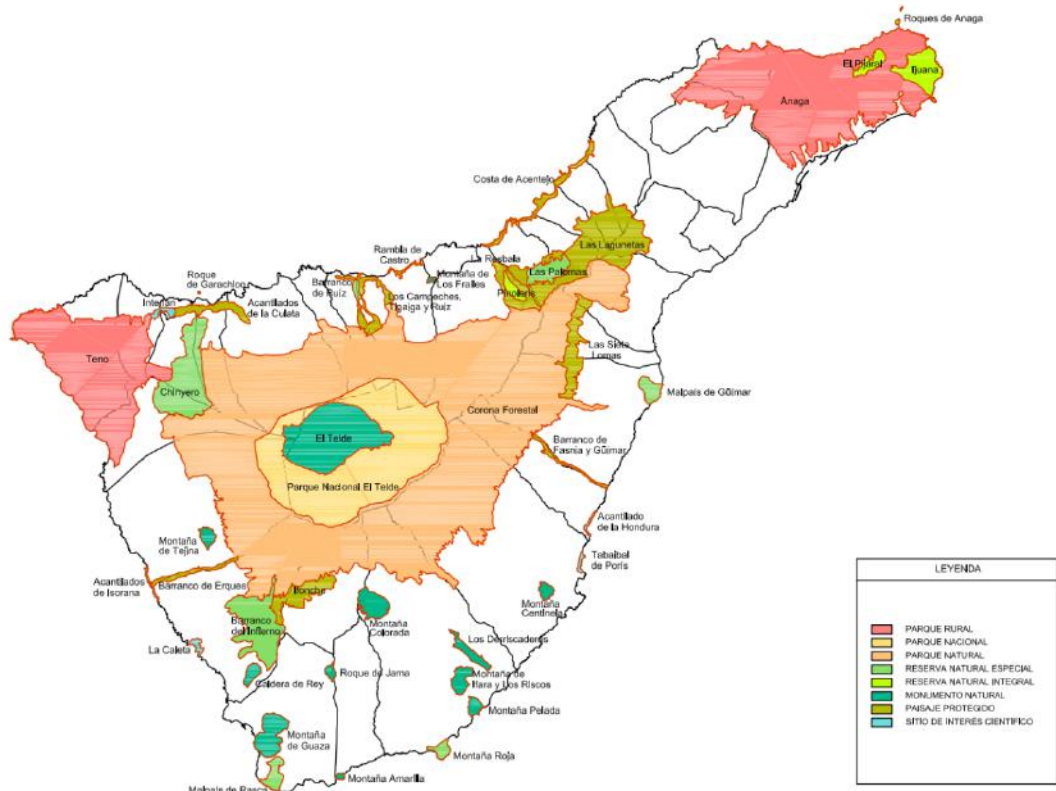


Figura 46. Espacios naturales protegidos en la isla de Tenerife (PIOT, 2011).

Como se puede observar en la figura anterior, los espacios naturales que afectan a la elección de la ubicación son básicamente dos, ya que son los únicos cercanos al océano que se encuentran en nuestro municipio: Montaña Roja en el Médano (Reserva Natural Integral) y Montaña Pelada (Monumento Natural).

Finalmente para concluir con la elección de la ubicación de la planta desaladora, se prosigue evaluando el Modelo de Regulación Territorial con el fin de encontrar un lugar en el que se posibilite la construcción de la instalación. Para ello se ha hecho uso de la herramienta Visor del Garfean, en la que se muestra la ordenación del territorio. Con el fin de acotar la búsqueda, se ha fijado como áreas posibles las cercanas al océano, zonas

industriales, posibles zonas de abastecimiento y que además tuvieran la condición de urbanizables y las dimensiones necesarias para albergar nuestra desaladora.

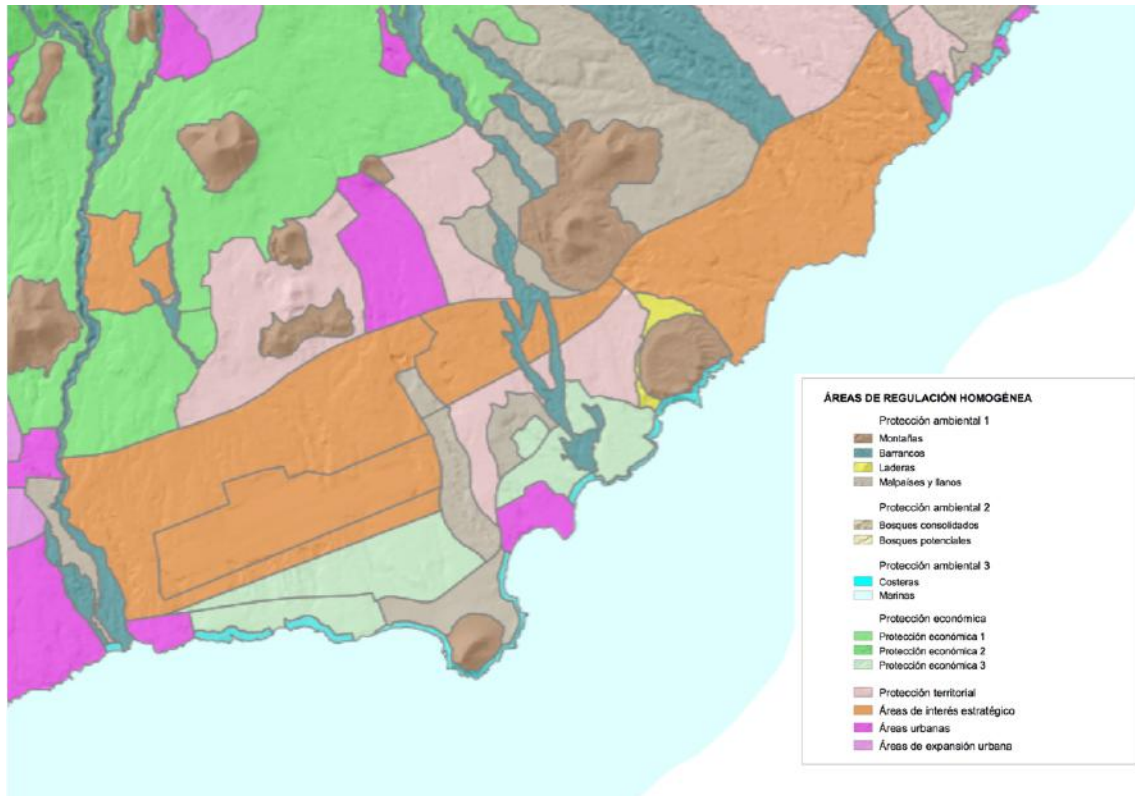


Figura 47. Usos del suelo (PIOT, 2011).

A partir de la figura anterior se observa que en el municipio de Granadilla de Abona hay dos grandes zonas de interés estratégico, que coinciden con el Aeropuerto Tenerife Sur (situado a la izquierda) y el Polígono Industrial de Granadilla (a la derecha). Dichas zonas son zonas de carácter industrial, con la obvia falta de zonas de cultivos cercanos en ellas por lo que las descartamos las dos por ello y porque no podemos situar los aerogeneradores demasiado cerca del aeropuerto por razones evidentes.

Finalmente, se opta por la elección para la búsqueda de la ubicación de la EDAM las zonas de protección económicas tres, debido a que en ellas se compagina el uso del suelo con carácter agrícola y urbano. De todas los puntos de este tipo, se ha elegido la zona situado debajo del aeropuerto, dentro de la cual se debe elegir espacios con carácter urbanizable.



Figura 48. Ordenación del territorio en la zona de estudio (Grafcan).

A partir de la herramienta online del Grafcan se puede observar la categorización del terreno, a partir de la cual se determina que solo hay una zona que reúne las condiciones de cercanía al mar, carácter urbanizable y dimensiones suficientes, dentro de la cual se ha encontrado parcela que se muestra a continuación.



Figura 49. Parcela elegida para la ubicación de la planta desaladora.

La ubicación se ha establecido en la parcela anterior ya que la misma cumple todos los requisitos exigidos al inicio del apartado. En primer lugar se encuentra en una zona en la que coincide la necesidad de recurso hídrico con la disponibilidad del recurso eólico necesario para poder abastecer a través del mismo a nuestra planta. Además se encuentra en una zona que está cercana tanto al océano, para realizar la captación con el menor consumo de energía posible, como a las zonas a la cuales se va a abastecer de agua ya que se encuentra rodeados de cultivos. Por último se encuentra en una zona urbanizable, manteniendo una distancia prudencial a la población más cercana y alejada de espacios naturales evitando de esa manera los mayores impactos derivadas de la construcción de la misma.

Seguidamente se muestran la referencia catastral de la parcela elegida, en la cual se nos indican tanto la ubicación exacta como las dimensiones de la misma.

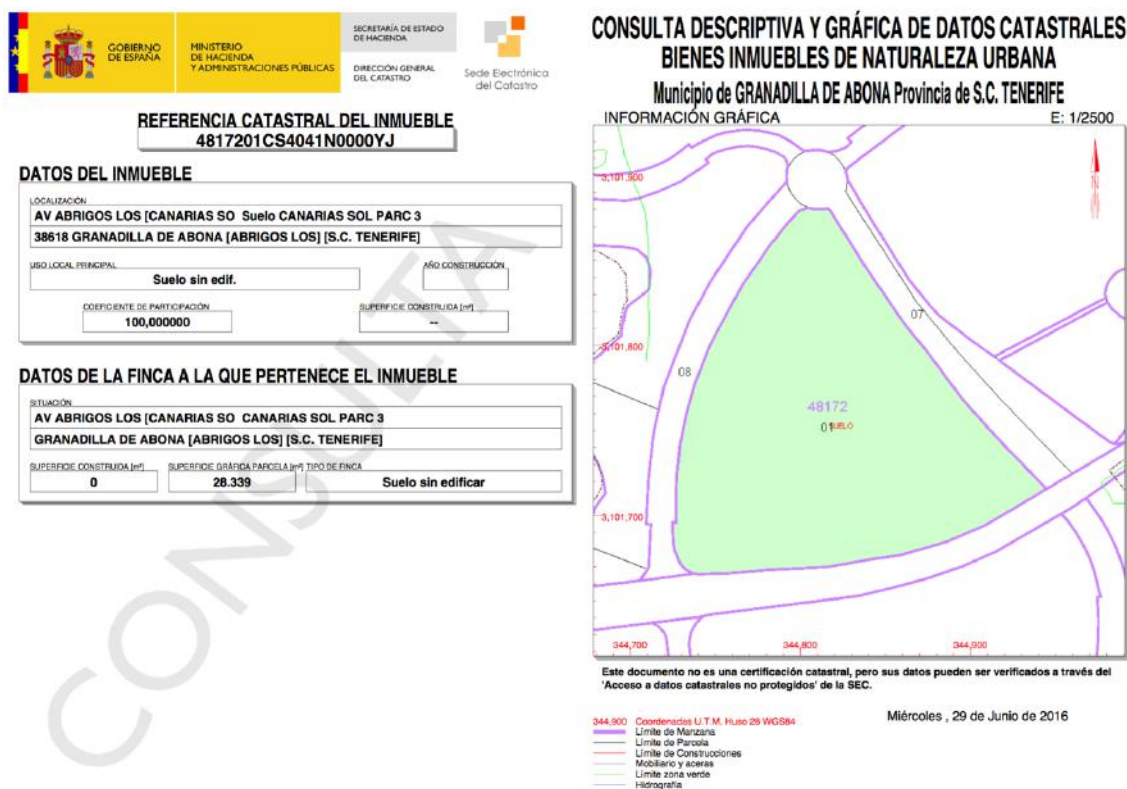


Figura 50. Referencia catastral de la parcela elegida.

Como se puede observar es una parcela situada en la avenida de Los Abrigos (Granadilla de Abona) con una superficie de unos 28.339 metros cuadrados, espacio más que suficiente para situar nuestra estación desaladora y la instalación eólica sin problemas de espacio. Además se puede incluir una reserva de espacio con el fin de afrontar posibles ampliaciones en el futuro.

6.3. Capacidad de la planta

Esta instalación desaladora pretende servir como apoyo, para cubrir el consumo de agua del sector agrícola del municipio donde está implantada la misma. Para determinar la capacidad de la misma se ha tenido en cuenta únicamente el consumo que tendría el cultivo de tomate que es el más extendido en la zona.

Con el fin de determinar el consumo de dicho cultivo, se ha buscado la información de las necesidades hídricas del mismo. A partir de algunos artículos extraídos de la web de Agricultura y Desarrollo Rural de Tenerife (Agrocabildo), se ha obtenido que dichas necesidades están en torno a los 5000 m³/ha*año.

Seguidamente se han calculado el número de hectáreas destinadas al cultivo del tomate que hay en el municipio de Granadilla de Abona. Debido a la imposibilidad de contacto con el Ayuntamiento para poder obtener datos de mayor fiabilidad, se ha llevado el recuento con ayuda de la herramienta online del Grafcan. A través de la misma se indican las zonas destinadas a la plantación de diferentes cultivos, entre los que se encuentra el tomate, y además ofrece una herramienta con la cual se pueden medir áreas directamente sobre el mapa.

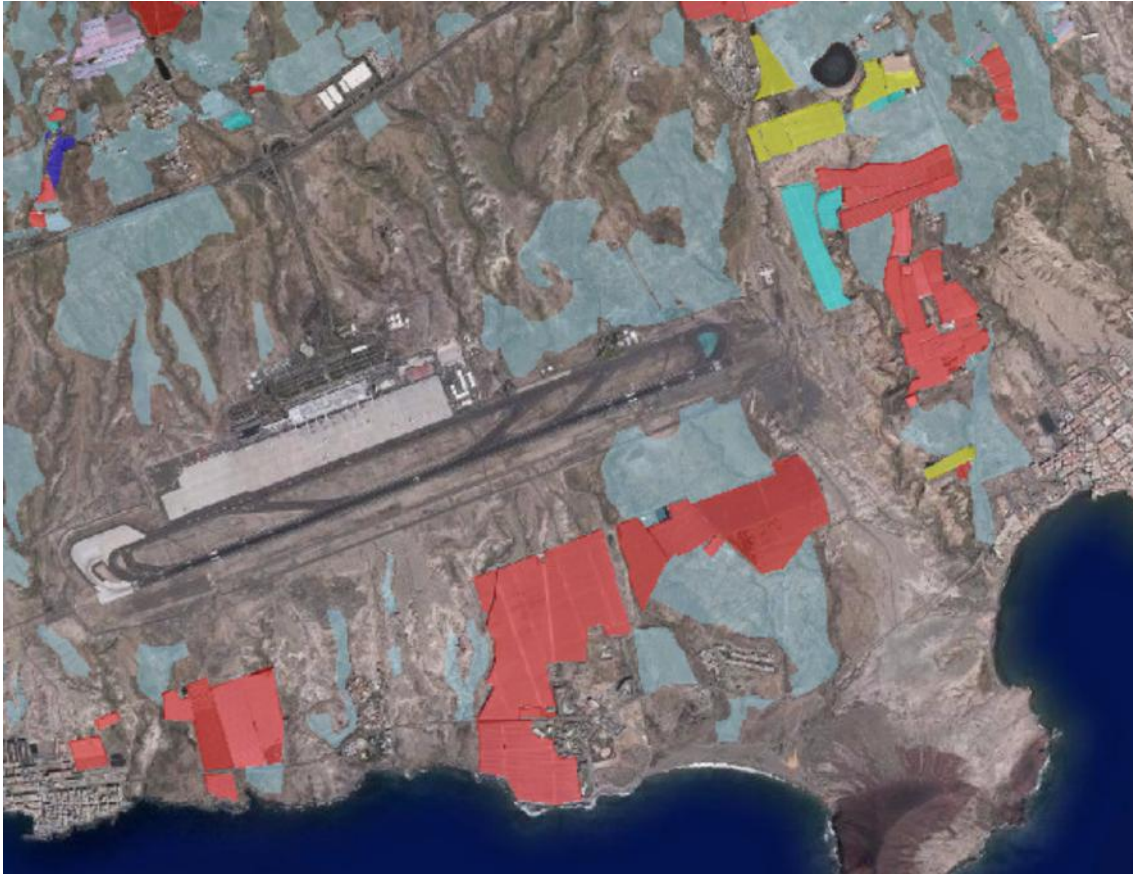


Figura 51. Mapas de cultivos en los alrededores del aeropuerto Tenerife Sur (en rojo el cultivo de tomate).

Haciendo uso de ambas utilidades hemos obtenido una cantidad aproximada de unas 290 hectáreas destinadas a la plantación de tomate a lo largo de todo el municipio.

Teniendo en cuenta la superficie de plantación obtenida y las necesidades hídricas del tomate (similares a las del resto de hortalizas), se calcula la producción diaria que tendría la planta desaladora bajo estudio. Para ello lo primero que se ha de hacer es calcular las necesidades hídricas diarias del tomate a partir de las anuales.

$$\text{Necesidades hídricas diarias del tomate} = 5000 \frac{\text{m}^3}{\text{ha} * \text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}}$$

$$\text{Necesidades hídricas diarias del tomate} = 13,69 \frac{\text{m}^3}{\text{ha} * \text{día}}$$

Una vez calculado el valor de las necesidades hídricas diarias de cada hectárea de plantación de tomate, se relaciona el mismo con el número de hectáreas y se obtiene la producción de permeado diario que ha de tener la planta desaladora.

$$\text{Producción diaria EDAM} = 13,69 \frac{m^3}{ha * día} * 290 ha$$

$$\text{Producción diaria EDAM} = 3970,1 \frac{m^3}{día}$$

Como se pueda observar a través de las operaciones anteriores, el consumo diario de la planta debería de ser de unos 4000 metros cúbicos al día para hacer frente a la demanda de las plantaciones de tomate. Además del resultado anterior, se debe tener en cuenta que los cultivos necesitan mayores necesidades hídricas dependiendo de la época del año en la que se encuentren, debido a este motivo y a la posibilidad de dar apoyo a las necesidades de recursos hídricos de cualquier otro tipo de cultivo se ha decidido sobredimensionar la planta. Como consecuencia del aumento de la capacidad de producción estimada para la desaladora, se ha fijado la misma en 4500 metros cúbicos día destinados al sector agrícola del municipio.

6.4. Temperatura del agua

A la hora de realiza el diseño de una planta desaladora, como la que se está estudiando, es imprescindible tener en cuenta la temperatura del agua ya que posee una importante influencia en el funcionamiento de las membranas de ósmosis inversa debido a los siguientes motivos:

- La solubilidad de determinadas sales aumenta con la temperatura y por tanto a temperaturas más elevadas se reducen riesgos de precipitación.

- Influye en la viscosidad del agua y en la dilatación de los materiales que constituyen las membranas, por lo que hay que tener en cuenta las variaciones de temperatura a lo largo del año.
- El aumento de temperatura favorece la actividad biológica de los microorganismos que ocasionan el enjuiciamiento de las membranas.

Los datos de temperatura, del agua del sur de Tenerife, que se muestran a continuación se han obtenido a través de la base de datos de la página web de Puertos del Estado. En las siguientes figuras se muestran las temperaturas máximas y mínimas por mes, así como las medias.

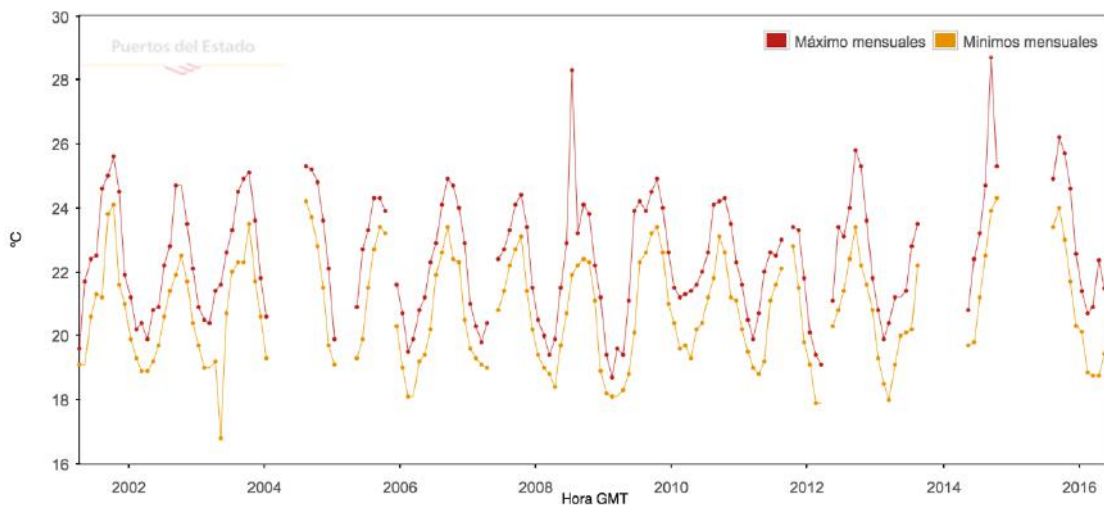


Figura 52. Datos de temperaturas máximas y mínimas por mes obtenidas por la boya de Tenerife Sur (Puertos del Estado).

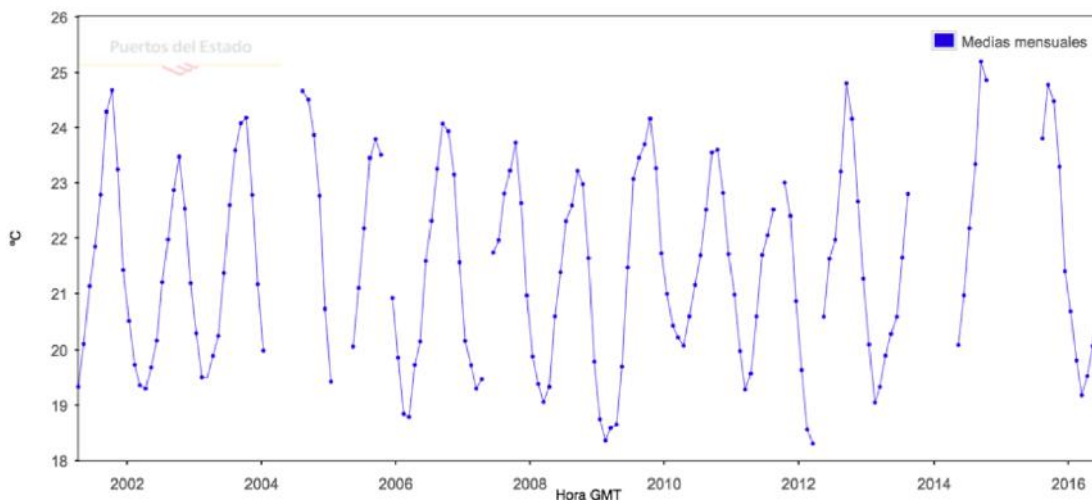


Figura 53. Datos de temperaturas medias por mes obtenidas por la boya de Tenerife Sur (Puertos del Estado).

Como puede observarse en las figuras anteriores, la temperatura del agua del sur de Tenerife se encuentra en un intervalo comprendido entre los 18°C y los 25°C. Por tanto, tomaremos un valor de temperatura del agua de mar para el municipio de Granadilla de Abona de 20°C. Este valor lo hemos escogido tan bajo dentro del intervalo de temperaturas, debido a que cuanto más bajo sea el valor de la temperatura del agua más viscosidad tiene la misma y por tanto mayor presión habría que aplicar a la entrada de las membranas, lo que se traduce en un mayor consumo específico. Es por este motivo que se elige un valor relativamente bajo, con el fin de situarse en el peor caso desde el punto de vista energético.

6.5. Composición del agua de alimentación

Antes de realizar el diseño de una instalación desaladora se debe de realizar un estudio previo del agua de mar de alimentación con el fin de conocer la composición de la misma. Esto se debe de hacer ya que dependiendo de dicha composición se han de modificar algunos aspectos como la presión de entrada de las membranas, el tiempo necesario para realizar los lavados o la sustitución de las mismas, la necesidad de realizar diferentes tratamientos, etc.

La composición del agua que se ha usado en el proyecto, ha sido cedida por la compañía que regenta la Desaladora de Santa Cruz de Tenerife la cual está situada a aproximadamente 70 kilómetros de distancia con respecto a la ubicación de la desaladora bajo estudio. Dado que es el dato más fiable y cercano del que se dispone, se usará dicha composición para el estudio del núcleo de desalación del presente proyecto.

Composición agua de mar	
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 7. Composición química del agua de mar de alimentación.

Además de los valores de los iones que se muestran en la tabla anterior, se añaden también el valor de los siguientes caracteres físico- químicos también a tener en cuenta a la hora de llevar a cabo el diseño de la instalación.

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

Tabla 8. Parámetros físico-químicos de importancia del agua de mar de alimentación.

7. Análisis de soluciones

En este apartado de la memoria se analizarán cada una de las opciones analizadas para el diseño de los distintos sistemas de la planta desaladora y la solución por la cual se ha optado.

7.1. Pretratamiento

El pretratamiento a usar en las plantas desaladoras es de vital importancia ya que del mismo dependen muchos factores como, por ejemplo, la vida útil de las membranas. Es por ello que se ha de elegir un pretratamiento adecuado a las condiciones del agua de alimentación.

En este caso se tendrán en cuenta tanto el pretratamiento físico a usar como el pretratamiento químico.

7.1.1. Pretratamiento físico

Para la elección de este tipo de pretratamiento se ha de tener en cuenta las exigencias de los fabricantes de membranas, los cuales especifican que se debe hacer una filtración mínima de 5 μm . Por ello se ha decidido instalar un filtro de cartuchos con mayor capacidad de filtración (1 μm), con el objetivo de mejorar el funcionamiento y la eficiencia de la matriz de membranas.

Para sobre la selección del filtro se ha usado el mismo programa que para la selección de las membranas, el Winflows del fabricante General Electric. Además, se han tenido en cuenta los siguientes requisitos de diseño:

- Se han tomado únicamente en consideración los filtros cuya capacidad de filtración fuera de 1 μm .
- Se ha elegido un modelo del cual no se tuvieran que instalar un gran número.
- Se han tenido en cuenta que las pérdidas de carga en el mismo no supusieran una gran caída de presión.

Teniendo en cuenta las consideraciones diseño se ha elegido el filtro HFZ01 del cual se instalaran 31 unidades teniendo una pérdida de presión por filtro de 0,01 bar, como se puede ver en la figura siguiente.

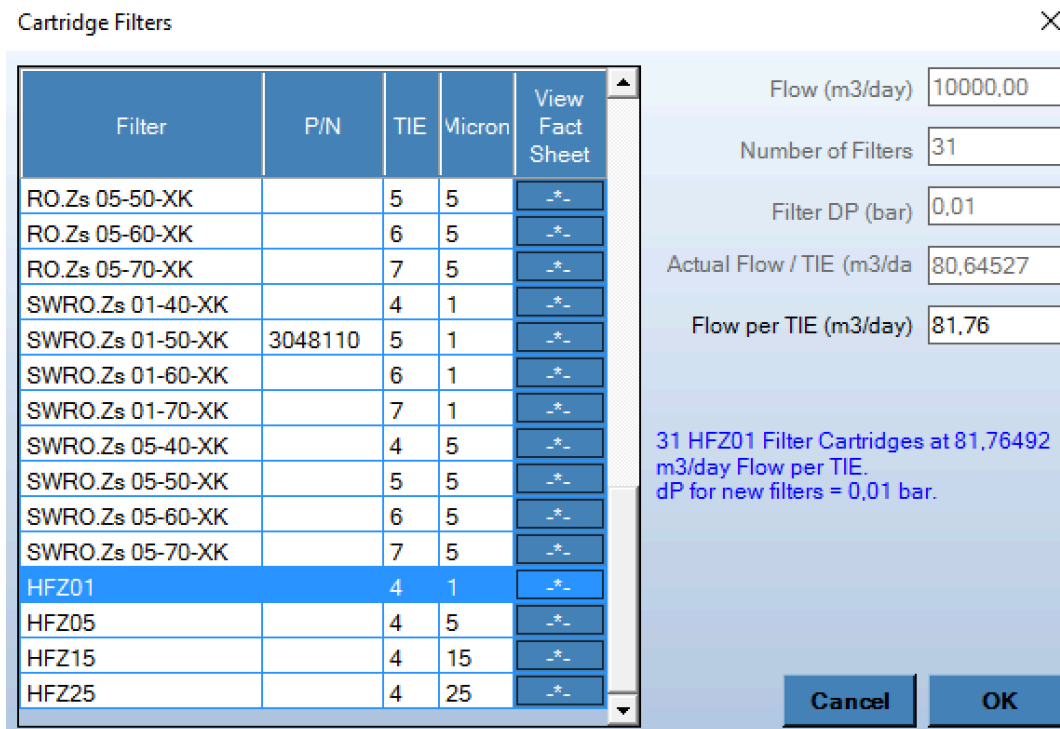


Figura 54. Interfaz de selección de filtro de cartucho Winflows.

Cabe destacar que además del pretratamiento físico, introducido a través de los filtros de cartuchos seleccionados, habría que añadir más pretratamientos de este tipo como la instalación de filtros de arena, pero solo se ha centrado la elección en los pretratamientos que nos da la posibilidad el Winflows.

7.1.2. Pretratamiento químico

El agua de mar que se introduce en la planta desaladora a través de los pozos de captación posee una composición química no apropiada para enviar directamente hasta las membranas. Es por este motivo que se le aplican a dicho agua diferentes tratamientos químicos antes de su entrada en las membranas.

En el caso bajo estudio, se usará la dosificación de ácido sulfúrico (H₂SO₄) antes del filtro de cartucho con el objetivo de producir una acidificación del agua de mar desde un pH de 8 hasta 5,5. Esto se hace, debido a que de esta manera se dificultan las incrustaciones sobre las membranas evitando la precipitación de CaCO₃ sobre las mismas.

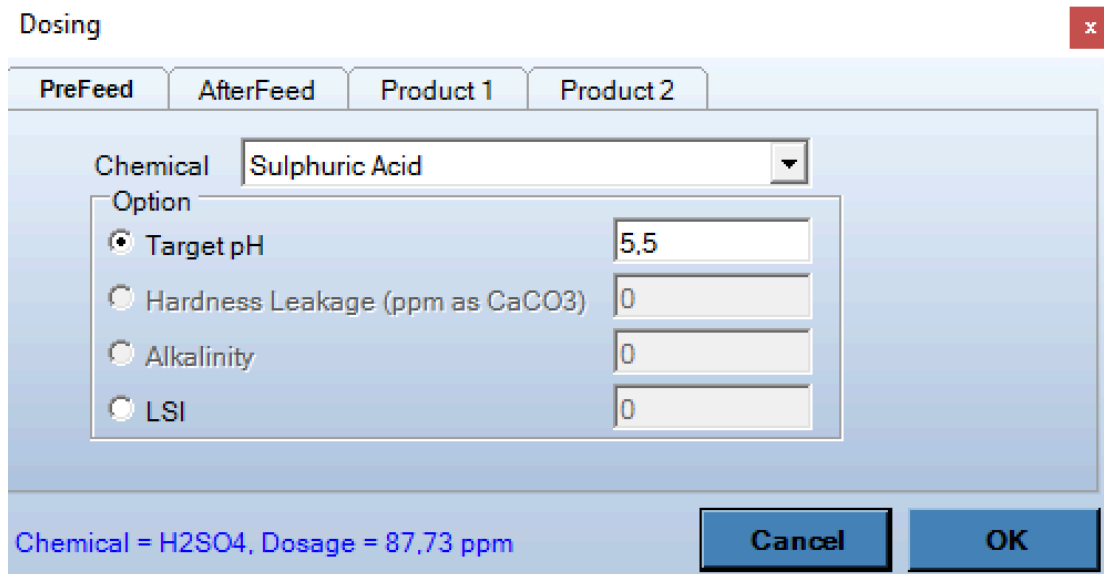


Figura 55. Interfaz de elección del pretratamiento Winflows.

En la figura anterior se puede observar que la cantidad de dosis de ácido sulfúrico a inyectar antes de la alimentación es de 87,73 ppm, alcanzando un valor de pH de 5,5.

7.2. Selección de las membranas de ósmosis inversa

El primer sistema a dimensionar es la matriz de membranas de ósmosis inversa, debido a que el resto de parámetros de la planta dependen de la configuración elegida para las mismas.

Los principales fabricantes de membranas del mercado son Hydranautics, General Electric, Dow Filmtec y Toray, los cuales poseen programas de dimensionado de las mismas. En el presente proyecto se ha elegido el programa ofrecido por General Electric, el Winflows, para realizar los cálculos y las simulaciones necesarias para dimensionar el núcleo de membranas de ósmosis inversa. Dicho software es un programa de simulación de fácil uso a través del cual se pueden diseñar rápidamente desde los sistemas más simples hasta los más complejos sin dificultad.

Cabe destacar que la mejor opción para encontrar las membranas que mejor se adaptan a los requisitos de diseño que se tienen en la planta de desalación bajo estudio, *Estudio de un sistema de desalación alimentado mediante energía eólica*

sería realizar simulaciones en cada uno de los distintos programas ofrecidos por los fabricantes y realizar una comparación con los resultados obtenidos con el fin de elegir la mejor opción. En este caso no se ha seguido dicho procedimiento debido al tiempo limitado que se ha tenido para la elaboración del trabajo.

Una vez, se ha definido el programa a usar para dimensionar el núcleo de membranas se prosigue con la introducción de los datos de temperatura y composición del agua de alimentación.

Primeramente, se hace una determinación de la temperatura media del agua de alimentación a partir de los datos ofrecidos por la página web de Puertos del Estado.

Boya de Tenerife Sur 1998 - 2016				
Mes	Tª mín. (°C)	Año	Tª máx. (°C)	Año
Enero	18,2	2009	21,6	2011
Febrero	17,9	2012	21,2	2010
Marzo	17,9	2012	21,3	2010
Abril	18,3	2009	22,4	2016
Mayo	16,8	2003	22	2011
Junio	19,7	2002	23,9	2009
Julio	20,2	2013	28,3	2008
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	22,9	2006

Tabla 9. Datos de temperatura Boya de Tenerife Sur 1998-2016 (Puertos del Estado).

Estos datos se pueden ver reflejados en la tabla anterior, a partir de los cuales se obtiene la temperaturas medias tanto mínima (19,53 °C) como máxima (23,99°C). Si se realiza una media de las temperaturas anteriores se obtiene aproximadamente un valor de 22 °C, pero en el caso de estudio se ha seleccionado una un poco más baja debido a los siguientes motivos:

- Con el fin de situarse en un peor caso desde el punto de vista energético, debido a que cuanto más bajo sea el valor de la temperatura del agua más viscosidad tiene la misma y por tanto mayor presión habría que aplicar a la entrada de las membranas, lo que se traduce en un mayor consumo.
- El agua de alimentación de la planta desaladora se obtendrá a partir de pozos de captación, como se comenta en el Anexo II, y los datos de temperatura ofrecimos por Puertos del Estado son referidos a la superficie del mar, con lo cual serán más bajos y estables en el caso de estudio.

Por tanto, la temperatura seleccionada en este caso para la realización del estudio es de 20 °C.

Seguidamente, se ha obtenido la composición del agua de mar a partir de un análisis realizado en Santa Cruz de Tenerife cedido por la Desaladora de Santa Cruz de Tenerife. Esta composición ha sido escogida por ser la más detallada y cercana a la ubicación de la planta de desalación bajo estudio.

Obtenidos los datos de composición y temperatura del agua de alimentación se introducen en el programa de dimensionado de membranas como se puede ver en la figura siguiente.

Water Type

Select Water Source: Sea Wellwater
 Select Water Type: User Defined

Ion	mg/l	meq/l	ppm as CaCO3
Calcium (Ca)	431,00	21,5081	1076,34
Magnesium (Mg)	1470,00	120,9628	6053,40
Sodium (Na)	11870,00	516,3115	25838,03
Potassium (K)	451,00	11,5351	577,26
Ammonia - N (NH4)	0,00	0,0000	0,00
Barium (Ba)	0,00	0,0000	0,00
Strontium (Sr)	10,00	0,2283	11,42
Iron (Fe)	0,00	0,0000	0,00
Manganese (Mn)	0,00	0,0000	0,00
Total Cations	14232,00	670,5457	33556,45
Sulfate (SO4)	3148,00	65,5396	3279,83
Chloride (Cl)	21364,27	602,6082	30156,62
Fluoride (F)	0,00	0,0000	0,00
Nitrate (NO3)	0,00	0,0000	0,00
Bromide (Br)	0,00	0,0000	0,00
Phosphate (PO4)	0,00	0,0000	0,00
Boron (B)	5,00	0,0386	1,93
Silica (SiO2)	1,00	0,0003	0,01
Hydrogen Sulfide (H2S)	0,00	0,0000	0,00
Bicarbonate (HCO3)	139,45	2,2854	114,37
Carbon Dioxide (CO2)	0,90	0,0000	0,00
Carbonate (CO3)	2,18	0,0727	3,64
Total Anions	24659,90	670,5457	33556,45

Parameters

Total Alkalinity (ppm CaCO3): 120,00
 TDS (mg/l): 38891,90
 pH: 8,00
 Temperature (C): 20,00
 SDI: 4,00
 Recovery (%): 45

Saturation Data (Feed Water)

BaSO4: 0,00 %
 CaF2: 0,00 %
 CaSO4: 24,90 %
 SiO2: 0,79 %
 SrSO4: 22,57 %
 Struvite: 0,000 %
 LSI: 0,53
 Stiff-Davis Index: 0,06
 Osmotic Pressure: 27,68 bar
 Conductivity at 25C: 56294 μS/cm
 Density: 1025,4 kg/m3

Note :- Alkalinity is user-input
 Execute 'Balance' button first. If required, click on 'Add Sodium/Chloride'

Figura 56. Interfaz de introducción de datos de composición del agua de alimentación Winflows.

El siguiente paso a seguir es la introducción del caudal de permeado que se quiere que tenga la planta, que en el caso de estudio es de 4500 m3/día, y el factor de conversión que tendrá la misma. Este último parámetro se ha fijado en un valor del 45% teniendo en cuenta los valores típicos que poseen instalaciones de similares características y los datos ofrecidos por los libros mencionados en la bibliografía.

Además se ha de elegir el número de etapas que tendrá el núcleo de desalación. Éstas son cada una de las unidades de producción que son alimentadas de una fuente única (bomba de alta presión). Es decir, un conjunto de tubos de presión y membranas situadas en paralelo y alimentadas por una bomba constituye una etapa.

Generalmente, en las EDAM se suelen usar configuraciones del núcleo de desalación con una sola etapa aunque en ocasiones se aumenta el número de etapas con el fin de aumentar el rendimiento de la instalación, pudiéndose llegar a factores de conversión de en

torno al 50 %. Sin embargo, como al pasar el agua de alimentación de una membrana a otra, se va incrementando su salinidad y el rechazo de sales de la membrana no varía, con lo que aumenta el flujo de sales y empeora la calidad del agua. Es decir, que al aumentar el número de etapas empeora la calidad del agua producto.

Teniendo en cuenta los aspectos negativos y positivos que tiene el aumentar el número de etapas, se ha decidido escoger la configuración de una sola etapa debido a los siguientes motivos:

- Mejor calidad del flujo de permeado.
- Mayor sencillez en el diseño.
- Menor número de elementos, lo que se traduce en un menor mantenimiento y menor posibilidad de fallo.

Para la configuración elegida el programa muestra el siguiente esquema representativo de la misma:

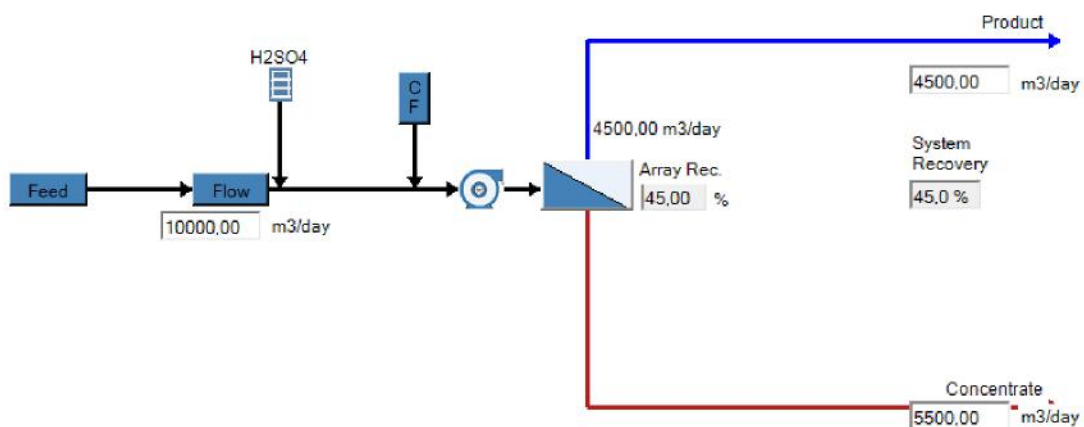


Figura 57. Esquema del núcleo de desalación que muestra el Winflows.

Como se puede observar en la figura anterior aparece el esquema de la configuración elegida, en el cual quedan reflejados los caudales de los diferentes flujos que recorren la instalación y el pretratamiento elegido que será objeto de estudio en el apartado 5.1 de la presente memoria.

Una vez seleccionada la configuración y los principales parámetros de diseño de la planta, se pasa a la elección del tipo de membranas que serán instaladas en la misma. Para ello se hace uso del catálogo que ofrece el programa Winflows, en el cual se muestran una amplia gama de opciones.

En primer lugar, se selecciona la aplicación a la que estará destinada la membrana, que en este caso es la desalación de agua de mar. Seguidamente se ha de elegir entre las series de membranas que se muestran a continuación:

AD Series

High Rejection Seawater RO Elements

AE HR Series

High Rejection Low Energy Seawater RO Elements

Figura 58. Series de membranas específicas para agua de mar (Winflows).

Ambas series están destinadas a la desalación de agua de mar, pero en este caso debido a que el objetivo principal es tener el menor consumo específico, se elige la serie AE HR de baja energía dentro de la cual se presentan los siguientes modelos.

Model
AE-90
AE-400, 34
AE-440

Figura 59. Modelos ofrecidos en la serie AE HR (Winflows).

Además General Electric, nos ofrece los siguientes datos tanto de dimensiones como de funcionamiento de cada tipo de membrana:

Model	Average permeate flow (m ³ /day)	Average NaCl rejection	Minimum NaCl rejection	Minimum Boron Rejection	Active Area (m ²)	Outer wrap	Diámetro (inches)
AE - 90	7,6	99,80%	99,30%	90,00%	8,40	Fiberglass	3,9
AE-400,34	34,1	99,80%	99,30%	90,00%	37,20	Fiberglass	7,9
AE - 440	37,5	99,80%	99,30%	90,00%	40,90	Fiberglass	7,9

Tabla 10. Datos de relevancia de los modelos de membrana de la serie AE HR (Winflows).

Además de los datos anteriores específicos para cada modelo de la serie, en el catálogo de la misma se nos muestran los parámetros de funcionamiento globales para toda la serie AE HR. Éstos se pueden observar en la siguiente figura.

Typical Operating Pressure	800psi (5,516kPa)
Typical Operating Flux	7-11GFD (12-19LMH)
Maximum Operating Pressure	1,200psi (8,274kPa)
Maximum Temperature	Continuous operation: 122°F (50°C) Clean-In-Place (CIP): 122°F (50°C)
pH range	Optimum rejection pH: 7.0-7.5, Continuous operation: 4.0-11.0, Clean-In-Place (CIP): 2.0-11.5
Maximum Pressure Drop	Over an element: 12 psi (83 kPa) Per housing: 50 psi (345 kPa)
Chlorine Tolerance	1,000+ ppm-hours, dechlorination recommended
Feedwater³	NTU < 1 SDI < 5

Figura 60. Parámetros de funcionamiento típicos de las membranas de la serie AE HR (Winflows).

Se han tenido en cuenta únicamente las membranas de ocho pulgadas de diámetro, que son las de uso típico en las plantas desaladoras de agua de mar. Teniendo en cuenta este requisito dimensional, se descartaran las membranas del tipo AE-90 ya que tienen un diámetro inferior.

Una vez definidas las membranas sobre las que se va a realizar el estudio, se pasa a dictaminar el número aproximado de membranas que se deberían colocar dependiendo del modelo. Para ello se han seguido dos procedimientos diferentes teniendo en cuenta los datos que se recogen en las tablas y figuras anteriores.

El primero de ellos consiste en el cálculo del número de membranas teniendo en cuenta el flujo medio de permeado por membrana (Average permeate flow). Para ello, se ha de dividir el caudal de permeado total entre el flujo medio de permeado por membrana, conociendo de esta manera el número de ellas que habría que colocar.

Llevando a cabo dicho procedimiento se obtienen tanto el número de membranas como el número de tubos de presión, considerando configuraciones de 6 y 7 membranas cada uno de ellos.

Modelo	Flujo medio de permeado (m³/día)	Número de membranas	Nº tubos de presión (6 membranas)	Nº tubos de presión (7 membranas)
AE-400,34	34,1	132	22	19
AE-440	37,5	120	20	17

Tabla 11. Número de membranas y tubos de presión calculados según primer procedimiento usado.

Los valores que se muestran en la tabla anterior son los obtenidos por el primer procedimiento explicado, para cada uno de los modelos de membranas bajo estudio.

En este caso, introduciendo los datos de las distintas configuraciones de membranas calculadas, se obtienen numerosos errores que hacen inviable las mismas. En todos los casos el programa hace referencia a errores de exceso tanto de flujo como de presión en algunos elementos como se puede observar en la Figura 60, con lo cual este procedimiento para el cálculo aproximado de las membranas será descartado ya que aporta unos valores que no son aceptables para el correcto funcionamiento de la instalación.

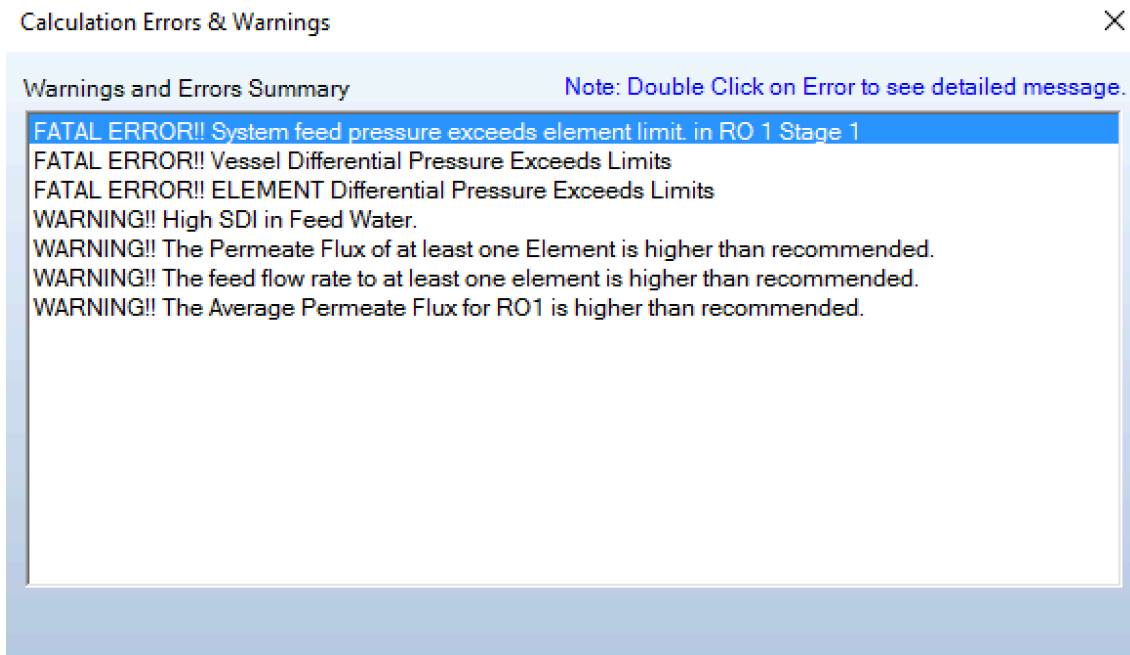


Figura 61. Interfaz de errores obtenidos a partir del primer procedimiento (Winflows).

El segundo procedimiento consiste en el cálculo del número de membranas a través del flujo de funcionamiento típico (Typical Operating Flux) que aparece en el catálogo de la serie AE HR. El mismo viene fijado en un intervalo que va da desde 12-19 LMH ($\frac{l}{m^2 \cdot h}$), como se muestra en la Figura 59.

Para realizar el cálculo se escogerá un valor medio del intervalo que se ofrece del flujo de funcionamiento típico de 15 LMH. Seguidamente, se cambian las unidades en las que esta expresada la producción de permeado de la planta con el fin de relacionar la mismo con el valor de flujo de funcionamiento elegido. Este cambio de unidades es el que se muestra a continuación.

$$\text{Flujo de permeado} = 4500 \frac{m^3}{día} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} * \frac{1000 \text{ litros}}{1 m^3}$$

$$\text{Flujo de permeado} = 187500 \frac{l}{h}$$

Una vez que se tiene el flujo de permeado en las unidades correctas, se relaciona con el flujo típico de funcionamiento para obtener el área de membrana necesaria para llevar a cabo la desalación.

$$\text{Área de membrana necesaria} = \frac{\text{Flujo permeado}}{\text{Flujo típico funcionamiento}} = \frac{187500 \text{ l/h}}{15 \frac{\text{l}}{\text{m}^2 * \text{h}}}$$

$$\text{Área de membrana necesaria} = 12500 \text{ m}^2$$

El valor anterior indica los metros cuadrados de membrana necesarios para realizar el proceso de ósmosis inversa en las condiciones que se han fijado previamente con la elección del flujo típico. Relacionando esta área con la superficie activa de la cual dispone cada membrana (Tabla 12), se obtiene el número de membranas de cada modelo que se necesitan.

Además de ello, como en el caso del procedimiento anterior, se calculan el número de tubos de presión de 6 y 7 membranas por cada uno.

Modelo	Área (m ²)	Nº de membranas	Nº tubos de presión (6 membranas)	Nº tubos de presión (7 membranas)
AE-400,34	37,2	337	57	49
AE-440	40,9	306	51	44

Tabla 12. Número de membranas y tubos de presión calculados según primer procedimiento usado.

En vista de los resultados anteriores, se ha decidido centrar el estudio sobre las membranas del modelo AE-440 debido al menor número de tubos de presión que obtenemos con las mismas. Esto es debido a que cuanto menor número de tubos de presión que se tengan, menor será el bastidor que tiene que sustentar a los mismos disminuyendo el su tamaño y facilitando de esta manera las tareas de mantenimiento u otras que se deban realizar sobre los mismos.

Seguidamente las configuraciones obtenidas para el modelo de membrana elegido, se introducen en el programa de dimensionado Winflows con el fin de comprobar la existencia o no de errores que puedan afectar al normal funcionamiento del núcleo de desalación.

Como se puede observar en las figuras siguientes, mediante la simulación con las configuraciones seleccionadas no aparece ningún tipo de error con lo cual se dará como bueno el procedimiento de cálculo del número de membranas.

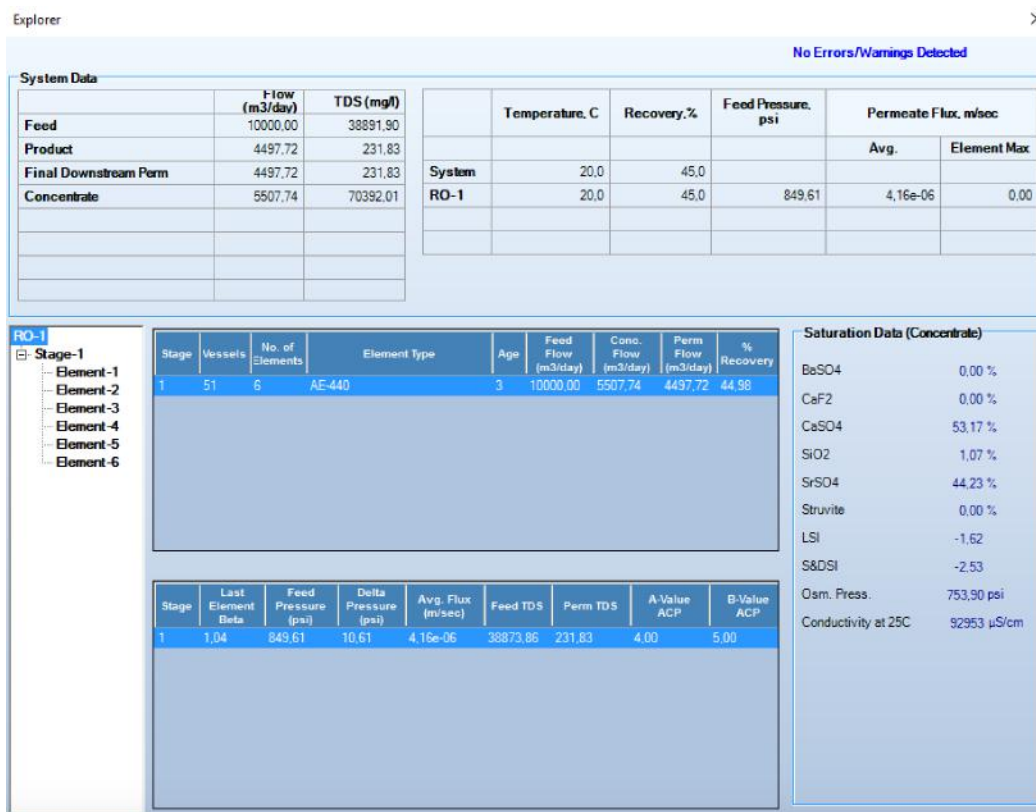


Figura 62. Valores obtenidos para la configuración de 51 tubos de presión de 6 membranas cada uno.

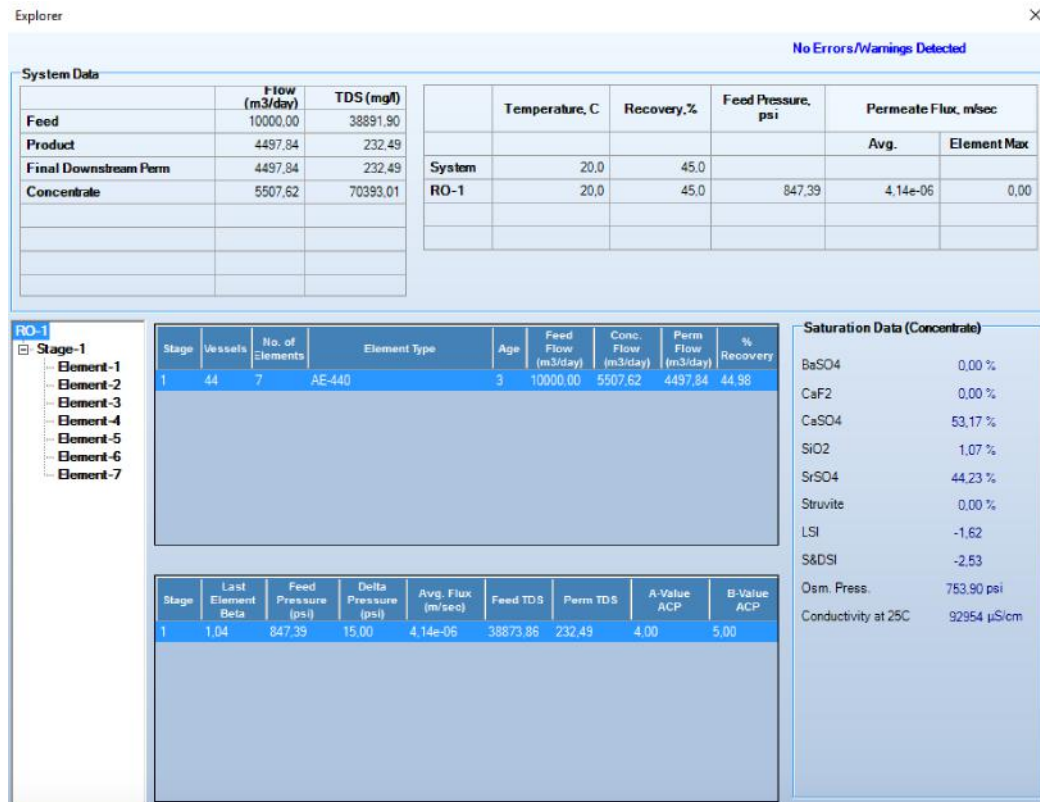


Figura 63. Valores obtenidos para la configuración de 44 tubos de presión de 7 membranas cada uno.

Los resultados obtenidos indican que tanto la configuración de siete como la de seis membranas por tubo de presión son posibles, con lo cual se debe elegir entre ambas. En este caso, siguiendo el criterio de selección usado para la elección del modelo de membrana, se optará por la configuración a partir de la cual se obtenga un menor número de elementos de presión por los motivos anteriormente explicados. Es por este motivo que se ha elegido la configuración de siete membranas por tubo de presión.

Para acabar con la elección y el dimensionado de las membranas que formarán parte del núcleo de desalación de la instalación bajo estudio, se realizará una comparación de la configuración elegida variando el número de tubos de presión. Los resultados obtenidos, de las distintas simulaciones son los que se muestran a continuación.

Nº de tubos de presión	TDS (mg/L)	Presión de alimentación (psi)	Consumo específico (kWh/m ³)
40	210,88	870,81	3,70
44	232,49	847,39	3,61

50	265,2	821,28	3,50
----	-------	--------	------

Tabla 13. Comparación entre distintas configuraciones de membranas según número de tubos de presión.

En la tabla de valores anterior se han comparado los valores obtenidos para el TDS, la presión de alimentación de las membranas y el consumo específico obtenido para el núcleo de desalación considerando una eficiencia de la bomba de alta presión del 100%, para distintas configuraciones de tubos de presión de siete membranas cada uno.

Como se puede observar, los valores de los distintos parámetros tienen una variación poco significativa a pesar del cambio en el número de tubos de presión. En líneas generales a medida que se añaden tubos de presión aumenta el valor de TDS y disminuyen los valores de presión y en consecuencia también desciende el consumo específico del núcleo de desalación. En cambio, cuando se disminuye el número de tubos de presión sucede todo lo contrario.

Finalmente en vista de los datos ofrecidos por las diferentes simulaciones realizadas, se ha escogido la configuración de 44 tubos de presión de 7 membranas de modelo AE-440 cada uno. Esta configuración se ha elegido debido a que ofrece unos valores de composición de agua bastante buenos y además aporta un consumo específico bastante bajo, como se puede observar en los Anexos 1 y 4 respectivamente.

7.3. Selección del sistema de recuperación de energía

7.3.1. Comparación entre distintos sistemas de recuperación de energía

Para realizar la elección del sistema de recuperación se compararon tres tipos diferentes con el fin de elegir con el que se tuviera un menor consumo específico. Los sistemas sobre los que realizó la comparación son los que se muestran a continuación:

- Turbo-charger
- Turbina Pelton
- Intercambiador de presión

Para llevar a cabo la comparación se ha hecho uso del software Winflows, el cual nos da la posibilidad de incluir distintos sistemas de recuperación de energía a la hora de realizar las simulaciones, con el fin de conocer los consumos que se dan en el núcleo de desalación.

En este caso se han incluido los tres sistemas nombrados anteriormente sobre el núcleo de membranas calculado para la desaladora bajo estudio, con el fin de obtener los resultados más fiables posibles y de esta manera elegir el que mejor se adapte a las condiciones de funcionamiento establecidas.

Para la realización del estudio se ha supuesto un rendimiento de la bomba de alta presión del cien por cien, con el fin de que el mismo interfiera en la menor medida de lo posible en los resultados obtenidos. Además el parámetro que se tendrá en consideración para la elección del sistema de recuperación será el consumo específico que se obtenga en el núcleo de desalación.

Sistema de recuperación de energía	Consumo específico (kWh/m ³)
Sin recuperación de energía	3,61
Turbina Pelton	2,48
Turbo-charger	2,67
Intercambiador de presión	1,74

Tabla 14. Consumos específicos calculados para el núcleo de desalación incorporando diferentes sistemas de recuperación de energía.

Los datos extraídos del Winflows muestran claramente que el sistema de recuperación de energía que hace que el núcleo de desalación trabaje de manera más eficiente, es el intercambiador de presión. Por tanto, dicho sistema será el elegido para reducir el consumo de la planta desaladora.

7.3.2. Selección del intercambiador de presión

Con el fin de elegir el intercambiador de presión que ofreciera una mayor eficiencia se han consultado las páginas web de los principales fabricantes que son Energy Recovery y

Flowserve. Debido a la imposibilidad de entrar en contacto con el primero de ellos para obtener las credenciales necesarias con el fin de hacer uso de su programa de dimensionado de intercambiadores, se ha optado por la elección de los intercambiadores ofrecidos por Flowserve.

La empresa Flowserve cede una hoja Excel a partir de la cual se puede realizar el dimensionado de los intercambiadores así como el cálculo de la eficiencia de los mismos. Además de ello, nos indica el consumo aproximado de las bombas de captación, Booster y de alta presión, aunque únicamente el estudio se centrará en el intercambiador por lo tanto se obviarán estos resultados.

Para hacer uso de la hoja Excel ya comentadas se han de introducir los siguientes valores en la misma:

Flujo de permeado (m³/día)	4500
TDS producto (mg/L)	232,49
TDS alimentación (mg/L)	38891,9
Presión de alimentación de las membranas (bar)	58,426
Caída de presión en las membranas (bar)	1,03
Factor de conversión (%)	45

Tabla 15. Valores a introducir en la hoja de cálculo del intercambiador de presión.

Además de los datos anteriores, se han de introducir el número de intercambiadores que se instalarán obteniéndose los siguientes valores de eficiencia:

Nº de intercambiadores	Eficiencia
1	98,30%
2	98,10%
3	96,80%

Tabla 16. Rendimiento del intercambiador dependiendo de cantidad instalada.

Por tanto, en vista de los resultados obtenidos se elegirá el intercambiador de presión DWEER ofrecido la empresa Flowserve. Solo se instalará uno debido a la mayor eficiencia de esta configuración, llegando a un valor del 98,3 % de la misma.

Además, la hoja Excel ofrece a partir de la configuración seleccionada un diagrama representativo del funcionamiento del DWEER, el cual se puede observar en la figura 64. En el mismo, se muestran los parámetros de funcionamiento de los distintos elementos que componen el núcleo de desalación.

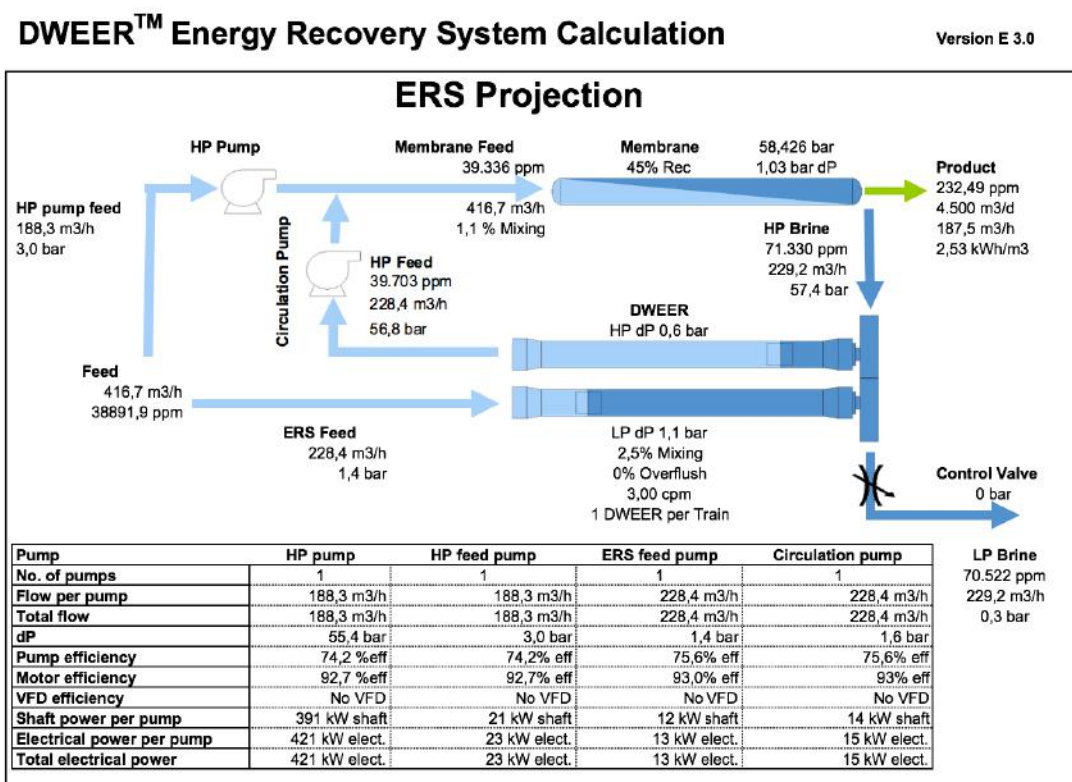


Figura 64. Esquema del núcleo de desalación ofrecido por la hoja Excel de Flowserve.

Por tanto, las características finales del sistema de recuperación de energía seleccionado son las siguientes:

Sistema de recuperación de energía	Intercambiador de trabajo
Fabricante	Flowserve

Modelo	DWEER
Unidades instaladas	1
Eficiencia	98,30 %

Tabla 17. Intercambiador de presión elegido.

7.4. Selección de la bomba booster

Para la elección de la bomba se debe conocer la temperatura a la que se encuentra el agua, la altura útil que tiene que aportar la misma, para lo cual se usan los datos ofrecidos por el configurador del sistema de recuperación de trabajo que se muestran en la Figura 63, y la densidad del agua de alimentación obtenida a través de la aplicación online de la Universidad de Michigan dispuesta para tal efecto que se muestra en el Anexo II.

Altura útil (m)	16,127
Caudal (m³/h)	228,4
Temperatura del agua (°C)	20

Tabla 18. Condiciones de funcionamiento de la bomba Booster.

Se ha hecho uso para la elección de la Booster las aplicaciones online de selección aportadas por los principales fabricantes del mercado. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para todos ellos:

Fabricante	Modelo	Rendimiento
Flowserve	2K6x4M-10HRV M3SM	83,40 %
KSB	Mega CPK	82,50 %
Lowara	NSCF 125- 250/110/P45VCC4	86,27 %
Grundfos	NB 80-160/161	74,90 %
Sulzer	BE 315-1525	85,65 %

Tabla 19. Modelos de bomba Booster comparados.

Para la elección de la bomba Booster, al igual que para la selección del resto que estén instaladas en la planta desaladora, se ha tenido en cuenta el rendimiento ofrecido por las mismas, escogiéndose la que tuviera más alto dicho parámetro de funcionamiento. Teniendo en cuenta esto y tomando los datos aportados por la tabla anterior se ha seleccionado el modelo de bomba NSCF 125-250/110/P45VCC4 del fabricante Lowara, la cual alcanza un rendimiento del 86,27 % como se puede observar en la siguiente figura donde se muestran las curvas características de la misma.

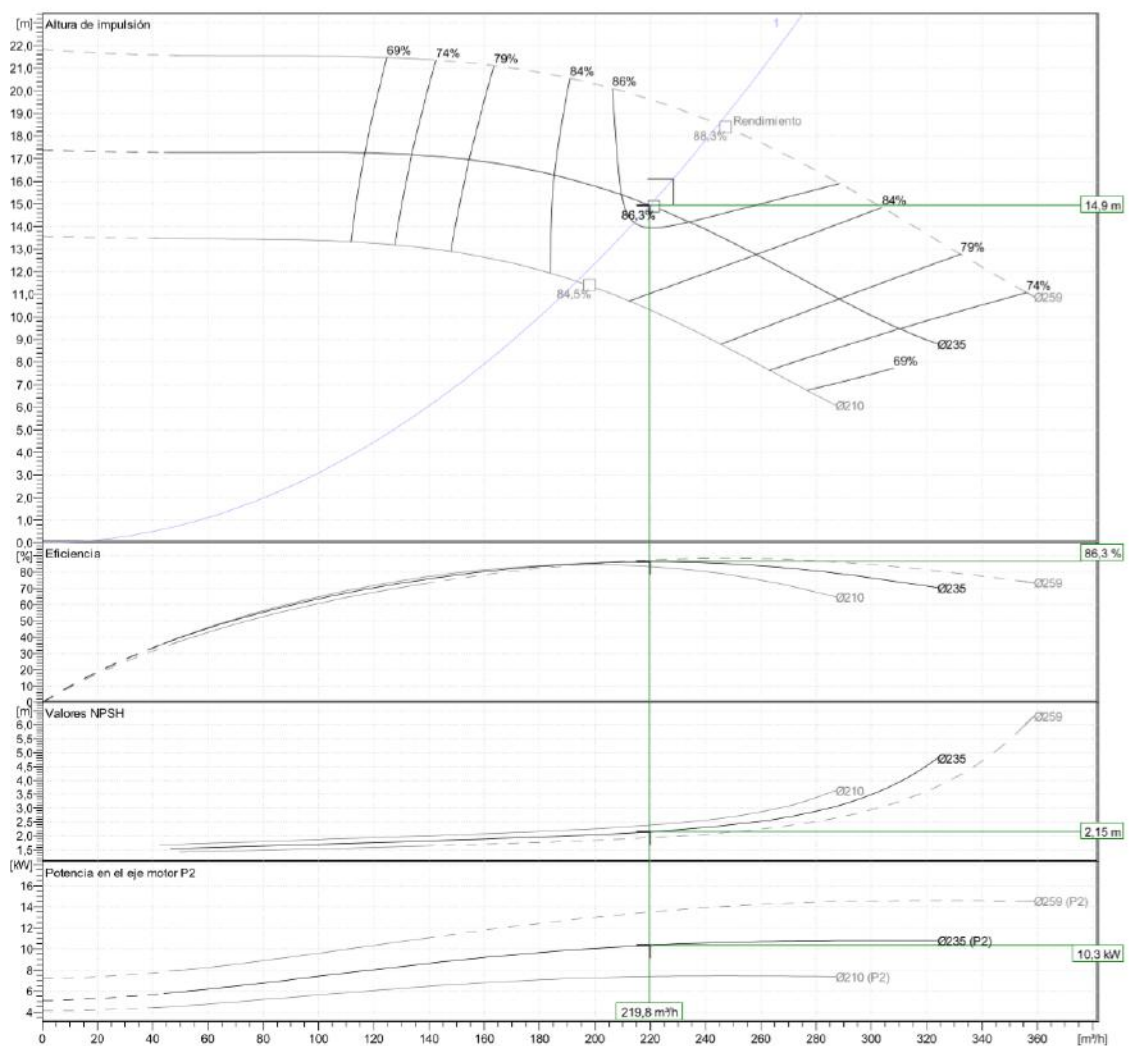


Figura 65. Curvas características de la bomba Booster elegida.

Las características principales de la bomba adoptada como solución en la selección de la bomba Booster se muestran a continuación.

Fabricante	Lowara
Denominación	NSCF 125-250/110/P45VCC4
Rendimiento	86,27 %
Potencia motor eléctrico	11 kW

Tabla 20. Bomba Booster elegida.

Cabe destacar, que se instalará dos unidades de este modelo de bomba. Una de ellos destinada al funcionamiento continuo y la otra de reserva, con el objetivo de evitar largas paradas de la instalación en caso de avería o mantenimiento de este dispositivo.

7.5. Selección de la bomba de alta presión

Para la selección de la bomba de alta presión que se instalará en la planta desaladora bajo estudio en el presente proyecto, se han de conocer los siguientes valores:

- La altura útil de la bomba, la cual calculamos suponiendo una presión de entrada a la misma de tres bares para evitar problemas de cavitación, asegurando de esta manera poseer el $NPSH_r$ por los distintos modelos. Además, la presión de salida de la bomba ha de coincidir con la presión que nos indica el Winflows que ha de tener el fluido a la entrada al núcleo de membranas.
- El caudal que circula por la bomba, el cual se obtiene a través de los datos ofrecidos por el configurador del intercambiador de trabajo.
- La temperatura del agua de alimentación.

El valor de los diferentes parámetros comentados para la bomba de alta presión, es el que se muestra en la siguiente tabla:

Altura útil (m)	549,733
Caudal (m³/h)	188,3
Temperatura del agua (°C)	20

Tabla 21. Condiciones de funcionamiento de la bomba de alta presión.

A través de la introducción de los datos anteriores en los distintos seleccionadores de bombas ofrecidos por los principales fabricantes se obtienen los siguientes modelos:

Fabricante	Modelo	Rendimiento
Flowserve	3X11WXH-HC	78,20 %
KSB	Multitec CA 100-8.1	76,70 %
Lowara	MPE 125.1/6	74,96 %
Grundfos	-	-
Sulzer	MD 150-360 (D)(Dd)	80,70 %

Tabla 22. Modelos de bomba de alta presión comparados.

En vista de los resultados aportados por las distintas herramientas online de los fabricantes y tomando las mismas consideraciones a la hora de la selección que en el de la bomba Booster, se ha seleccionado la bomba MD 150-360 (D)(Dd) de Sulzer. Se ha tomado esta decisión ya que es la que mayor rendimiento que tiene, alcanzando un valor del mismo de 80,70 % como se puede observar en la figura siguiente.

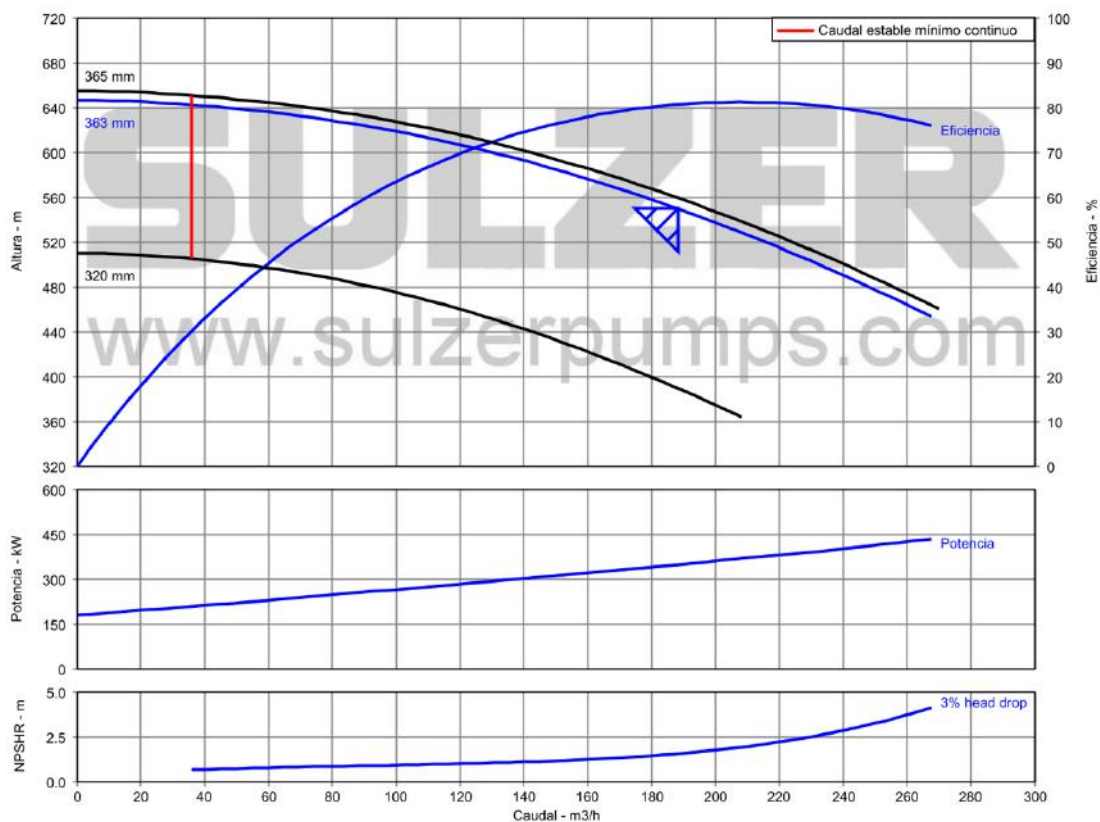


Figura 66. Curvas características de la bomba de alta presión elegida.

Las características principales de la bomba adoptada como solución en la selección de la bomba de alta presión son las siguientes:

Fabricante	Sulzer
Denominación	MD 150-360 (D)(Dd)
Rendimiento	80,70 %
Potencia motor eléctrico	375 kW

Tabla 23. Bomba de alta presión elegida.

Al igual que en el caso de la Booster, se instalarán dos unidades del modelo de bomba de alta presión elegido con el fin de evitar paradas de la instalación como consecuencia de averías o mantenimientos.

7.6. Selección de la bomba de captación

Para la selección de la bomba de captación se ha de tener en cuenta que se elegirá una bomba sumergible, especialmente diseñada para la extracción de agua mediante pozos. Además hay que tener en consideración los mismos parámetros que en casos anteriores pero teniendo en cuenta algunas consideraciones en ellos.

- Altura útil de la bomba, para la cual hay que tener en cuenta.
 - La presión de entrada de la bomba se considerará despreciable ya que se desconoce, debido a que la misma es la presión que ejerce la columna de agua que hay sobre la bomba. Se supondrá que es superior al NPSH_r de la bomba seleccionada.
 - La presión de salida de la misma será 5 bar, debido a que el agua tiene que llegar a 3 bar a la entrada de la bomba de alta presión y se suponen 2 bar de pérdidas en el pretratamiento.
 - Se deben de tener en cuenta las pérdidas de carga calculadas en el Anexo II.

- La cota a superar en este caso no es despreciable ya que la extracción del agua se hace mediante un pozo. El valor de la misma depende de las características del pozo calculado en el Anexo II.
- Caudal, el cual debido es la mitad del caudal de alimentación de la planta desaladora, es decir, 5000 m³/día ya que se suponen dos bombas de alimentación.
- Temperatura del agua de alimentación.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se obtuvieron los siguientes parámetros de funcionamiento para la bomba de captación:

Altura útil (m)	89,840
Caudal (m³/h)	208,33
Temperatura del agua (°C)	20

Tabla 24. Condiciones de funcionamiento de la bomba captación.

Los fabricantes consultados en este caso son solo dos, KSB y Lowara, de los cuales se han obtenido los siguientes modelos de bombas sumergibles:

Fabricante	Modelo	Rendimiento
KSB	UPAB 250C-250	79,9%
Lowara	Z10220 3/2A-L8W	81,9%

Tabla 25. Modelos de bomba de captación comparados.

Como se puede observar en la tabla anterior, en la que se muestran los diferentes rendimientos de la bomba seleccionada, la bomba que mayor rendimiento aporta es la de Lowara, con un 81,9%, un poco más alto que la ofrecida por KSB, 79,9 %.

En este caso la bomba seleccionada no será la de Lowara, a pesar de poseer mayor rendimiento, debido a que no se especifica en su ficha técnica que pueda ser usada para la

extracción de agua salada mientras que la de KSB está especialmente diseñada para este uso. Por tanto, como poseen un rendimiento similar y teniendo en cuenta el detalle comentado, se ha tomado la determinación de que la bomba elegida sea la UPAB 250C-250 de KSB.

Las curvas características de la bomba seleccionada se muestran en la siguiente figura, a partir de las cuales se pueden observar los distintos parámetros de la misma.

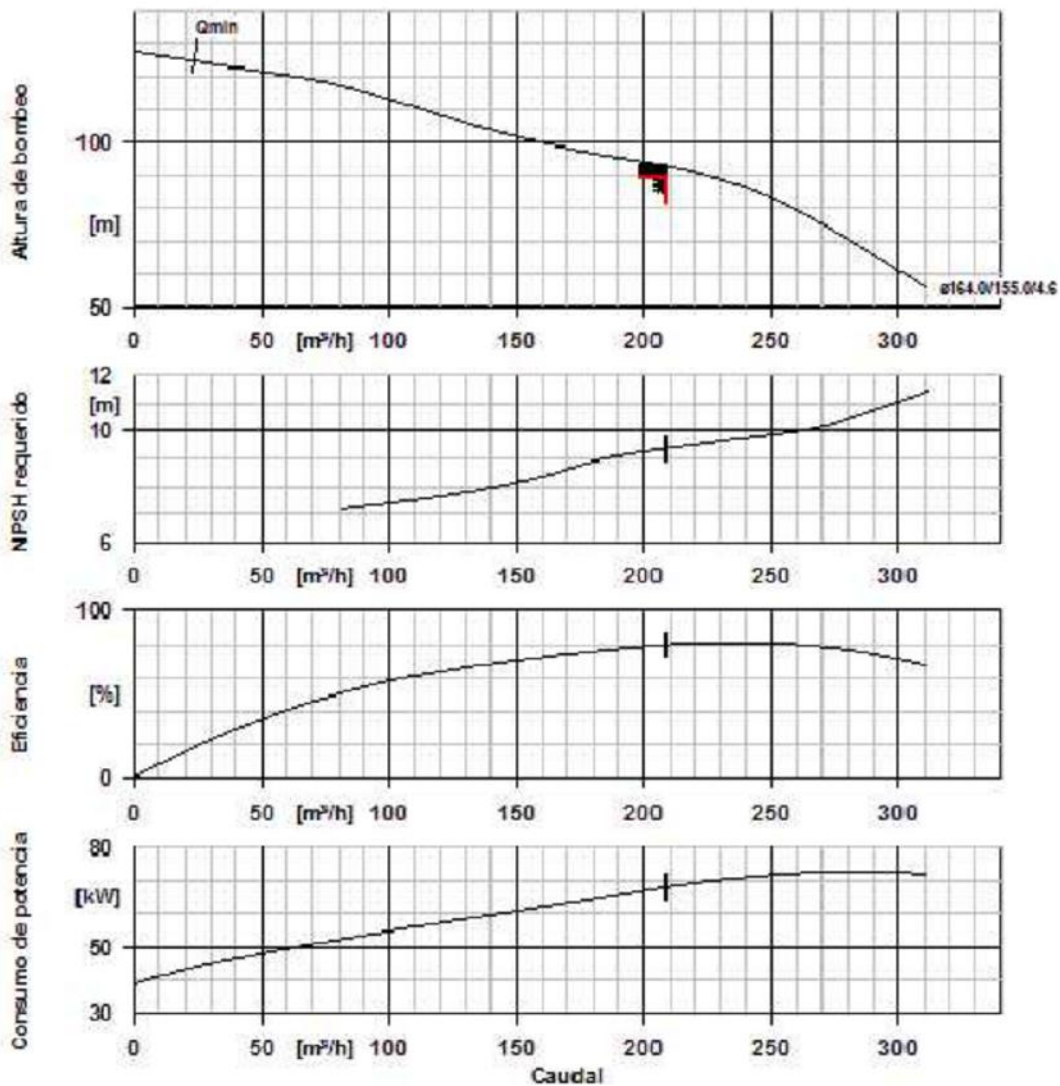


Figura 67. Curvas características de la bomba de captación elegida.

Las características principales de la bomba adoptada como solución en la selección de la bomba de captación son las siguientes:

Fabricante	KSB
Denominación	UPAB 250C-250
Rendimiento	79,90 %
Potencia motor eléctrico	67 kW

Tabla 26. Bomba de captación seleccionada.

7.7. Selección de la bomba de distribución

El primer paso que se ha llevado a cabo en este proyecto con el fin de realizar la selección de la bomba de distribución, es la elección del destino final del permeado de la planta desaladora. Para ello se ha tomado como ejemplo la planta desaladora de la Comunidad de regantes de Las Galletas, la cual envía el agua desalada a un depósito cercano, el cual contiene agua procedentes de fuentes convencionales con el objetivo de homogeneizar el agua, antes de enviarla a las zonas de riego.

En el caso de estudio se optará por la misma solución, enviando el permeado al depósito más cercano, con el fin de que la calidad del agua final para el riego sea lo más alta posible. Además, con la solución adoptada se reduce la cantidad de postratamientos que habría que aplicarle al permeado, abaratando los costes de funcionamiento de la instalación.



Figura 68. Recorrido a seguir por el permeado hasta el depósito.

En la figura anterior se puede observar una imagen del depósito seleccionado para enviar el permeado y el recorrido elegido para transportar el agua desde un punto a otro, el cual tiene una distancia aproximada de 1039 metros de longitud.

Además de ello, la diferencia de cota a superar entre la EDAM y el depósito se puede obtener a través de la siguiente figura.

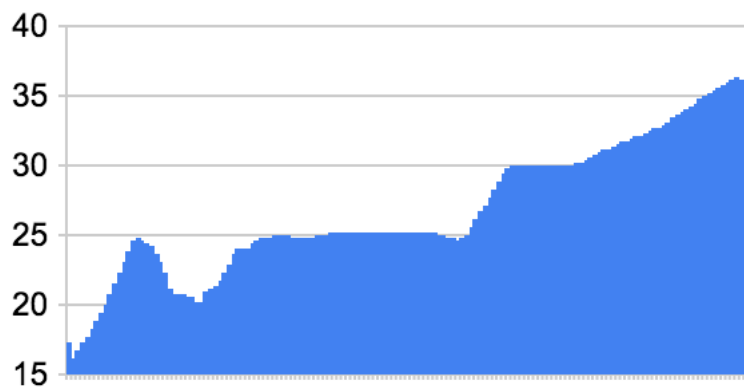


Figura 69. Perfil de alturas obtenido en el recorrido de la tubería de distribución (Goolzoom).

Como se puede observar en la figura anterior se muestra el perfil de alturas obtenido a lo largo del recorrido de la tubería de distribución, a partir del cual se debe de obtener la diferencia de altura entre el inicio y el final de la misma ya que será la cota que debe superar el fluido que salga de la bomba de distribución.

En este caso, la cota máxima está situada a unos 37,5 metros y la mínima alrededor de los 15 metros, con lo cual habría una diferencia de altura de 22,5 metros pero con el fin de sobredimensionar el sistema y tener un cierto margen de seguridad se ha supuesto una diferencia de cota de 25 metros.

Una vez se conocen los datos referidos al recorrido que tiene que seguir el agua procedente de la bomba de distribución se pasa a la selección de la bomba propiamente dicha, para la cual se han de conocer los siguientes valores:

- La altura útil de la bomba, la cual en este caso depende únicamente de la diferencia de cota y de las pérdidas de carga ya que debido a las características del sistema de distribución tanto la variación de energía de presión como la cinética se pueden considerar despreciables.
- El caudal que circula por la bomba, el cuál es el caudal del agua producto de la planta desaladora.
- La temperatura del agua desalada, considerada igual a la del agua de alimentación.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se obtuvieron los siguientes parámetros de funcionamiento para la bomba de captación:

Altura útil (m)	26,6454
Caudal (m³/h)	187,5
Temperatura del agua (°C)	20

Tabla 27. Condiciones de funcionamiento de la bomba de distribución.

A través de la introducción de los datos anteriores en los distintos seleccionadores de bombas, ofrecidos por los principales fabricantes se obtienen los siguientes modelos:

Fabricante	Modelo	Rendimiento
Flowserve	MBLC125100-315L	79,70 %
Lowara	NSCF 125-315/220/W45VCC4	82,20 %
Grundfos	NBG 125-80-200/222 A-E2-A-BQQE	79,00 %
Sulzer	SZM 325-01	80,20 %

Tabla 28. Modelos de bombas de distribución comparados

Como se puede observar en la tabla de valores anterior, en la que se muestran los rendimientos de las bombas seleccionadas dependiendo del fabricante de las mismas, se ha llegado a la conclusión de que la bomba de distribución que se instale en el núcleo de

Estudio de un sistema de desalación alimentado mediante energía eólica

desalación de la EDAM bajo estudio, sea la fabricada por Lowara ya que es la que presenta un rendimiento más alto, alcanzando un valor el mismo de 82,20 %.

Las características principales de la bomba adoptada como solución en la selección de la bomba de distribución son las siguientes:

Fabricante	Lowara
Denominación	NSCF 125-315/220/W45VCC4
Rendimiento	82,20 %
Potencia motor eléctrico	20 kW

Tabla 29. Bomba de distribución seleccionada.

7.8. Rechazo de salmuera

El rechazo de salmuera se producirá mar adentro a una profundidad superior a 40 metros, todo ello mediante la acción de la gravedad sin necesidad de bombas debido a la diferencia de altura entre la salida de salmuera y la descarga mar adentro. Además también se han tomado como ejemplo numerosas desaladoras, las cuales realizan la expulsión de salmuera al mar por gravedad.

La profundidad elegida para la descarga de la salmuera es debido a la existencia de sebadales en la zona de instalación de la desaladora, los cuales tiene una importancia vital en el medio acuático ya que son los encargados de abastecer de hábitat y nutrientes a los organismos de la zona. Todo ello unido a la sensibilidad de los mismos a los cambios de salinidad, ha sido motivo de la toma de esta decisión, con el fin de causar el menor impacto ambiental posible.

7.9. Cálculos energéticos del sistema de desalación

En el presente apartado se mostrarán los resultados de los cálculos energéticos realizados en el Anexo IV. Los mismos han sido obtenidos a través de las potencias de las diferentes bombas que forman parte del sistema de desalación.

La potencia a partir de la que se ha hecho el cálculo energético para cada una de las bombas, es la potencia máxima que consumen los motores eléctricos asociados a las mismas, aunque en realidad el consumo es algo menor. Se ha decidido tomar esta consideración con el fin de obtener de realizar los cálculos teniendo en cuenta el peor de los casos desde el punto de vista energético.

Además de ello, para realizar el cálculo del consumo energético de las bombas se ha supuesto un trabajo continuo de las mismas sin paradas a lo largo del día, es decir, 24 horas de funcionamiento diarias.

Los resultados del consumo energético de las bombas teniendo en cuenta las consideraciones anteriores son los que se muestran a continuación:

Dispositivo	Cantidad	Potencia (kW)	Tiempo (horas)	Energía consumida al día (kWh)
Bomba AP	1	375	24	9000
Bomba Booster	1	11	24	264
Bomba de captación	2	67	24	3216
Bomba de distribución	1	20	24	480

Tabla 30. Potencias y consumos energéticos de las distintas bombas.

A partir de los resultados anteriores, como se muestra en el Anexo IV, se obtienen los costes y consumos energéticos que se muestran en la siguiente tabla.

Consumo específico (kWh/m ³)	3,03
Coste del metro cúbico desalado (euros/m ³)	0,427
Consumo energético diario (kWh)	12960

Consumo energético anual (kWh)	4257360
Coste energético anual (euros)	600428,25

Tabla 31. Costes y consumos energéticos.

7.10. Elección del aerogenerador

La elección del modelo de aerogenerador que instalar en la planta desaladora, se comenzó realizando un estudio del recurso eólico de la zona con el fin de escoger el que mejor se adaptará a las condiciones de la zona.

Para ello se hizo uso del Atlas Eólico de España ofrecido en la página web del Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDEA), a partir del cual se obtuvieron los siguientes valores de las condiciones eólicas.

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	1,920	0,03	2,102	1,662
SSW	1,33	2,260	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 32. Valores eólicos obtenidos en la zona de ubicación de la desaladora (IDEA).

A partir de estos datos, se han obtenidos los valores de las constantes de Weibull haciendo la media de las que nos ofrece la tabla para las diferentes direcciones, con el fin de construir las distribución de Weibull que se muestra en la siguiente figura.

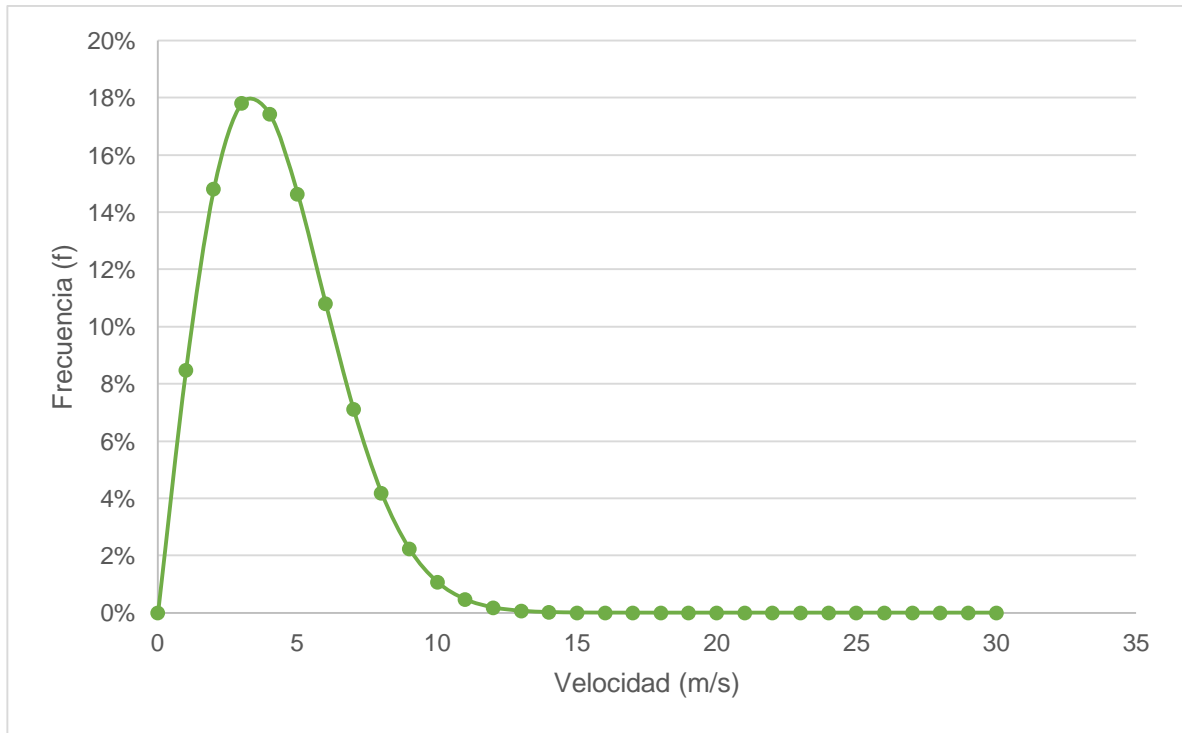


Figura 70. Distribución de velocidades frente a la frecuencia con la que se dan las mismas.

Además de ello, también a partir de los datos de la Tabla 30 se construyeron las rosas de los vientos que se muestran a continuación. En las cuales se nos muestra tanto la dirección predominante del viento como la velocidades medias en cada una de las mismas.

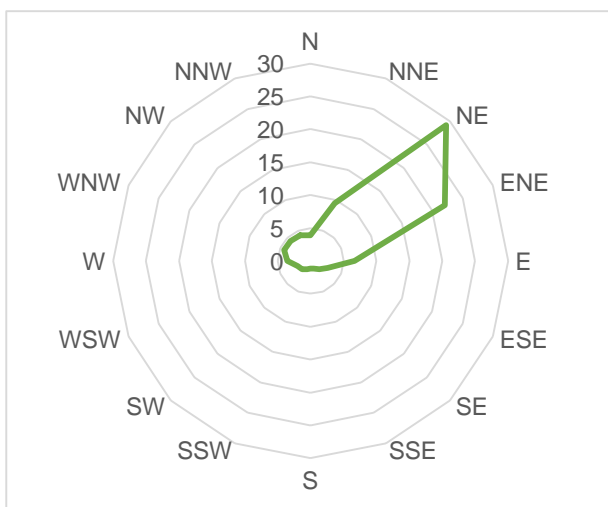


Figura 71. Rosa de los vientos de frecuencias.

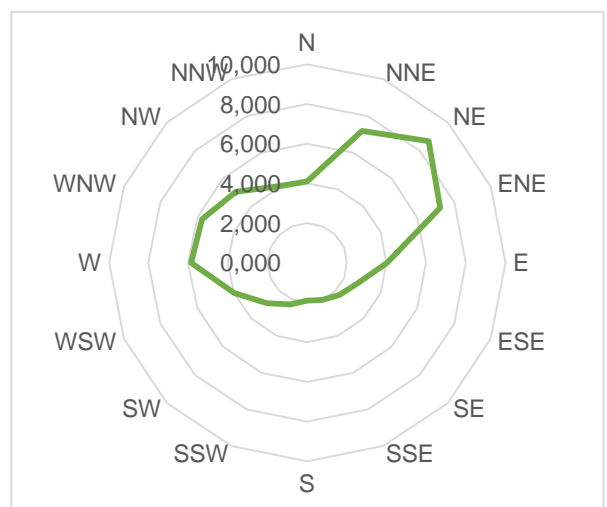


Figura 72. Rosa de los vientos de velocidades.

Una vez se ha evaluado las condiciones eólicas de la zona donde se situará la desaladora, se sigue con la selección del aerogenerador que mejor se adapte a las mismas. Para ello se tiene en cuenta los siguientes requisitos de diseño:

- Se buscará un aerogenerador que nos aporte una potencia anual ligeramente superior al consumo que conlleva el funcionamiento de la desaladora.
- El factor de carga (FC) del aerogenerador tiene que ser el más alto posible.
- Se admiten diseño de uno o dos aerogeneradores, eligiendo la configuración que mejor se adapte a los requisitos previos.

Teniendo en cuenta los requisitos anteriormente comentados, se han realizado los cálculos pertinentes sobre los modelos de aerogeneradores, ofrecidos por los principales fabricantes, que mejor se adaptaban a las condiciones de la zona.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros calculados para cada uno de los modelos seleccionados.

Aerogeneradores	Cantidad	Potencia nominal (kW)	Energía anual producida por unidad(kWh)	Energía anual producida (kWh)	FC (%)	Calificación
Gamesa G58-850	2	850	2132243,7	4264487,4	28,636	Bueno
Vestas V80	1	2000	4296138,7	4296138,7	24,521	Aceptable
Enercon E-82	1	2000	4931542,3	4931542,3	28,148	Bueno
Nordex N80	1	2500	4397473,7	4397473,7	20,079	Aceptable
Made AE-90/2MW	1	2000	5014948,5	5014948,5	28,624	Bueno
Repower MM-82	1	2000	4354735,2	4354735,2	24,855	Aceptable

Tabla 33. Factor de carga y producción energética anual para los aerogeneradores seleccionados.

En vista de los valores obtenidos, se ha seleccionado el modelo G58-850 de Gamesa ya que presenta el mayor factor de carga (FC) y es el que tiene la producción energética anual más similar al consumo de la planta desaladora.

A continuación se muestra una tabla resumen con los datos obtenidos para el aerogenerador elegido.

Fabricante	Gamesa
Modelo	G58-850
Potencia nominal (kW)	850
Unidades instaladas	2
Producción energética anual (kWh)	4264487,4
Factor de carga	28,636
Consumo anual de la planta (kWh)	4257360
Exceso energético estimado (kWh)	7127,4

Tabla 34. Parámetros de importancia del aerogenerador seleccionado.

Por último, debido a que son dos las unidades a instalar se debe de prestar especial atención al lugar de colocación una respecto a la otra. Esto es así debido a que el funcionamiento de un aerogenerador puede afectar al funcionamiento del otro, reduciendo su rendimiento, si se colocan a una distancia demasiado reducida.

Las distancias de los aerogeneradores entre sí y respecto a viviendas vienen dadas en el DECRETO 06/2015, de 30 de enero, en el que se indica que la distancia mínima entre dos aerogeneradores de una misma línea no será inferior a dos diámetros de rotor y la distancia con respecto a un núcleo habitado no ha de ser inferior a 250 metro para aerogeneradores con potencia inferior a 900 kW.

Teniendo en cuenta las distancias anteriormente comentadas se ha que la disposición más adecuada para los aerogeneradores es la que se muestra en la siguiente figura.

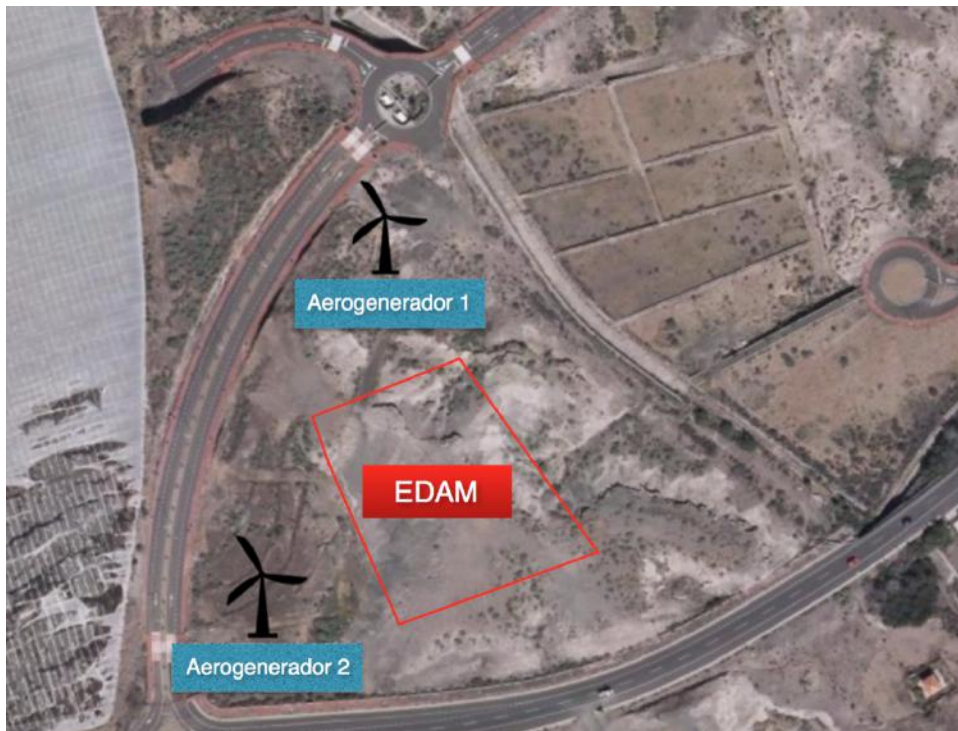


Figura 73. Disposición de los aerogeneradores.

Seguidamente a través de la herramienta de medida que nos aporta la página web Goolzoom comprobamos que la disposición mostrada en la figura anterior es válida.

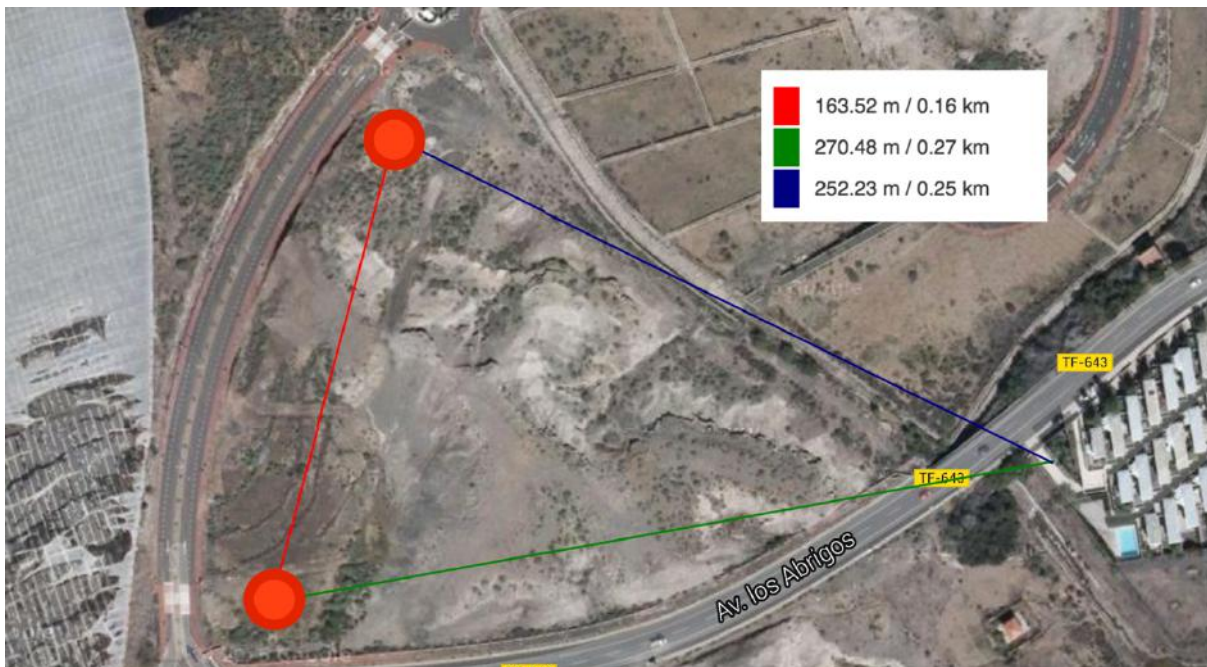


Figura 74. Distancias entre aerogeneradores y respecto la población.

Como se puede observar en la figura anterior, la ubicación elegida para colocar los aerogeneradores cumple con la normativa vigente. La distancia con el núcleo poblacional más cercano es superior a los 250 metros exigidos y la existente entre los aerogeneradores es superior a dos diámetros de rotor (aproximadamente 106 metros).

8. Resultados finales

En este apartado de la memoria se va a proceder a detallar la configuración final que se ha obtenido para el sistema de desalación de agua de mar por ósmosis inversa alimentado con energía eólica, con una capacidad de 4500 m³/día, emplazado en la Avenida de Los Abrigos, Granadilla de Abona.

8.1. Ubicación y finalidad de la planta

La planta desaladora estará situada en la Avenida Los Abrigos, parcela N° 3, municipio de Granadilla de Abona. Ha sido el lugar elegido para instalar la EDAM debido a que coinciden las necesidades hídricas con la existencia de recurso eólico haciendo posible la viabilidad del proyecto.

El agua producto será destinada principalmente a las 290 hectáreas de tomates que existen en el municipio, aunque debido a la calidad del agua puede servir como agua de riego a cualquier otro cultivo de la zona. Además, si en un futuro hubiera necesidades de agua para consumo humano, también podría servir de abastecimiento con los postratamientos adecuados para ajustar la calidad del agua a las exigencias expuestas para el consumo humano.

8.2. Sistema de captación

La captación del agua de mar se realizará a través de tres pozos, dos de ellos activos de manera continua y uno de reserva, situados a una profundidad de 40 metros, gracias a la ayuda de bombas sumergibles UPAB 250C-250 aportadas por la empresa KSB.

Las conducciones para llevar el agua desde los pozos hasta la entrada del pretratamiento están compuestas por tuberías de PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio) de la empresa Flowtite con diámetros de 300 mm (para el recorrido entre la bomba y el colector) y de 400 mm (para el recorrido en el interior del colector).

8.3. Pretratamiento

8.3.1. Pretratamiento físico

Para el pretratamiento físico, se han seleccionado filtros con una capacidad de filtración de 1 μm con el fin de que el agua de alimentación llegara en las mejores condiciones posibles a las membranas, alargando la vida de éstas. El modelo elegido es el HFZ01 del cual se instalarán 31 unidades con una caída de presión de 0,01 por cada una de ellas.

8.3.2. Pretratamiento químico

Debido a las características químicas del agua de alimentación, la cual tenía tendencia a la deposición de carbonato cálcico sobre las membranas de ósmosis, se ha decidido dosificar ácido sulfúrico en una cantidad de 87,73 ppm con el fin de disminuir el pH hasta 5,5 y así imposibilitar la aparición de deposiciones de CaCO_3 .

8.4. Núcleo de desalación

8.4.1. Membranas de ósmosis inversa

La elección de las membranas de ósmosis inversa se ha basado en los requisitos de mínimo consumo con la mayor calidad de permeado. Es por ello que se han seleccionado las membranas AE- 440 de la serie de baja energía, AE HR, aportadas por el fabricante General Electric.

La configuración elegida ha sido una sola etapa con 44 tubos de presión de siete membranas AE- 440 cada uno de ellos, ya que era la que tenía mejor relación calidad del permeado – consumo de la planta desaladora.

8.4.2. Bomba de alta presión

La bomba de alta presión elegida ha sido el modelo MD 150-360 (D)(Dd) del fabricante Sulzer ya que es la que presentaba un mayor rendimiento en las condiciones de trabajo. Se instalarán dos unidades de la misma, una de ellas en constante funcionamiento y otra de reserva para evitar paradas por averías o mantenimiento de la bomba principal.

8.4.3. Sistema de recuperación de energía

8.4.3.1. Intercambiador de presión

EL sistema de recuperación de energía elegido ha sido el intercambiador de presión, ya que después de haber realizado una comparación entre los principales sistemas de recuperación usados era a través del cual se obtenía un menor consumo específico. El modelo elegido ha sido el DWEER de la compañía Flowserve, del cual se instalará una sola unidad debido a que a través de esta configuración se obtenía una mayor eficiencia del sistema de recuperación.

8.4.3.2. Bomba Booster

La elección de la bomba Booster ha estado condicionada por las condiciones en las que salía el agua de alimentación del intercambiador de presión y la presión de entrada a las membranas de la misma. Teniendo en cuenta ello se ha elegido la bomba NSCF 125-250/110/P45VCC4 del proveedor Lowara ya que era la que mejor se adaptaba a las condiciones de funcionamiento.

Al igual que en el caso de la bomba de alta presión, se han de instalar dos unidades de la misma para evitar paradas innecesarias de la instalación desaladora.

8.5. Sistema de distribución

Para el sistema de distribución se ha tenido en cuenta el destino final del permeado, que en este caso ha sido un depósito cercano situado a una distancia de poco más de un kilómetro. Esta decisión ha sido tomada con el fin de homogeneizar el agua procedente de la desaladora con la existente en el depósito antes de ser destinada a los cultivos, mejorando aún más la calidad del permeado.

En este caso, para conducir el permeado de un punto a otro, se ha hecho uso de tuberías de PRFV de la empresa Flowtite de 300 mm de diámetro y de la bomba de la compañía Lowara, modelo NSCF 125-315/220/W45VCC4.

8.6. Salmuera

Debido a las características de la zona y a la existencia de un importante sebadal de alta sensibilidad a las variaciones de salinidad, se ha decidido expulsar la salmuera mar adentro a una profundidad superior a 40 metros. Esto es debido a que los seabadales se extienden desde los 12 hasta los 35 metros de profundidad, con lo cual haciendo la descarga a mayor profundidad evitamos provocar impactos sobre el medio marino.

8.7. Tabla de resultados

A continuación se muestra una tabla en donde quedan reflejados todos los resultados anteriormente comentados, con el fin de tener una mayor claridad de los mismos.

Ubicación	Avenida de Los Abrigos, parcela N°3, Granadilla de Abona		
Pretratamiento	Físico	Filtro de cartuchos	HFZ01
			31 unidades

	Químico	Dosis de H ₂ SO ₄	87,73 ppm
Captación	Sistema	Pozos	- 2 principales - 1 reserva 40 metros de profundidad
	Tuberías	PRFV, Flowtite	
	Bomba captación	UPAB 250C-250, KSB	
Núcleo de desalación	Bomba de alta presión	MD 150-360 (D)(Dd), Sulzer	
	Núcleo de membranas	Modelo	AE-440
		Configuración	- 44 tubos de presión - 7 membranas por tubo
	Recuperación de energía	Intercambiador de presión	DWEER, Flowserve 1 unidad
	Bomba Booster	NSCF 125-250/110/P45VCC4, Lowara	
Distribución	Tuberías	PRFV, Flowtite	
	Bomba	NSCF 125-315/220/W45VCC4, Lowara	

Tabla 35. Tabla de resultados finales.

9. Conclusiones

Como se comentaba al principio del presente proyecto, la redacción del mismo consistía en el diseño y dimensionado de un sistema de desalación mediante la tecnología de ósmosis inversa. Todo ello utilizando fuentes de energía renovables para abastecer la planta desaladora, más concretamente se ha hecho uso de la energía eólica.

El fin del trabajo era la demostración de las competencias adquiridas a lo largo de los cuatros años de impartición del Grado de Ingeniería Mecánica, principalmente haciendo

demostración en este caso de las competencias adquiridas en el ámbito de la mecánica de fluidos. Además también se ha hecho uso de las competencias adquiridas en otras ramas como la de oficina técnica, gracias a la cual se conocen las diferentes partes de las que compone un proyecto y la organización de las mismas, así como la lectura y comprensión de las diferentes normas. También se ha hecho uso de los conocimientos adquiridos en otras ramas como la informática, a partir de la que se ha conseguido un mejor desempeño en el uso de las diferentes aplicaciones y herramientas informáticas usadas, o la rama de dibujo técnico a partir de la cual se han realizado diferentes interpretaciones de planos. Cabe destacar que aunque no aparecieran temas referentes a otras ramas, también se han demostrado las capacidades de comprensión, de trabajo, de búsqueda de información, etc. adquiridas a través de las mismas.

Por último, centrándonos en el tema estudiado a lo largo de la realización del proyecto, se ha de comentar que la idea de integrar la desalación y las energías renovables en una sola instalación es una idea debido a los recursos limitados que presenta el planeta Tierra.

En las últimas décadas, la población mundial va aumentando rápidamente mientras que los recursos naturales, entre los que se encuentra el agua, siguen siendo los mismos o incluso han disminuido debido a la sobreexplotación de los mismos entre otros factores. Además de ello, la escasez de los recursos energéticos convencionales, combustibles fósiles en su mayoría, y la contaminación que provoca el uso de los mismos indica la necesidad de buscar otras fuentes de energía.

Tanto el agua de mar como las energías renovables son recursos ilimitados, con lo cual la integración de ambos puede ser solución a los problemas de escasez de recursos hídricos en numerosos lugares del planeta, y todo ello de manera sostenible.

Esta tecnología está empezando a usarse con más asiduidad, siendo Canarias pionera en la investigación y desarrollo de la misma, aunque aún queda un importante camino por recorrer para poder llegar a ser cien por cien efectiva. Lo cual se puede conseguir desarrollando la tecnología de desalación, añadiendo otros sistemas como la producción de

hidrógeno para servir como reserva energética o mediante la mejora de la producción energética mediante energías renovables.

Además de ello, este tipo de tecnología en la que se alimenta energéticamente un proceso a través de energías renovables tiene un gran potencial ya que puede ser extendida a otros sectores y actividades.

10. Conclusions

As mentioned at the beginning of this project, the writing of it consisted of the design and dimensioning of a system of desalination using reverse osmosis technology and exploiting renewable energy to power the desalination plant, more specifically by using the energy of wind.

The purpose of the work was the demonstration of skills acquired throughout the four years of teaching the Degree of Mechanical Engineering, mainly showing in this case the skills acquired in the field of fluid mechanics. In addition, it has also been used the skills acquired in other branches like technical office, through which the different parts that make up a project and its organization, as well as reading and understanding of the different known rules. It has also been used the acquired knowledge in other fields such as computing, from which it has achieved a better performance in the use of different software applications and tools used, or branch of technical drawing from which there have been various interpretations of planes. Notably, although topics related to other branches doesn't appear, they have also been demonstrated by showing compression capabilities, work, information search, etc. acquired through the same.

Finally, focusing on the theme studied throughout the project, it has been commenting that the idea of integrating desalination and renewable energy in a single installation is an idea because of the limited resources that the planet Earth presents.

In recent decades, the world population has been increasing rapidly while natural resources, including water, remained the same or even decreased due to overexploitation of these and other factors. In addition, the shortage of conventional energy resources, mainly fossil fuels, and pollution caused by the use of them indicates the need to seek other sources of energy.

Both, seawater as renewable energies, are unlimited resources, thus integrating both can be the solution to the problems of water scarcity in many parts of the world, and all this in a sustainable manner.

This technology is starting to be used more frequently, with Canary pioneer in research and development of it, although there is still a long way to go to become one hundred percent effective. It can be achieved by developing desalination technology, adding other systems such as hydrogen production, to serve as an energy reserve or by improving energy production through renewable energy.

In addition, this type of technology in which a process feeds energy through renewable energy has great potential as it can be extended to other sectors and activities.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado en Ingeniería Mecánica

ANEXOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO MEDIANTE
ENERGÍA EÓLICA**

Autor: Eduardo José Delgado Trujillo

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Índice

1.	Cálculo de la matriz de membranas	13
1.1.	Software de dimensionado	13
1.2.	Introducción de datos	14
1.2.1.	Composición del agua de alimentación.....	14
1.2.2.	Temperatura del agua de alimentación	16
1.2.3.	Introducción de datos a través de la interfaz del programa	18
1.3.	Elección de las membranas	20
1.3.1.	Cálculo del número de membranas.....	22
1.4.	Comparación entre diferentes membranas	30
1.5.	Selección de la membrana y resultados obtenidos.....	31
2.	Selección de bombas y recuperación de energía	37
2.1.	Comparativa entre distintos sistemas de recuperación de energía	37
2.1.1.	Turbo-charger.....	37
2.1.2.	Turbina Pelton	38
2.1.3.	Intercambiador de presión	39
2.2.	Selección del sistema de recuperación más adecuado	42
2.3.	Intercambiador de presión seleccionado	43
2.4.	Elección de la bomba booster	48
2.4.1.	Bomba Booster seleccionada	59
2.5.	Elección de la bomba de alta presión.....	60
2.5.1.	Bomba de alta presión seleccionada.....	67
2.6.	Elección de la bomba captación	68
2.6.1.	Método de captación	69
2.6.2.	Pozos captación.....	71
2.6.3.	Tuberías.....	73
2.7.	Elección de la bomba de distribución.....	90
2.7.1.	Bomba de distribución seleccionada.....	102
3.	Dimensionado del sistema eólico.....	107
3.1.	Estudio de las condiciones eólicas.....	107
3.2.	Selección del aerogenerador.....	112

3.3.	Solución para la variabilidad de producción eólica	117
4.	Cálculos energéticos.....	122
4.1.	Consumo específico de la planta.....	122
4.2.	Costes de producción y consumo energético anual.....	124

Índice de figuras

Figura 1. Interfaz inicial del programa de simulación Winflows, usado para la elección de las membranas.	14
Figura 2. Datos de temperaturas máximas y mínimas por mes obtenidas por la boya de Tenerife Sur (Puertos del Estado).....	16
Figura 3. Datos de temperaturas medias por mes obtenidas por la boya de Tenerife Sur (Puertos del Estado).	17
Figura 4. Interfaz del programa Winflows para la introducción de los parámetros del agua de alimentación.....	19
Figura 5. Interfaz para la elección de los ratios de flujo.....	20
Figura 6. Series de membranas para desalación de agua de mar (Winflows).....	21
Figura 7. Pesos y dimensiones de las membranas de la serie AE HR	22
Figura 8. Especificaciones de los elementos de la serie AE HR.	23
Figura 9. Interfaz del programa para la elección de las membranas.	24
Figura 10. Interfaz de errores del programad de dimensionado de membranas (Winflows)	25
Figura 11. Parámetros de funcionamiento de las membranas de la serie AE HR (Winflows).	26
Figura 12. Áreas activas según tipo de membrana (Winflows)	27
Figura 13. Interfaz de resultados para la configuración de 51 tubos de presión de 6 membranas cada uno (Winflows)	29
Figura 14. Interfaz de resultados para la configuración de 44 tubos de presión de 7 membranas cada uno (Winflows)	29
Figura 15. Composición química de los flujos resultantes del proceso de desalación, el permeado (product) y la salmuera (concentrate).....	32
Figura 16. Valores frecuentes para el agua de riego (José Miguel Veza).	33
Figura 17. Turbo-charger de la empresa Energy Recovery.....	38
Figura 18. Turbina Pelton.	38
Figura 19. Intercambiador de presión de la compañía Energy Recovery (Energy Recovery).	40
Figura 20. Funcionamiento de un intercambiador de presión.....	41

Figura 21. Funcionamiento intercambiador de Flowserve.....	42
Figura 22. Interfaz para la introducción de datos. Hoja Excel de dimensionado de intercambiador (Flowserve).	45
Figura 23. Diagrama del núcleo de desalación según hoja Excel (Flowserve).....	46
Figura 24. Intercambiador de trabajo DWEER de Flowserve.	47
Figura 25. Interfaz de la aplicación online Water Density Calculator.....	50
Figura 26. Ventana gráfica de la herramienta de selección de bombas Affinity para introducirlos datos de funcionamiento.....	52
Figura 27. Curvas características de la bomba de Flowserve seleccionada.	52
Figura 28. Interfaz de introducción de datos de KSB Easy Select.....	53
Figura 29. Curvas características de la bomba seleccionada de la compañía KSB.	54
Figura 30. Interfaz de inicio de la herramienta Xylect de Lowara.	55
Figura 31. Interfaz de introducción de datos de Xylect.....	55
Figura 32. Curvas características de la bomba de Lowara seleccionada.	56
Figura 33. Interfaz de introducción de datos de Grundfos Product Center.	57
Figura 34. Curvas características de la bomba de Grundfos seleccionada.....	57
Figura 35. Interfaz de introducción de datos de Sulzer Select.	58
Figura 36. Curvas características de la bomba de Sulzer seleccionada.	58
Figura 37. Curvas características de la bomba de Flowserve seleccionada.	63
Figura 38. Curvas características de la bomba de KSB seleccionada.....	64
Figura 39. Curvas características de la bomba de Lowara seleccionada.	65
Figura 40. Curvas características de la bomba de Sulzer seleccionada.	67
Figura 41. Estadística bajamares obtenidos por la bolla de medición de Santa Cruz de Tenerife (Puertos del Estado).....	72
Figura 42. Disposición de los pozos de captación.	74
Figura 43. Criterio de Bonet para el cálculo de secciones.....	75
Figura 44. Diámetros comerciales ofrecidos por Flowtite.....	77
Figura 45. Interfaz de KSB Easy Select para la introducción de datos.....	87
Figura 46. Conjunto de curvas características de la bomba de KSB seleccionada.	88
Figura 47. Curvas características de la bomba de Lowara seleccionada.	89
Figura 48. Datos de la bomba de captación seleccionada en el caso de estudio.....	90
Figura 49. Situación del depósito respecto a la EDAM.....	91

Figura 50. Recorrido a seguir por el permeado hasta el depósito.	92
Figura 51. Criterio de Bonet para el cálculo de secciones.	93
Figura 52. Curvas características de la bomba de Flowserve elegida.....	99
Figura 53. Curvas características de la bomba de Lowara seleccionada.	100
Figura 54. Curvas características ofrecidas por Grundfos para la bomba seleccionada.	101
Figura 55. Curvas características ofrecidas por Sulzer para la bomba seleccionada....	102
Figura 56. Rendimientos de las bombas de distribución seleccionadas según fabricante.	103
Figura 57. Datos eólicos registrados en el lugar de instalación de los aerogeneradores (IDAE).	107
Figura 58. Rosa de los vientos de frecuencias.	108
Figura 59. Rosa de los vientos de velocidades.	109
Figura 60. Curva de potencia aerogenerador G58-850.	117

Índice de tablas

Tabla 1. Composición química del agua de mar de alimentación	15
Tabla 2. Parámetros físico-químicos de importancia.	16
Tabla 3. Valores máximos y mínimos de temperatura según mes (Puertos del Estado)	17
Tabla 4. Número de membranas en función del flujo medio de permeado.	23
Tabla 5. Número de tubos de presión obtenidos a través del primer procedimiento. ...	24
Tabla 6. Número de membranas según flujo típico de operación	28
Tabla 7. Número de tubos de presión teniendo en cuenta el flujo típico de funcionamiento.	28
Tabla 8. Comparación entre distintas configuraciones para el núcleo de desalación....	30
Tabla 9. Consumo específico según sistema de recuperación de energía utilizado.....	43
Tabla 10. Eficiencia de los intercambiadores dependiendo de la cantidad instalada. ...	45
Tabla 11. Parámetros de interés obtenidos mediante la hoja Excel (Flowserve).....	48
Tabla 12. Rendimientos de las bombas booster seleccionadas según fabricante.	59
Tabla 13. Datos de la bomba Booster seleccionada para el caso de estudio.....	60
Tabla 14. Rendimientos de las bombas de alta presión seleccionadas según fabricante.	68
Tabla 15. Datos de la bomba Booster seleccionada para el caso de estudio.	68
Tabla 16. Diámetros comerciales elegidos según conducción.	77
Tabla 17. Resultados del factor de fricción para las tuberías de captación, aplicando proceso iterativo en Colebrook.....	80
Tabla 18. Resultados del factor de fricción para el colector, aplicando proceso iterativo en Colebrook.	81
Tabla 19. Comparación de los rendimientos de las bombas de captación seleccionadas según fabricante.	90
Tabla 20. Valores aproximados de diferencia de cota y distancia del recorrido entre EDAM y depósito (Goolzoom).....	92
Tabla 21. Resultados del factor de fricción para la tubería de distribución, aplicando proceso iterativo en Colebrook.....	95
Tabla 22. Datos de la bomba de distribución seleccionada para el caso de estudio...103	
Tabla 23. Valores eólico obtenidos a través del IDAE.	108
Tabla 24. Valores medios de los parámetros de Weibull.	110

Tabla 25. Valores obtenidos para la distribución de Weibull.....	111
Tabla 26. Distribución de velocidades.....	112
Tabla 27. Aerogeneradores objeto de estudio.....	113
Tabla 28. Coordenadas UTM de la ubicación de la desaladora.....	114
Tabla 29. Producciones energéticas anuales de los aerogeneradores seleccionados (ITC).	115
Tabla 30. Calificación del funcionamiento de las instalaciones según el FC.	115
Tabla 31. Factor de carga y producción energética anual para los aerogeneradores seleccionados.	116
Tabla 32. Parámetros de importancia del aerogenerador seleccionado.	116
Tabla 33. Potencias y consumos energéticos de las distintas bombas.	123
Tabla 34. Tabla-resumen cálculos energéticos.	125

ANEXO I

DIMENSIONADO DEL NÚCLEO DE MEMBRANAS

1. Cálculo de la matriz de membranas

En el siguiente anexo se va a llevar a cabo el dimensionado de la matriz de membranas necesarias para realizar a cabo el proceso de osmosis inversas, dando como resultado un permeado que se ajuste tanto a nuestras exigencias como a las de la normativa vigente.

Se estudiarán diferentes combinaciones variando distintos parámetros como pueden ser el número de tubos de presión, el número de membranas por tubo de presión, distintos tipos de membranas, etc.

1.1. Software de dimensionado

Para realizar dichos cálculos se utilizará el software Winflows ofrecido por la división centrada en el tratamiento de aguas de la compañía multinacional General Electric. Dicho software es un programa de simulación de uso fácil e intuitivo a través del cual se pueden diseñar rápidamente desde los sistemas más simples hasta los más complejos sin dificultad. Además, tiene una función a partir de la cual el propio software se encarga de recomendar productos químicos para el pretratamiento, sus tasas de dosis si es necesario e incluso nos ofrece la posibilidad de ofrecernos una configuración de membranas apropiadas para tratar el agua a desalar que se le introduzca.

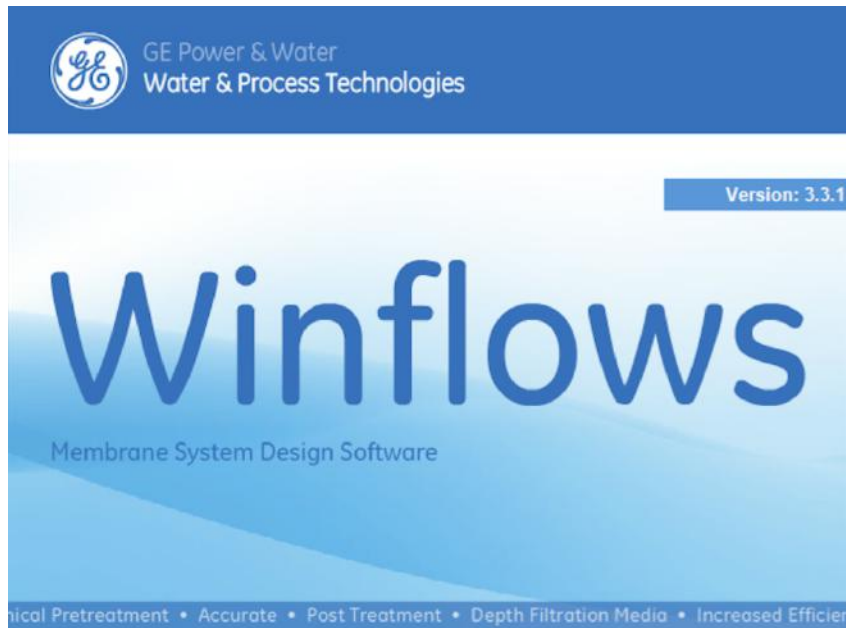


Figura 1. Interfaz inicial del programa de simulación Winflows, usado para la elección de las membranas.

A través del programa además se puede diseñar el núcleo de desalación con diferentes configuraciones, ya que permite la variación de numerosos parámetros como el número de etapas, la adición de distintos tipos de recuperadores de energía, el uso de pretratamiento y/o postratamientos, etc.

1.2. Introducción de datos

Lo primero que se debe hacer para comenzar el diseño de un núcleo de desalación a través del programa, es introducir la composición del agua de alimentación. Para realizar las simulaciones Winflows ofrece una serie de composiciones de agua de alimentación estándar según de donde sea la captación de la misma (pozo cerrado, toma abierta, etc.) y dependiendo del tipo de agua a desalar (agua de mar o salobre). A pesar de ello, si se quiere una mayor fiabilidad el software permite introducir una composición definida por el usuario.

1.2.1. Composición del agua de alimentación

Para el diseño de la desaladora de objeto de estudio en el presente proyecto se han obtenido los valores de los diferentes parámetros de la composición del agua a partir de un

análisis cedido por la compañía que regenta la Desaladora de Santa Cruz de Tenerife. Se ha optado por usar la composición dada en este análisis ya que es el análisis de agua más próximo que se ha obtenido a la ubicación de la desaladora bajo estudio y por tanto el más fiable. Los datos de composición del agua de alimentación que se introducirán en el programa de simulación, obtenidos del análisis de agua ya comentado, son los que se muestran a continuación.

Composición agua de mar	
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 de alimentación

Además de los datos anteriores, el análisis cedido también nos aportaba los siguientes parámetros físico-químicos de importancia.

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

Tabla 2. Parámetros físico-químicos de importancia.

1.2.2. Temperatura del agua de alimentación

Además de la composición química del agua, hay que ofrecerle otro dato de entrada al programa que es la temperatura. Este dato es de vital importancia en el diseño ya que de él dependen muchos parámetros.

Los datos de temperatura, del agua del sur de Tenerife, que se muestran a continuación se han obtenido a través de la base de datos de la página web de Puertos del Estado. En las siguientes figuras se muestran las temperaturas máximas y mínimas por mes, así como las medias.

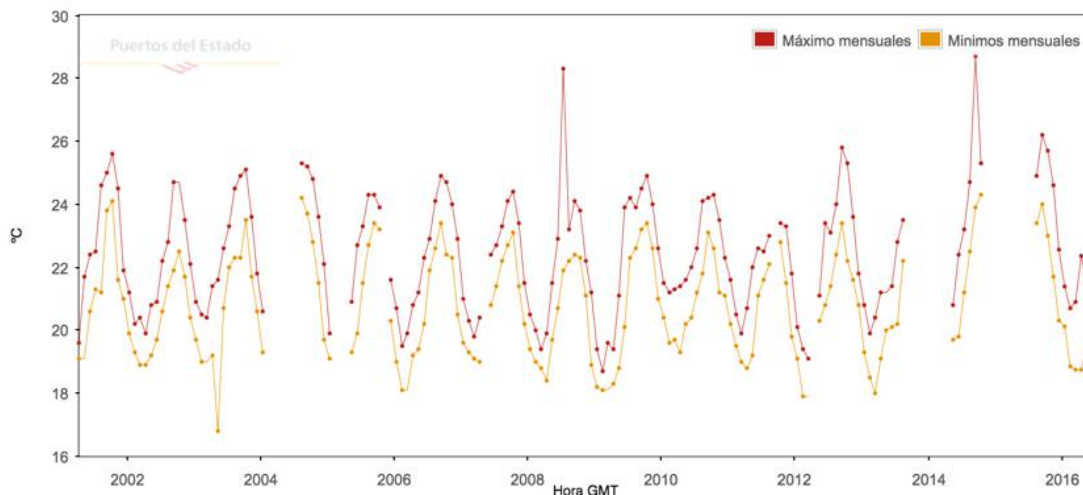


Figura 2. Datos de temperaturas máximas y mínimas por mes obtenidas por la boya de Tenerife Sur (Puertos del Estado).

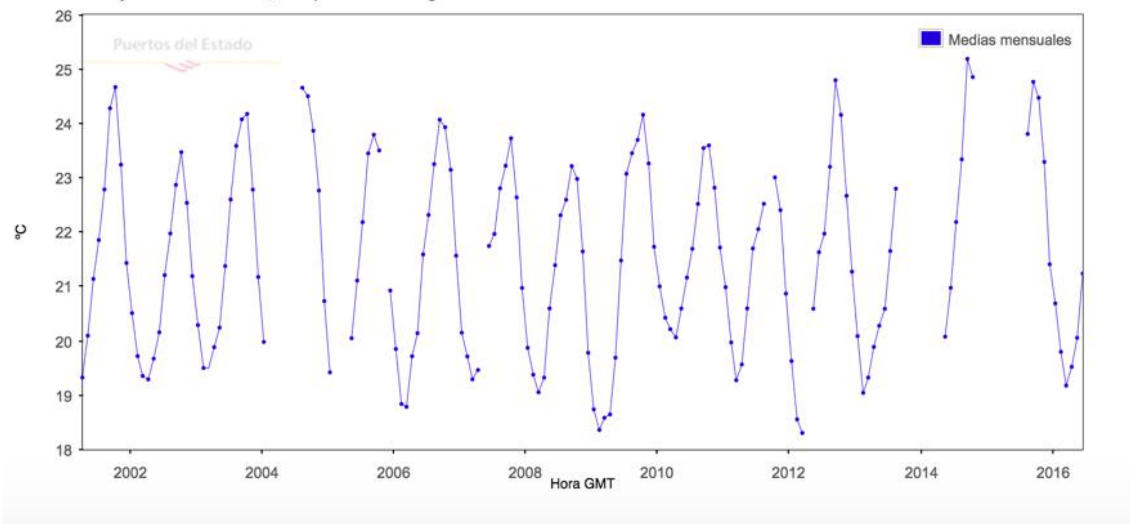


Figura 3. Datos de temperaturas medias por mes obtenidas por la boya de Tenerife Sur (Puertos del Estado).

Estos datos se pueden observar con valores más precisos en la siguiente tabla que representa los valores de temperatura máxima y mínima que se ha dado según el mes de 1998 hasta la actualidad.

Boya de Tenerife Sur 1998 - 2016				
Mes	Tª mín. (°C)	Año	Tª máx. (°C)	Año
Enero	18,2	2009	21,6	2011
Febrero	17,9	2012	21,2	2010
Marzo	17,9	2012	21,3	2010
Abril	18,3	2009	22,4	2016
Mayo	16,8	2003	22	2011
Junio	19,7	2002	23,9	2009
Julio	20,2	2013	28,3	2008
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	22,9	2006

Tabla 3. Valores máximos y mínimos de temperatura según mes (Puertos del Estado)

A partir de la tabla de valores anterior, se puede obtener una media de temperatura tanto máxima como mínima. Haciendo este cálculo obtenemos una media de temperatura mínima media de 19,53°C y un temperatura máxima media de 23,99°C, a partir de los cuales

se obtiene una media global de temperatura de 21,76°C.

Como puede observarse en las figuras y la tabla anteriores, la temperatura del agua del sur de Tenerife se encuentra en un intervalo comprendido entre los 18°C y los 25°C. A partir de dicho intervalo y de los valores de las medias tanto para las temperaturas máximas como para las mínimas, se ha decidido tomar un valor de temperatura del agua de mar para el municipio de Granadilla de Abona de 20°C. Este valor se ha escogido tan bajo dentro del intervalo de temperaturas, debido a que cuanto más bajo sea el valor de la temperatura del agua más viscosidad tiene la misma y por tanto mayor presión habría que aplicar a la entrada de las membranas, lo que se traduce en un mayor consumo específico. Es por este motivo que se elige un valor relativamente bajo de temperatura del agua de alimentación, con el fin de situarse en el peor caso desde el punto de vista energético. Además de ello, los valores recogidos de la página web de Puertos del Estado son referidos a la temperatura superficial del agua sobre la cual tiene mayor incidencia la acción del clima, con lo cual la temperatura del agua de alimentación tendrá una temperatura más baja y estable ya que como se comentará en el Anexo II se obtendrá a través de pozos de captación.

1.2.3. Introducción de datos a través de la interfaz del programa

Una vez se tiene los valores tanto de la composición como de la temperatura del agua se introducen los mismos en el programa, teniendo en cuenta que como se ha comentado en el análisis de soluciones del presente proyecto la captación de agua de mar se realiza a través de pozos cerrados. Debido a que la interfaz del programa está en inglés, para indicar el tipo de captación que se quiere en este caso se tiene que indicar la opción la opción de Sea Wellwater como se puede observar en la siguiente figura.

Water Type X

Feed Water Analysis

Select Water Source: Sea Wellwater

Select Water Type: User Defined

Ion	mg/l	meq/l	ppm as CaCO3
Calcium (Ca)	431.00	21.5081	1076.34
Magnesium (Mg)	1470.00	120.9628	6053.40
Sodium (Na)	11870.00	516.3115	25838.03
Potassium (K)	451.00	11.5351	577.26
Ammonia - N (NH4)	0.00	0.0000	0.00
Barium (Ba)	0.00	0.0000	0.00
Strontium (Sr)	10.00	0.2283	11.42
Iron (Fe)	0.00	0.0000	0.00
Manganese (Mn)	0.00	0.0000	0.00
Total Cations	14232.00	670.5457	33556.45
Sulfate (SO4)	3148.00	65.5396	3279.83
Chloride (Cl)	21364.27	602.6082	30156.62
Fluoride (F)	0.00	0.0000	0.00
Nitrate (NO3)	0.00	0.0000	0.00
Bromide (Br)	0.00	0.0000	0.00
Phosphate (PO4)	0.00	0.0000	0.00
Boron (B)	5.00	0.0386	1.93
Silica (SiO2)	1.00	0.0003	0.01
Hydrogen Sulfide (H2S)	0.00	0.0000	0.00
Bicarbonate (HCO3)	139.45	2.2854	114.37
Carbon Dioxide (CO2)	0.90	0.0000	0.00
Carbonate (CO3)	2.18	0.0727	3.64
Total Anions	24659.90	670.5457	33556.45

Note :- Alkalinity is user-input
Execute 'Balance' button first. If required, click on 'Add Sodium/Chloride'

Parameters

Total Alkalinity (ppm CaCO3): 120.00

TDS (mg/l): 38891.90

pH: 8.00

Temperature (C): 20.00

SDI: 4.00

Recovery (%): 45

Saturation Data (Feed Water)

BaSO4: 0.00 %

CaF2: 0.00 %

CaSO4: 24.90 %

SiO2: 0.79 %

SrSO4: 22.57 %

Struvite: 0.000 %

LSI: 0.53

Stiff-Davis Index: 0.06

Osmotic Pressure: 27.68 bar

Conductivity at 25C: 56294 µS/cm

Density: 1025.4 kg/m3

Buttons: Multiple Feed, Design Guidelines, Add Sodium, Add Chloride, Clear Values, Balance, Export, Import, Cancel, OK

Figura 4. Interfaz del programa Winflows para la introducción de los parámetros del agua de alimentación.

Seguidamente una vez se han definido las características del agua de alimentación se pasa a la introducción del caudal que se quiere obtener como permeado. Dicho caudal tendrá un valor de 4500 m³/día como se ha indicado en el apartado de Requisitos de Diseño. El mismo, se destinará a cubrir parte de la demanda del sector agrícola del municipio con el fin de asegurarlo incluso en épocas de escasez de recurso hídrico.

Además para llevar a cabo la simulación se ha decidido fijar una serie de parámetros desde el inicio del diseño. Éstos se han definido teniendo en cuenta los valores normales para los procesos de desalación de agua de mar a través del método de ósmosis inversa:

- Tasa de conversión = 45 %
- Etapas para llevar a cabo el proceso = 1

Figura 5. Interfaz para la elección de los ratios de flujo.

1.3. Elección de las membranas

El siguiente paso a seguir es la elección de la configuración de nuestro núcleo de desalación, es decir, la elección de los diferentes componentes que van a formar parte del mismo. El programa da elegir infinidad de ellas, pero en el caso que se está estudiando se elegirá como ya se ha comentado un núcleo de desalación conformado por una sola etapa con la incorporación de un recuperador de energía.

Cabe destacar que aunque el programa da la facilidad de incorporar el recuperador de energía en los cálculos, no se introducirá para el dimensionado de la matriz de membranas debido a que no se da la facilidad de variar ningún parámetro del mismo. Esta restricción imposibilita la integración de los valores de recuperadores de energía de otras empresas, con lo cual solo se realizará el cálculo con el recuperador de energía que nos da el programa con el fin de compararlo con los ofrecidos por otros suministradores.

Por tanto, a continuación se pasa a elegir el modelo de membranas a usar en la instalación bajo estudio, obviando, como ya se ha comentado, la incorporación de cualquier sistema de recuperación de energía.

La compañía General Electric, a través del programa de dimensionado de membranas ofrece multitud de membranas según el uso al que estén destinados y a su vez dentro de cada uno de los usos nos ofrece distintas clases de membranas. Para la desalación de agua de mar, se ofrecen las series de membranas que se pueden ver en la siguiente figura.

AD Series

High Rejection Seawater RO Elements

AE HR Series

High Rejection Low Energy Seawater RO Elements

Figura 6. Series de membranas para desalación de agua de mar (Winflows)

Con el fin de centrar el dimensionado en un solo tipo de membranas, se ha decidido realizar el mismo teniendo en cuenta únicamente las membranas de la serie que tiene un menor consumo específico. Por tanto en este caso, se tendrán en cuenta las membranas de la serie AE HR Series.

La serie AE HR de elementos de membrana de ósmosis inversa con película delgada se caracterizan por un excelente rechazo de cloruro de sodio. Esta serie se selecciona cuando el agua de alimentación es relativamente alta en TDS y además se exige al permeado una excelente calidad. Las características tanto físicas como químicas de este nuevo tipo de membranas proporcionan excelentes características de rechazo cuando se opera en condiciones de funcionamiento características en la desalación de agua de mar (presiones superiores a 800 psi).

Model ¹	Type	Dimensions, inches (cm)			Boxed Weight lbs (kg)
		A	B ²	C	
AE-90	Male	40.0 (101.6)	0.75 (1.90)	3.9 (9.9)	9 (4)
AE-400, 34	Female	40.0 (101.6)	1.125 (2.86)	7.9 (20.1)	35 (16)
AE-440	Female	40.0 (101.6)	1.125 (2.86)	7.9 (20.1)	35 (16)

Figura 7. Pesos y dimensiones de las membranas de la serie AE HR

Solo se realizará el dimensionado del núcleo de membranas con las que tengan un diámetro de ocho pulgadas, que es el diámetro típico para la desalación de agua de mar. Teniendo en cuenta este requisito dimensional y en vista de los datos ofrecidos por la figura anterior, se descartaran las membranas del tipo AE-90 debido a que poseen un diámetro de aproximadamente cuatro pulgadas, con lo cual no serían las adecuadas para la producción de la planta desaladora bajo estudio.

1.3.1. Cálculo del número de membranas

Una vez definidas las membranas, que se tendrán en cuenta para el dimensionado del núcleo de desalación se debe hallar la cantidad aproximada de cada una de ellas que se colocarán. Para ello se han seguido dos procedimientos diferentes, a partir de los datos que ofrece el programa para cada una de las membranas. En el primero de ellos se ha tenido en cuenta el flujo medio de permeado capaz de asimilar cada una de las membranas, y en el segundo el intervalo de flujo de funcionamiento típico para las mismas.

1.3.1.1. A partir del flujo medio del permeado

Para llevar a cabo el dimensionado a partir de este procedimiento se han tenido en cuenta tanto el flujo medio de permeado por membrana como la producción de permeado de la planta.

Membrane	Thin-film membrane (TFM [®])			
Model	Average permeate flow gpd (m ³ /day) ^{1,2}	Average NaCl rejection ^{1,2}	Minimum NaCl rejection ^{1,2}	Minimum Boron Rejection ²
AE-90	2000 (7.6)	99.8%	99.3%	90.0%
AE-400, 34	9000 (34.1)	99.8%	99.3%	90.0%
AE-440	9900 (37.5)	99.8%	99.3%	90.0%

¹ Average salt rejection after 24 hours operation. Individual flow rate may vary +25%/-15%.

² Testing conditions: 32,000mg/l NaCl & 5mg/l Boron solution at 800psi (5,516kPa) operating pressure, 77°F (25°C), pH 8.0 and 10% recovery.

Figura 8. Especificaciones de los elementos de la serie AE HR.

Para conocer el número de membranas aproximado, se ha dividido la producción de permeado (4500 m³/día) entre el flujo medio de permeado que es capaz de producir cada membrana. Este valor de flujo medio se ha obtenido a través de los datos que ofrece la figura 8 y los resultados de la operación que se ha llevado a cabo se muestran en la siguiente tabla de valores.

Modelo	Flujo medio de permeado (m ³ /día)	Número de membranas
AE-400,34	34,1	132
AE-440	37,5	120

Tabla 4. Número de membranas en función del flujo medio de permeado.

Una vez calculado el número de membranas para cada uno de los tipos, se debe hallar el número de tubos de presión que depende de las membranas que coloquemos en los mismos. Las configuraciones habituales son tubos de presión con seis o siete membranas, con lo cual se realizarán los cálculos para ambos casos.

Modelo	Número de membranas	Nº tubos de presión (6 membranas)	Nº tubos de presión (7 membranas)
AE-400,34	132	22	19
AE-440	120	20	17

Tabla 5. Número de tubos de presión obtenidos a través del primer procedimiento.

Lo siguiente que se debe hacer, es introducir los resultados en el programa de dimensionado de las membranas y comprobar cuáles son los resultados que aporta el mismo. Para la introducción de los datos en el programa se hace uso de la interfaz que ofrece el programa y que se puede ver en la figura 9.

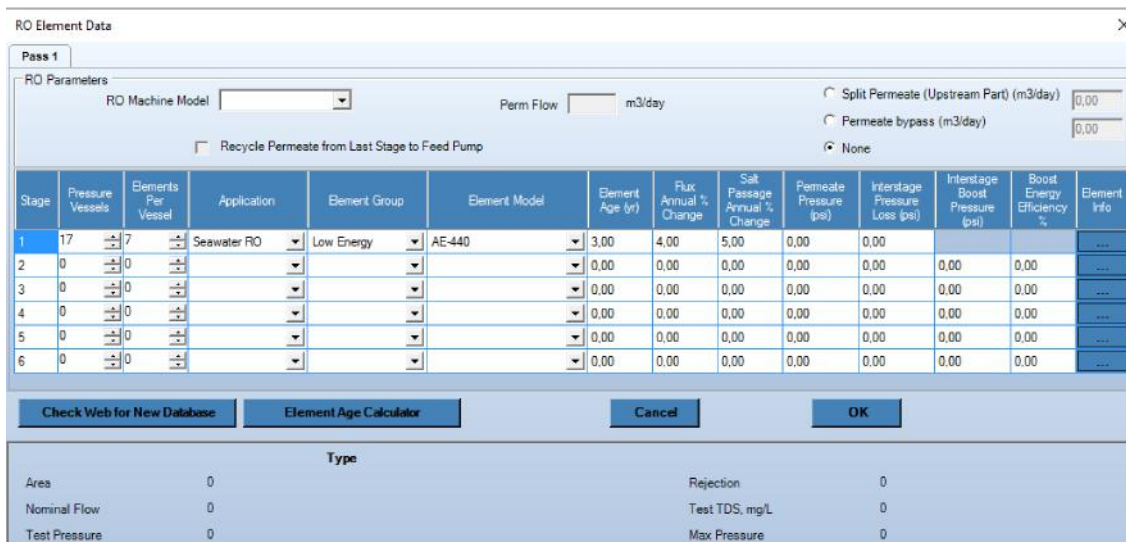


Figura 9. Interfaz del programa para la elección de las membranas.

Como se puede observar en la imagen se deben de elegir los tubos de presión (Pressure Vessels), el número de membranas por cada tubo (Elements per Vessel), la aplicación para la que destina el uso de las membranas (en el caso de estudio la desalación de agua de mar), la serie a la que pertenecen las membranas y por último el modelo de membrana exacto.

Además de ello, el cálculo se suele realizar colocando una edad de la membrana de entre tres y cinco años con el fin de dimensionarlas teniendo en cuenta el envejecimiento de

las membranas. En el caso de estudio como se puede observar en la figura se ha establecido una edad de las mismas de tres años.

A través de la introducción de los datos anteriormente calculados y teniendo en cuenta el ya mencionado dato de la edad de las membranas, se obtienen numerosos errores que hacen inviable estas configuraciones para el núcleo de desalación. En todos los casos el programa hace referencia a errores de exceso tanto de flujo como de presión en algunos elementos como se puede observar en la figura 10, con lo cual este primer procedimiento para el dimensionado del núcleo de desalación aporta unos valores que no se encuentran dentro del intervalo de funcionamiento correcto. Por este motivo, descartamos este procedimiento para el cálculo del número de membranas.

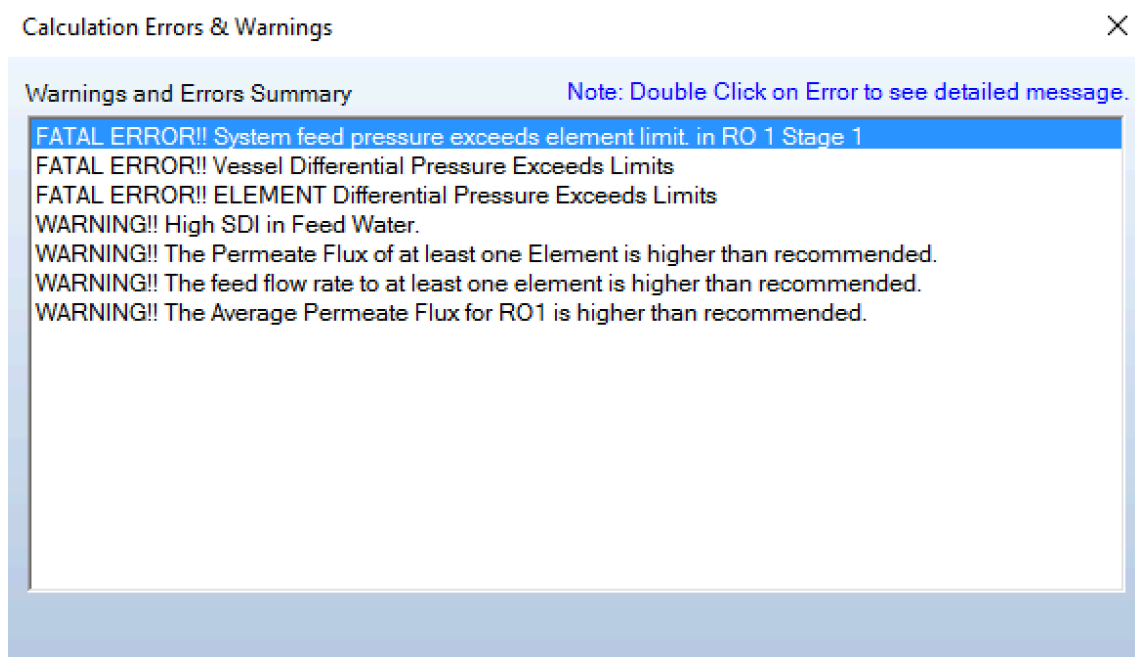


Figura 10. Interfaz de errores del programad de dimensionado de membranas (Winflows)

1.3.1.2. A partir del flujo de funcionamiento típico de las membranas.

En este procedimiento se ha calculado el número de membranas a través del flujo de funcionamiento típico que indica el programa para cada una de las membranas. Este flujo queda indicado en la siguiente figura.

Typical Operating Pressure	800psi (5,516kPa)
Typical Operating Flux	7-11GFD (12-19LMH)
Maximum Operating Pressure	1,200psi (8,274kPa)
Maximum Temperature	Continuous operation: 122°F (50°C) Clean-In-Place (CIP): 122°F (50°C)
pH range	Optimum rejection pH: 7.0-7.5, Continuous operation: 4.0-11.0, Clean-In-Place (CIP): 2.0-11.5
Maximum Pressure Drop	Over an element: 12 psi (83 kPa) Per housing: 50 psi (345 kPa)
Chlorine Tolerance	1,000+ ppm-hours, dechlorination recommended
Feedwater ³	NTU < 1 SDI < 5

Figura 11. Parámetros de funcionamiento de las membranas de la serie AE HR (Winflows).

Como se puede observar en la figura, el flujo típico de operación viene definido en un intervalo (12-19 LMH). En el caso de estudio se escogerá un valor intermedio para llevar a cabo el dimensionamiento de las membranas, para obtener unos resultados a partir de los cuales las membranas trabajen en condiciones medias con el fin de alargar su vida útil siendo lo más eficientes posibles. Por tanto, se escoge un valor de 15 LMH.

Cabe apuntar que las unidades en las que se da el flujo típico de funcionamiento, LMH, hacen referencia a litro partido por metro cuadrado y hora ($\frac{l}{m^2 \cdot h}$).

El primer paso que se lleva a cabo es el cambio de unidades del flujo de permeado de la planta desaladora, para que coincida con las unidades en las que se encuentra el flujo típico de funcionamiento.

$$\text{Flujo de permeado} = 4500 \frac{m^3}{día} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} * \frac{1000 \text{ litros}}{1 m^3}$$

$$\text{Flujo de permeado} = 187500 \frac{l}{h}$$

Una vez que se tiene el flujo de permeado en las unidades correctas, se relaciona con el flujo típico de funcionamiento para obtener el área de membrana necesaria para llevar a cabo la desalación.

$$\text{Área de membrana necesaria} = \frac{\text{Flujo permeado}}{\text{Flujo típico funcionamiento}} = \frac{187500 \frac{l}{h}}{15 \frac{l}{m^2 * h}}$$

$$\text{Área de membrana necesaria} = 12500 \text{ m}^2$$

Como se puede observar el área necesaria para llevar a cabo el proceso de ósmosis inversa teniendo en cuenta el flujo típico de las membranas que se ha escogido es de 12.500 metros cuadrados. A partir de dicha área se debe de calcular el número de membranas teniendo en cuenta para ello el área activa que tiene cada una de ellas, dependiendo el tipo. Este último valor viene dado en la siguiente figura que aporta el programa con el valor de dicho área dependiendo del modelo de membrana.

Model	Active area ft ² (m ²)	Outer wrap	Part number
AE-90	90 (8.4)	Fiberglass	3056660
AE-400, 34	400 (37.2)	Fiberglass	3056662
AE-440	440 (40.9)	Fiberglass	3056663

Figura 12. Áreas activas según tipo de membrana (Winflows)

Relacionando los metros cuadrados necesarios para llevar a cabo la desalación de 4500 m³/día con el área activa de cada una de las membranas, se obtiene el número de membranas que se presenta en la siguiente tabla.

Modelo	Área (m ²)	Nº de membranas
AE-400,34	37,2	337

AE-440	40,9	306
--------	------	-----

Tabla 6. Número de membranas según flujo típico de operación

Lo siguiente que se debe hacer es calcular el número de tubos de presión que se debe colocar teniendo en cuenta el número de membranas que se coloca en cada uno de ellos. Al igual que en el procedimiento anterior solo se tendrán configuraciones de tubos de presión con seis o siete membranas para el cálculo.

Modelo	Nº de membranas	Nº tubos de presión (6 membranas)	Nº tubos de presión (7 membranas)
AE-400,34	337	57	49
AE-440	306	51	44

Tabla 7. Número de tubos de presión teniendo en cuenta el flujo típico de funcionamiento.

Debido al menor número de tubos de presión que se obtiene para el caso de las membranas de modelo AE-440 escogeremos éstas para el núcleo de desalación de la planta desaladora en estudio. Esto es debido a que cuanto menor número de tubos de presión que se tengan, menor será el bastidor que tiene que sustentar a los mismos disminuyendo el su tamaño y facilitando de esta manera las tareas de mantenimiento u otras que se deban realizar sobre los mismos.

Estas menores dimensiones del bastidor y la facilidad de mantenimiento que ello conlleva, se refleja en unos tiempos menores en la realización de mantenimientos de los mismos, menor espacio necesario para su ubicación ,etc. Estas ventajas se traducen en una reducción de costos, razón que justifica nuestra elección del tipo de membranas.

Finalmente una vez elegido el tipo de membranas a usar en la instalación, se introducen los datos en el programa con el fin de conocer con la configuración elegida el problema indica problemas de funcionamiento o no.

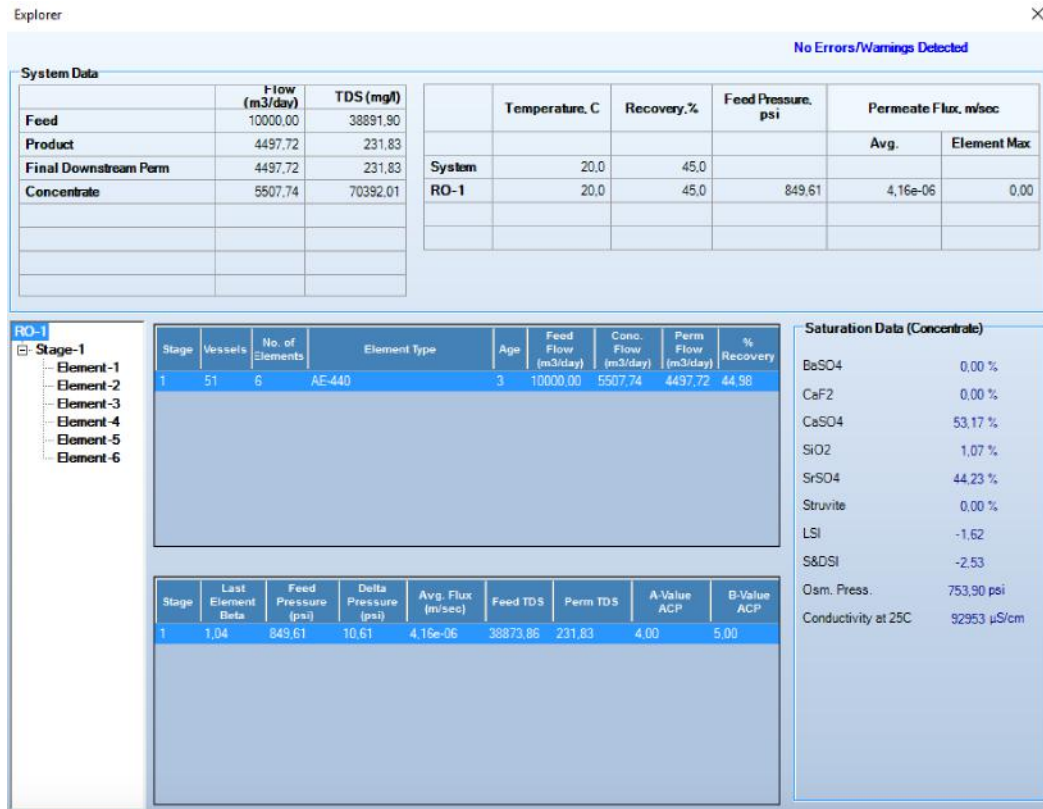


Figura 13. Interfaz de resultados para la configuración de 51 tubos de presión de 6 membranas cada uno (Winflows)

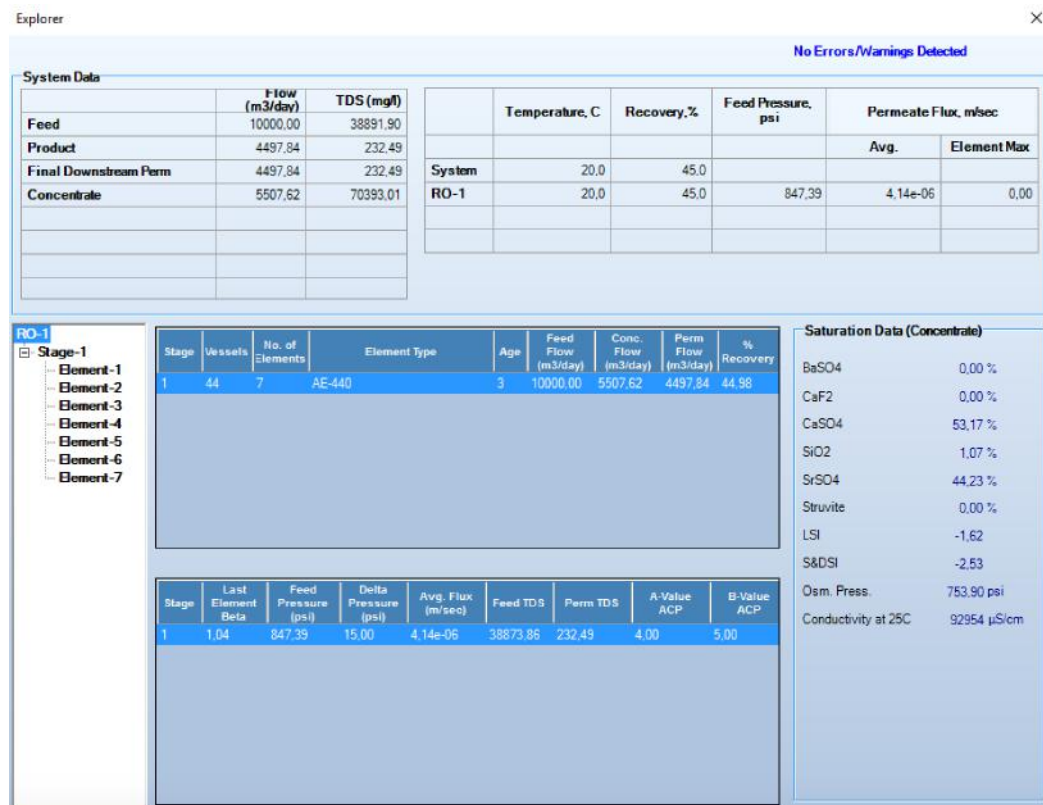


Figura 14. Interfaz de resultados para la configuración de 44 tubos de presión de 7 membranas cada uno (Winflows)

Como se puede observar a través de la interfaz de resultados que se obtiene para cada una de las dos configuraciones no existe ningún tipo de problema de funcionamiento y de incompatibilidad con límites establecidos, con lo cual este segundo procedimiento de cálculo se toma como bueno para determinar el número de membranas.

Con el fin de elegir entre la configuración de seis o siete membranas por tubo, se han tomado las mismas premisas que se tuvieron en cuenta para la elección del tipo de membrana a usar. Es decir, se optará por la configuración de siete tubos por membrana por la reducción de espacio y dimensiones, y los consiguientes beneficios a lo que ello está asociado. Además la calidad del agua que se obtiene a través de las dos configuraciones es similar con lo cual no afecta en la decisión tomada.

1.4. Comparación entre diferentes membranas

Para acabar con la elección y el dimensionado de las membranas que formarán parte del núcleo de desalación de la instalación bajo estudio, se realizará una comparación de la configuración elegida variando el número de tubos de presión.

Nº de tubos de presión	TDS (mg/L)	Presión de alimentación (psi)	Consumo específico (kWh/m ³)
40	210,88	870,81	3,70
44	232,49	847,39	3,61
50	265,2	821,28	3,50

Tabla 8. Comparación entre distintas configuraciones para el núcleo de desalación

Como se puede observar en la tabla anterior se ha comparado distintos parámetros obtenidos a través de diferentes configuraciones para el núcleo de desalación, con el fin de escoger la mejor. Se han tenido en cuenta para realizar la comparación el TDS producto, la presión de alimentación de las membranas y el consumo específico que nos da el Winflows sin recuperador de energía y suponiendo un rendimiento de la bomba de alta presión del 100 %.

En la comparación se puede observar que la variación de los parámetros no es muy significativa pesar del cambio de número de tubos de presión. Los valores de TDS bajan a medida que disminuimos los tubos de presión y el consumo sube debido a que se han de alimentar las membranas con una mayor presión para que se produzca el proceso de ósmosis inversa.

1.5. Selección de la membrana y resultados obtenidos

Tras haber estudiado todos los parámetros que se han considerado necesarios para llevar a cabo el dimensionado de las membranas del núcleo de desalación se ha tomado la decisión de que el mejor diseño es el de instalar 44 tubos de presión de 7 membranas de tipo AE-440 cada uno.

Esta configuración se ha elegido debido a que cumple con los requisitos preestablecidos al igual que es la mejor en cuanto a la menor cantidad de membranas, consumo y calidad del agua en comparación con el resto de configuraciones estudiadas.

Cabe destacar que en los procesos de desalación mediante ósmosis inversa la presión de alimentación de las membranas suele ser más alta de lo que se ha elegido para este caso, ya que suele estar por encima de los 870-900 psi. En este caso se ha elegido un valor algo más bajo por dos razones principales:

- Se ha buscado el menor consumo específico posible para la planta desaladora, con el fin de asegurar el funcionamiento de la misma, disminuyendo las posibilidades de la necesidad de energía eléctrica externa en caso de una menor producción por parte de los aerogeneradores.
- La calidad del permeado, a pesar de la relativa baja presión de alimentación, es muy buena gracias al uso de membranas de nuevo desarrollo.

Este hecho de la calidad del agua permeada se puede observar en la tabla de valores que ofrece el programa Winflows, en la cual se muestran la composición química resultante

del proceso de desalación tanto la de la salmuera como la del permeado que es la que nos interesa.

Ions, mg/l		Product	Concentrate
Calcium		0.65	782.03
Magnesium		1.70	2667.66
Sodium		83.26	21484.09
Potassium		4.46	815.23
Ammonia - N (NH ₄)		0.00	0.00
Barium		0.00	0.00
Strontium		0.02	18.14
Iron		0.00	0.00
Manganese		0.00	0.00
Sulfate		2.84	5869.47
Chloride		136.20	38679.36
Fluoride		0.00	0.00
Nitrate		0.00	0.00
Bromide		0.00	0.00
Phosphate		0.00	0.00
Boron		1.40	7.93
Silica		0.01	1.81
Hydrogen Sulfide		0.00	0.00
Bicarbonate		1.97	67.27
Carbon Dioxide		75.96	75.44
Carbonate		0.00	0.01
TDS, mg/l		232.49	70393.00
Flow	m ³ /day	4497.84	5507.62
Temperature	C	20.00	20.00
Pressure	bar	0.00	57.39
Osm. Pressure	bar	0.23	51.98
pH		4.62	5.60
Conductivity at 25C	μS/cm	486.00	92954.00
Saturation Data			
BaSO ₄	%	0.00	0.00
CaF ₂	%	0.00	0.00
CaSO ₄	%	0.00	53.17
SiO ₂	%	0.00	1.07
SrSO ₄	%	0.00	44.23
Struvite	%	0.00	0.00
LSI		-5.10	-1.62
S&DI		-7.15	-2.53

Figura 15. Composición química de los flujos resultantes del proceso de desalación, el permeado (product) y la salmuera (concentrate).

Además, si comparamos los mismos con los de la figura siguiente en la que se muestran los valores frecuentes del agua para riego, se puede comprobar que la calidad del permeado cumple con los valores exigidos.

	Parámetros de calidad	Símbolo	Unidad	Intervalo usual en agua de riego
1	Salinidad			
	Contenido de sales			
	Conductividad eléctrica	CEa	$\mu\text{S}/\text{cm}$	0 – 3000
		CEa	dS/cm	0 – 3
	Materia disuelta total	MDT	mg/L	0 – 2000
	Cationes y aniones			
	Calcio	Ca^{++}	mg/L	0 – 400
	Magnesio	Mg^{++}	mg/L	0 – 60
	Sodio	Na^{+}	mg/L	0 – 900
	Carbonatos	CO_3^{--}	mg/L	0 – 3
	Bicarbonatos	HCO_3^{-}	mg/L	0 – 600
	Cloruros	Cl^{-}	mg/L	0 – 1100
	Sulfatos	SO_4^{--}	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 16. Valores frecuentes para el agua de riego (José Miguel Veza).

ANEXO II

SELECCIÓN DE BOMBAS Y SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA. CÁLCULOS HIDRÁULICOS

2. Selección de bombas y recuperación de energía

En el presente anexo se harán los cálculos necesarios para la elección del sistema de bombas y recuperación de energía que se instalarán en la planta desaladora bajo estudio. La selección de todo ellos se hará bajo la premisa del máximo rendimiento.

El primer sistema que se dimensionará será el de recuperación de energía, ya que de la eficiencia que posea el mismo depende el dimensionado tanto de la bomba booster como de la bomba de alta presión. Esto es debido a que un mayor rendimiento del mismo se traduce en un mayor aprovechamiento de la energía contenida en el flujo de agua producto o salmuera, la cual puede ser aprovechada transmitiéndosela directamente en forma de presión al agua de alimentación de la planta (intercambiador de presión), aprovechando la misma para realizar parte del trabajo de la bomba de alta presión reduciendo el consumo de la misma (turbina Pelton), etc.

2.1. Comparativa entre distintos sistemas de recuperación de energía

Debido a la gran cantidad de sistema de recuperación de energía existentes, haremos una comparativa a través del programa Winflows, teniendo en cuenta la matriz de membranas calculadas en el Anexo I, para averiguar cuál es el más eficiente en las condiciones de servicio de la instalación.

2.1.1. Turbo-charger

Este dispositivo combina en una misma unidad bomba y turbina, pero al contrario que en otras turbinas de recuperación a través de las cuales se transforma la energía de presión o de velocidad en energía mecánica que a su vez es transmitida a través de un eje se aprovecha para ayudar a una bomba o a un motor, éste lo que hace es transferir la energía de una corriente de líquido a otra corriente de líquido distinta.

No está por tanto unido a ningún motor como las otras turbinas de recuperación, como por ejemplo la turbina Pelton, es por ello que puede aplicarse es distintos puntos del circuito de una instalación de ósmosis inversa.



Figura 17. Turbo-charger de la empresa Energy Recovery.

Está compuesto por una sección que funciona como una bomba y otra que lo hace como una turbina, provista cada una de ellas de un impulsor y compartiendo un eje común. El impulsor de la turbina extrae la energía hidráulica de la salmuera y la convierte en energía mecánica que es aprovechada por el impulsor de la bomba, gracias al eje común, para elevar la presión del agua de alimentación.

2.1.2. Turbina Pelton

Este tipo de turbina de impulsión transforma la energía cinética de un fluido en energía mecánica rotativa, la cual disminuye el consumo del motor debido a que comparten el mismo eje.



Figura 18. Turbina Pelton.

El funcionamiento de este dispositivo, consiste en que una boquilla dirige el chorro de líquido tangencialmente a la rueda de la turbina. La base del sistema es esta boquilla de la que emerge el agua como un chorro compacto que entra en la rueda. En el borde de dicha rueda aparecen distribuidas las cazoletas propias de la turbina Pelton, como se puede observar en la figura 2, que para conseguir una descarga mejor del agua aparecen divididas por un borde o repartidor en dos partes simétricas. El chorro de agua es desviado por las cazoletas que transfieren la energía del mismo a la rueda y esta a su vez al eje del motor.

Cabe destacar que la curva de eficiencia de la turbina Pelton es muy plana, con lo cual esta se mantiene en torno al punto de mayor eficiencia aún con grandes variaciones de caudal.

2.1.3. Intercambiador de presión

Este es el sistema de recuperación de energía más usado en la actualidad. A través de este dispositivo la energía en forma de presión se transfiere directamente del flujo de salmuera al flujo de agua de alimentación. Este intercambio de energía se produce en la cámara de presión situada dentro del mismo, consiguiéndose unas eficiencias en dicha transferencia energética muy altas, llegando a valores en torno al 98% según el principal fabricante (Energy Recovery). El mayor problema que se da en este tipo de intercambiadores es que debido a su principio de funcionamiento se produce una pequeña mezcla volumétrica entre la corriente de salmuera y la de agua de alimentación, aunque tiene poca relevancia a la hora de realizar los cálculos.



Figura 19. Intercambiador de presión de la compañía Energy Recovery (Energy Recovery).

El intercambiador de presión está compuesto principalmente por dos cilindros fijos laterales los cuales poseen dos orificios, uno encargado de introducir el fluido y el otro a través del cual sale el mismo del dispositivo, y un cilindro central giratorio provisto de orificios en los cuales se produce la transferencia de energía. En el cilindro central se encuentra una pequeña placa en cada uno de sus orificios que se encarga de evitar la mezcla entre los fluidos mientras se produce la transferencia entre los mismos.

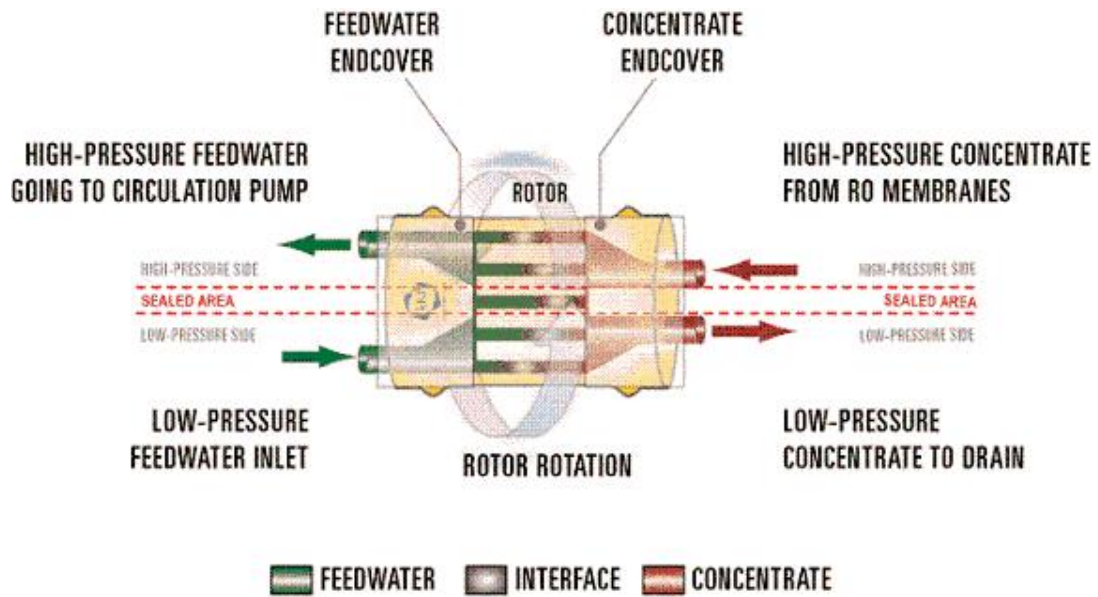


Figura 20. Funcionamiento de un intercambiador de presión.

El funcionamiento es sencillo, como se puede observar en la figura 4 por uno de los orificios laterales entra el agua de alimentación de baja presión mientras el cilindro central gira hasta encontrarse con la entrada de salmuera a alta presión. Ésta se encarga de comprimir el agua de alimentación elevando la presión de la misma mientras continua girando el cilindro hasta encontrarse con el orificio de salida de dicho agua que saldrá a alta presión, mientras que la salmuera saldrá por su orificio de salida lateral a baja presión.

Gracias al intercambiador de presión, el flujo que pasa por la bomba de alta presión es bastante más bajo con la consecuente disminución del consumo de la misma. Cabe destacar que este equipo siempre va acompañado de una bomba de circulación para igualar la presión de salida del intercambiador con la de salida de la bomba de alta presión, conocida como bomba Booster.

Además de este sistema de transferencia de energía en forma de presión directamente, existe otro de funcionamiento muy similar pero con una disposición mecánica diferente. El intercambio en este caso se lleva a cabo en dos tubos horizontales que separan ambas corrientes a través de un disco. La presión se transmite por medio de pistones de movimiento lento situado en ambos tubos, actuando los mismo de manera alternativa ya que mientras un tubo está en descara el otro esta presurizado y viceversa. El funcionamiento de este otro tipo de intercambiador se puede ver en la siguiente figura.

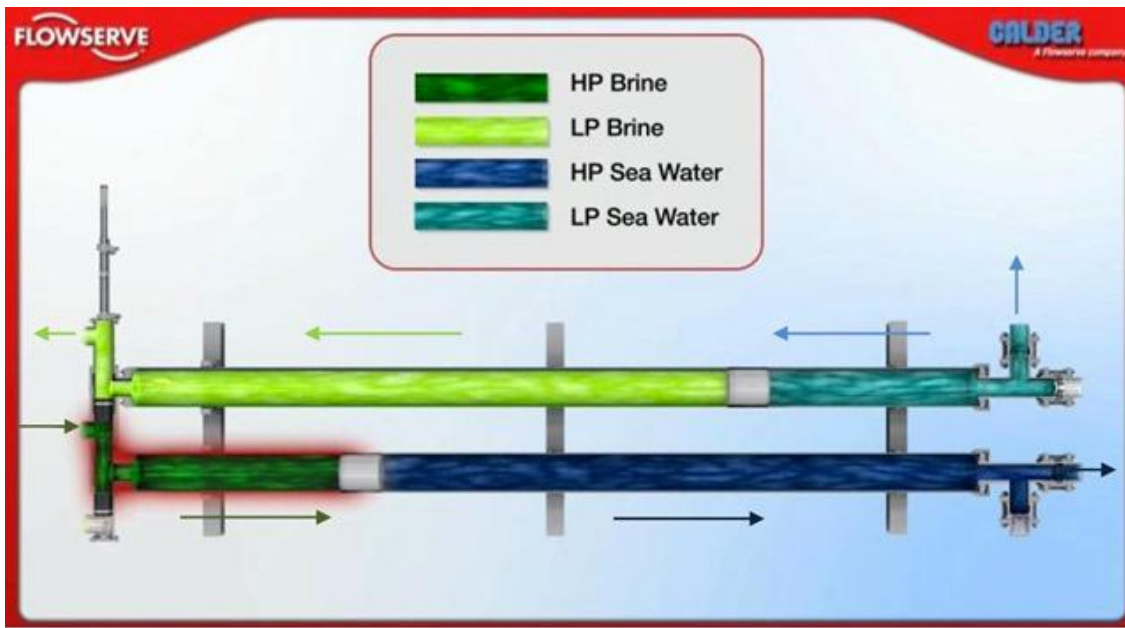


Figura 21. Funcionamiento intercambiador de Flowserve.

Como se puede observar en la figura el funcionamiento alternativo entre los dos tubos de presión se produce gracias a un émbolo situado en el colector de salmuera, el cual se encarga de conducir el fluido para cada uno de los orificios según convenga en cada caso. Por ejemplo en la figura se puede observar como gracias a la acción de dicho émbolo la salmuera de alta presión (HP brine) se dirige hacia el tubo que está lleno de agua de mar a baja presión, transmitiéndole presión a la misma. Mientras esto sucede en el tubo inferior, en el superior la salmuera a baja presión (LP brine) se dirige hacia la salida de la misma permitiendo el llenado del tubo. Una vez finalicen los movimientos comentados, se producirá el mismo ciclo pero en los tubos opuestos.

2.2. Selección del sistema de recuperación más adecuado

Con el fin de realizar una elección del sistema de recuperación más adecuada para la planta de desalación bajo estudio, se configurará en el programa de dimensionado de membranas el funcionamiento del núcleo de desalación haciendo uso de los diferentes sistema de recuperación de energía.

El parámetro que tendremos en cuenta para seleccionar cual es el sistema de recuperación de energía más eficiente será el consumo específico que nos indique el

software que tiene el núcleo de desalación con cada uno de ellos, eligiendo el que nos aporte un consumo más reducido.

Para realizar el estudio se supondrá un rendimiento de la bomba de alta presión del 100% y se mantendrá el diseño de las membranas calculado en el Anexo I.

Sistema de recuperación de energía	Consumo específico (kWh/m ³)
Sin recuperación de energía	3,61
Turbina Pelton	2,48
Turbo-charger	2,67
Intercambiador de presión	1,74

Tabla 9. Consumo específico según sistema de recuperación de energía utilizado.

Como se puede comprobar en la tabla anterior, a través de los datos extraídos del programa Winflows, el sistema de recuperación de energía que hace que haya un menor consumo específico es el intercambiador de presión por lo tanto se tomará el mismo como el más adecuado.

Cabe destacar que para la realización del estudio se ha considerado un rendimiento de la bomba del alta presión del 100%, como se ha comentado anteriormente, y que no se han tenido en cuenta los consumo de otros sistemas de la EDAM, como pudiera ser el consumo de las bombas de captación y distribución. Debido a estos aspectos el consumo que se indica en la tabla no es el real de la planta, simplemente se ha usado como un parámetro para la selección del sistema de recuperación de energía a usar.

2.3. Intercambiador de presión seleccionado

Para la elección del intercambiador de presión que ofrezca una mayor eficiencia en las condiciones de trabajo de la planta desaladora bajo estudio, se ha llevado a cabo una búsqueda en las webs de los principales fabricantes que son Energy Recovery y Flowserve. Debido a la imposibilidad de ponerse en contacto con el primero de ellos para obtener las

credenciales necesarias con el fin de hacer uso de su programa de dimensionado de intercambiadores, se ha optado por la elección de los intercambiadores ofrecidos por Flowserve.

Flowserve ofrece para el dimensionado del intercambiador de presión una hoja Excel, a través de la cual podemos conocer el número de intercambiadores a usar, la eficiencia de los mismos, la energía que se ahorra con el uso de los mismos, etc. Además de ello, nos indica el consumo aproximado de las bombas de captación, Booster y de alta presión, aunque únicamente el estudio se centrará en el intercambiador por lo tanto se obviarán estos resultados.

Para hacer uso de la hoja Excel aportado por el fabricante se debe introducir una serie de datos que se muestran a continuación, extraídos del programa de dimensionado de membranas Winflows:

- Flujo de permeado = 4500 m³/día
- TDS producto = 232,49 mg/L
- TDS alimentación = 38891,9 mg/L
- Presión de alimentación de las membranas = 58,426 bar
- Caída de presión en las membranas = 1,03 bar
- Conversión de las membranas = 45 %

Estos datos se introducen en la interfaz que ofrece la hoja Excel que cede Flowserve para que la misma realice los cálculos, con el fin de obtener los parámetros de funcionamiento del intercambiador de presión:

DWEER™ Energy Recovery System Calculation Version E 3.0

Plant Data			Membranes		
Project Name	Test Projection		Feed TDS	ppm	38891,9
Client Name	Flowserve		Membrane Feed pressure	bar	58,426
Unit System	Metric / English	Metric	Membrane dP	bar	1,03
Product Flow	m3/d	4500	Membrane Conversion	%	45,0%
Product TDS	ppm	232,49			
Feed System					
<input type="radio"/> Common Feed for HP pump and ERS <input checked="" type="radio"/> Seperate Feed for HP pump and ERS					
ERS Feed Pump					
Number of Feed pumps	1				
Feed pump VFD controlled	Yes / No	No			
Feed pressure	bar	a			
Feed pump efficiency	% / a	a			
Feed pump motor efficiency	% / a	a			
HP Pump Feed Pump					
Number of Feed Pumps for HP pumps	1				
Feed pump VFD controlled	Yes / No	No			
Feed pump efficiency	% / a	a			
Feed pump motor efficiency	% / a	a			
ERS Design					
Number of ERS Trains	1		ERS Vessel Type	FRP	
ERS Design method	Maximal Flow		Amount of Overflush	% / a	a
Maximal HP Brine Flow per DWEER [m3/h]	320		Amount of Mixing	% / a	a
			ER Vessel utilisation	% / a	a

HP Pump		
Number of HP pumps	1	
HP pump VFD controlled	Yes / No	No
HP pump efficiency [%]	% / a	a
HP pump motor efficiency [%]	% / a	a
HP pump suction pressure	bar	a

Circulation Pump		
Number of Circulation pumps	1	
Circulation pump VFD controlled	Yes / No	No
Circulation pump efficiency	% / a	a
Circulation pump motor efficiency	% / a	a

Piping pressure losses		
HP feed piping losses	bar	0
HP brine piping losses	bar	0
LP feed piping losses	bar	0
LP brine backpressure	bar / a	a

Figura 22. Interfaz para la introducción de datos. Hoja Excel de dimensionado de intercambiador (Flowserve).

Como se puede comprobar en la figura anterior se han introducido los datos correspondientes a la instalación bajo estudio en el proyecto, obtenidos a través del Winflows en el Anexo I. Se ha obviado la introducción de los parámetros de las bombas ya que serán objeto de estudio en próximos apartados.

Seguidamente, como se puede comprobar en la zona inferior izquierda, se debe introducir el número de intercambiadores de trabajo sobre el que se quiera realizar el estudio. Variando la cantidad de los mismos se obtienen las eficiencias que se pueden observar en la siguiente tabla de valores.

Nº de intercambiadores	Eficiencia
1	98,30%
2	98,10%
3	96,80%

Tabla 10. Eficiencia de los intercambiadores dependiendo de la cantidad instalada.

Como se puede observar en la tabla anterior que se muestran los datos de eficiencia obtenidos a través de la hoja Excel, la configuración con un solo intercambiador es la mejor opción con un valor de eficiencia del 98,3 %.

A partir de la configuración seleccionada la hoja Excel presenta los parámetros de funcionamiento del núcleo de desalación en un diagrama que se puede observar en la figura 7.

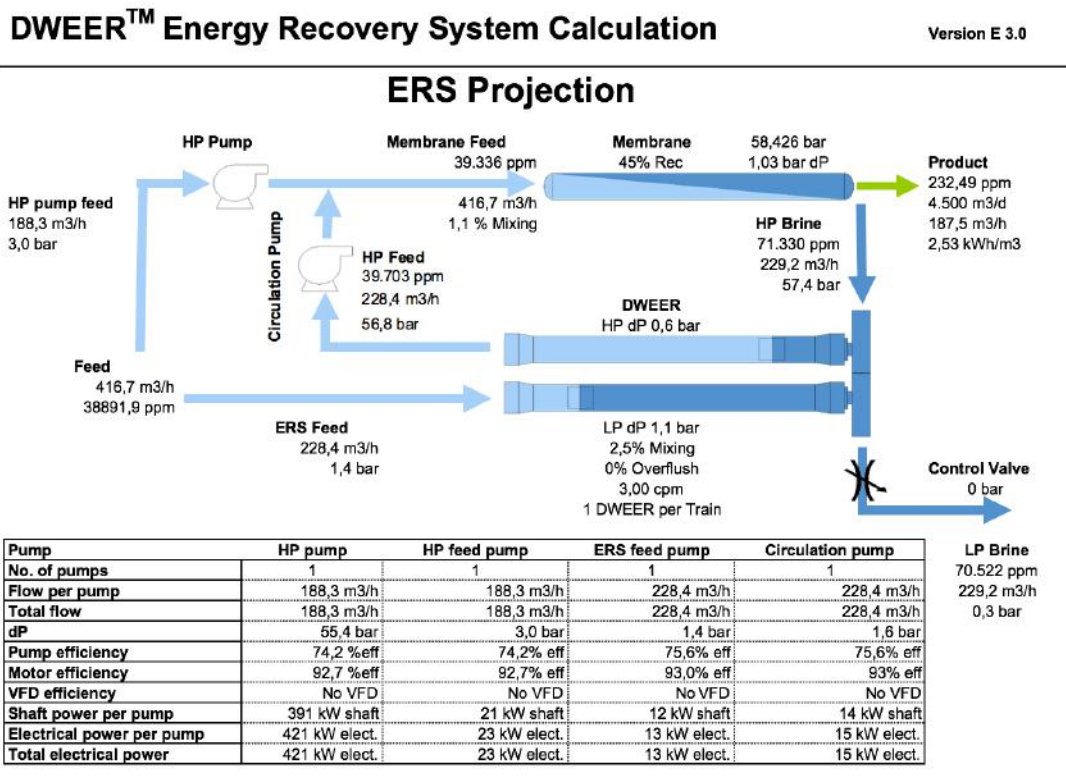


Figura 23. Diagrama del núcleo de desalación según hoja Excel (Flowserve).

Se puede observar en la figura anterior que no solo aparecen los datos de funcionamiento del intercambiador sino que también se indican sobre el diagrama los datos de los demás componentes del núcleo de desalación, pero como se ha comentado anteriormente solo se tendrán en cuenta los datos referentes al intercambiador.

Por tanto, en vista de los resultados obtenidos se elegirá el intercambiador de trabajo DWEER ofrecido la empresa Flowserve. Solo se instalará uno debido a la mayor eficiencia de esta configuración , llegando a un valor del 98,3 % de la misma.



Figura 24. Intercambiador de trabajo DWEER de Flowserve.

Por último, del diagrama del núcleo de desalación que aparece en la figura 7 se extrae en la tabla que se presenta a continuación los datos que pudieran resultar de interés para cálculos siguientes.

Nº de Intercambiadores	1
Eficiencia intercambiador	98,3 %
Caudal bomba de alta presión	188,3 m ³ /h
Presión de entrada bomba alta presión	3 bar
Caudal bomba	228,4 m ³ /h

Booster	
Presión de entrada bomba Booster	56,8 bar

Tabla 11. Parámetros de interés obtenidos mediante la hoja Excel (Flowserve).

2.4. Elección de la bomba booster

En el presente apartado se procederá a realizar los cálculos necesarios para el dimensionado y la elección de la bomba Booster. Para ello lo primero que se debe hacer es determinar la altura manométrica que debe de aplicarle la bomba al fluido, la cual se obtiene haciendo uso de la siguiente expresión.

$$H_{booster} = \frac{P_s - P_e}{\rho * g} + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2g} + z_B$$

donde:

- $P_s \equiv$ Presión de salida de la bomba
- $P_e \equiv$ Presión de entrada de la bomba
- $V_s \equiv$ Velocidad de salida de la bomba
- $V_e \equiv$ Velocidad de entrada de la bomba
- $\rho \equiv$ Densidad del agua
- $g \equiv$ aceleración de la gravedad
- $z_B \equiv$ cota a superar por la bomba

A la hora de realizar el cálculo anterior se han de tener en cuenta una serie de consideraciones que se enumeran a continuación:

- La variación de energía cinética, es decir, la variación de velocidad que se aparece en el segundo término de la ecuación se considerará despreciable ya que la bomba está destinada al aumento de presión.
- La cota a superar por la bomba también se considerará cero debido a que se encuentra a la misma altura que el resto de elementos de la instalación.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores la expresión para el cálculo de la altura de la bomba booster quedaría reducida de la siguiente manera:

$$H_{booster} = \frac{P_s - P_e}{\rho * g}$$

Una vez se tiene la expresión exacta para el cálculo de la altura de la bomba, se pasa a determinar cada uno de los parámetros de los que se compone la misma.

El primer paso consistirá en la determinación del valor de densidad del agua de alimentación. En este caso, para averiguar el valor del mismo se ha hecho uso de una aplicación Water Density Calculator desarrollada por la Universidad de Michigan. En esta aplicación web se han de introducir los valores de temperatura y TDS del agua para conocer la densidad de la misma.

Required Data Entry	
Water Temperature in Degrees	C <input type="text" value="20"/> F <input type="text" value="68"/>
Water Salinity (TDS)	<input type="text" value="38891,9"/> mg/L or PPM
<input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Clear Values"/>	
Calculated Results	
Water Density	<input type="text" value="1026.905"/> kg/m ³

Figura 25. Interfaz de la aplicación online Water Density Calculator.

Como se puede comprobar en la imagen anterior, una vez introducimos los valores de entrada ya comentados obtenemos un valor de la densidad del agua de alimentación de 1027,762 kg/m³.

Seguidamente una vez se ha hallado el valor de velocidad se han de cambiar las unidades en las que se encuentra la presión para obtener la altura de la bomba en metros directamente. Para ello se debe de pasar a Pa, ya que esta última unidad equivale a $\frac{kg}{m*s^2}$, anulándose de esta manera el resto de unidades quedándose la altura en metros.

$$- P_e = 56,8 \text{ bar} * \frac{100000 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}} \rightarrow P_e = 5680000 \text{ Pa}$$

$$- P_s = 58,426 \text{ bar} * \frac{100000 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}} \rightarrow P_s = 5842600 \text{ Pa}$$

Una vez se han puesto las presiones en la unidad correcta y conociendo que la aceleración de la gravedad tiene un valor de 9,81 m/s², se sustituye en la expresión y se obtiene la altura necesaria para la bomba Booster.

$$H_{booster} = \frac{5842600 \text{ Pa} - 5680000 \text{ Pa}}{1027,762 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$H_{booster} = 16,127 \text{ m}$$

Seguidamente, después de haber obtenido el valor de la altura de la bomba, se han consultado distintos fabricantes con el fin de elegir la que diera un rendimiento más alto. Para ello se han tenido en cuenta los datos que se muestran a continuación para la correcta selección de la bomba Booster:

- Altura bomba Booster = 16,127 m
- Caudal bomba Booster = 228,4 m³/h
- Temperatura del agua = 20 °C

Los fabricantes que se han consultado para llevar a cabo la selección son los que se presentan a continuación:

- Flowserve

La compañía Flowserve ofrece una herramienta online de selección de bombas que recibe el nombre de Affinity. A partir de la introducción de los parámetros de funcionamiento de la Booster, ofrece una lista con distintas bombas y configuraciones de las mismas que se adaptan a las condiciones de trabajo. Dentro de la lista se ha elegido la que tuviera un mayor rendimiento, siendo ésta la bomba con denominación 2K6x4M-10HRV M3SM, la la misma posee un rendimiento del 83,4 % como se puede observar en la figura 11.

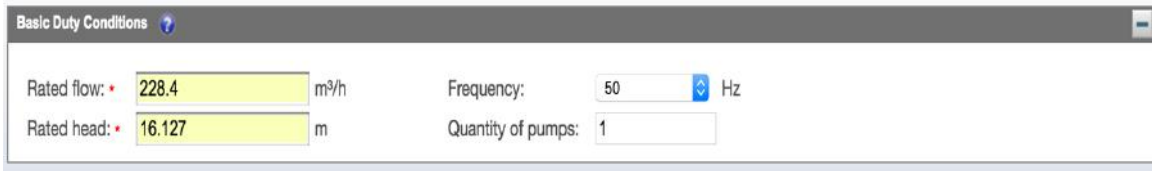


Figura 26. Ventana gráfica de la herramienta de selección de bombas Affinity para introducirlos datos de funcionamiento..

En la propia figura número 11 se indica con un triángulo rojo el punto de trabajo de la bomba. A partir del mismo, prolongándolo una línea por todas las gráficas se pueden obtener todos los parámetros de funcionamiento de la bomba.

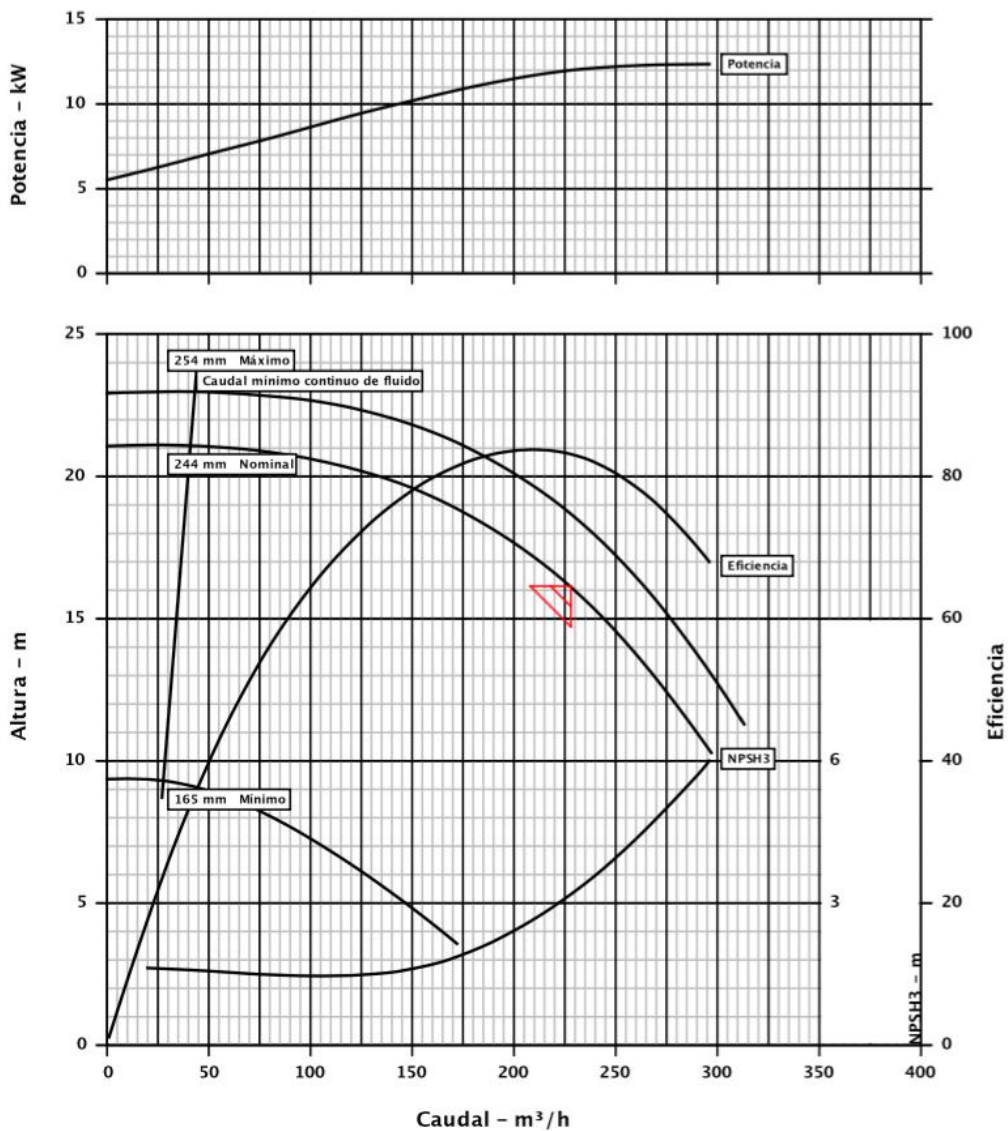


Figura 27. Curvas características de la bomba de Flowserve seleccionada.

- KSB

El proveedor de bombas KSB, por su parte ofrece una aplicación online denominada KSB Easy Select destinada a guiar en el proceso de selección. La misma presenta una ventaja con respecto a la anterior, ya que permite introducir la actividad exacta a la cual será destinada la bomba. Gracias a esta ventaja, muestra directamente las bombas destinadas a la actividad que se le ha indicado, con lo cual es un ahorro de tiempo ya que no existe la necesidad de comprobar en la ficha de la bomba si es o no posible su uso con agua salada. La interfaz a través de la cual se introducen los datos es la que se muestra en la siguiente.

Aplicación	
Segmento	Abastecimiento de agua *
Aplicación general	Tratamiento de aguas *
Aplicación	Desalinización de agua *
Medio	
Medio	agua, agua de mar y agua salobre, agua de mar
Temperatura de trabajo	20,0 °C *
Punto de trabajo	
Caudal Q	228,40 m³/h *
Altura de elevación H	16,13 m *
Condiciones de funcionamiento	
Altura estática	0,00 m
NPSH disponible	m
Presión máxima de	0,00 bar.r

Figura 28. Interfaz de introducción de datos de KSB Easy Select.

Una vez se han introducido los datos como se puede observar en la figura anterior, la propia herramienta web indica la bomba de la gama de KSB que mejor se adapta a los parámetros de funcionamiento introducimos. En este caso, se ha señalado que la Mega CPK es la que mayor rendimiento tiene, alcanzado un valor del mismo de un 82,5%, como se puede observar en la figura 13.

Al igual que en el caso de la compañía Flowserve, el punto de trabajo se indica sobre las curvas características de la bomba pero en este caso con una especie de fleca que se

puede observar en la figura 13, pudiéndose obtener todos los parámetros como ya se ha comentado para el caso de la primera empresa consultada.

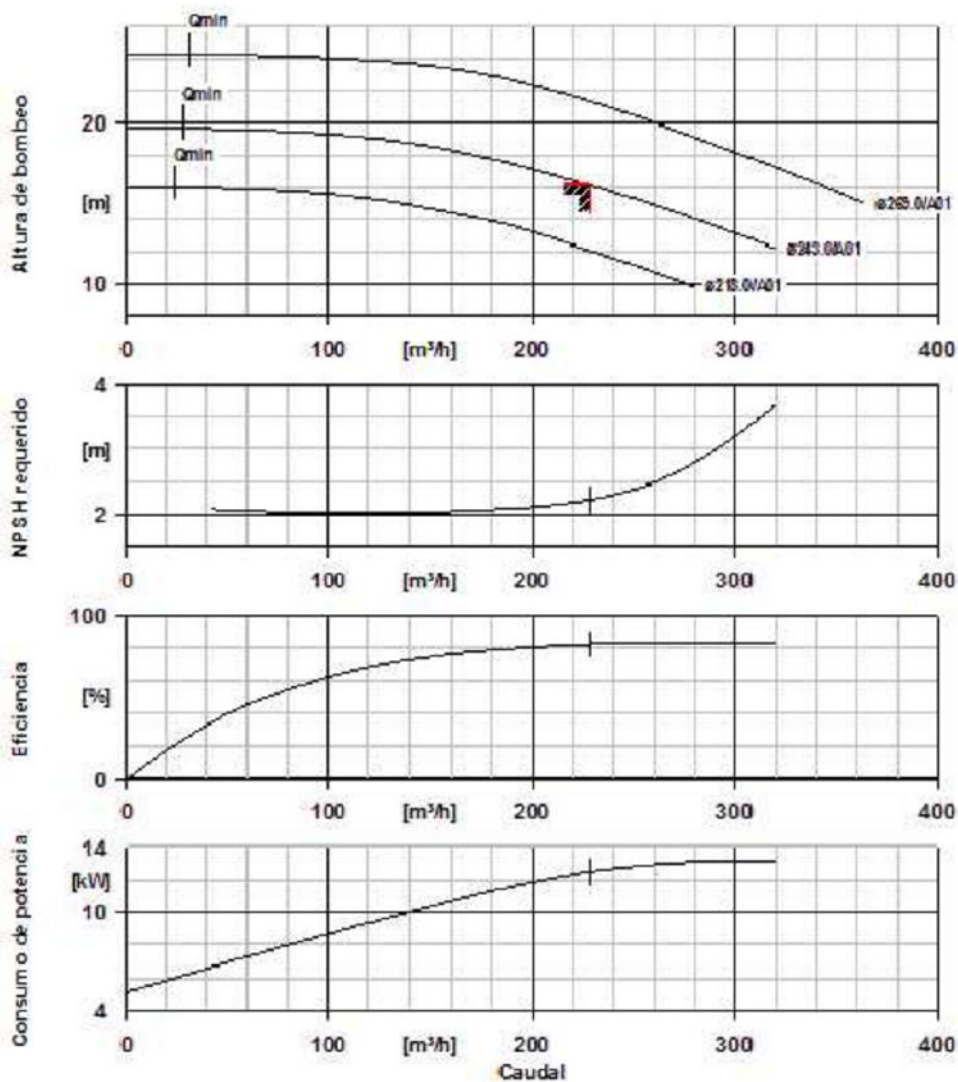


Figura 29. Curvas características de la bomba seleccionada de la compañía KSB.

- Lowara

En este caso la compañía Lowara ofrece, para la selección de sus distintos productos, la aplicación online Xylect cuya interfaz de inicio se puede observar en la figura que se muestra a continuación.



Figura 30. Interfaz de inicio de la herramienta Xylect de Lowara.

Al igual que en las herramientas de selección anteriores, se deben introducir los parámetros de funcionamiento de la bomba Booster como se muestra seguidamente.

The image shows a screenshot of the Xylect data entry interface. The title is "Punto de servicio" (Service Point). Below the title, there are two sections: "CAUDAL TOTAL DE DISEÑO" (Total Design Flow) and "ALTURA DE IMPULSIÓN TOTAL" (Total Impulse Height). The "CAUDAL TOTAL DE DISEÑO" section has a text input field containing "228,4" and a dropdown menu showing "m³/h". The "ALTURA DE IMPULSIÓN TOTAL" section has a text input field containing "16,127" and a dropdown menu showing "m".

Figura 31. Interfaz de introducción de datos de Xylect.

Posteriormente, la aplicación aporta una lista con las bombas que mejor se adapten a los parámetros introducidos previamente, a partir de la cual elegimos la bomba con denominación NSCF 125-250/110/P45VCC4. Dicha bomba alcanza un rendimiento del 86,27 %, como se puede observar en la siguiente figura en la que aparece una colección de curvas características de la misma.

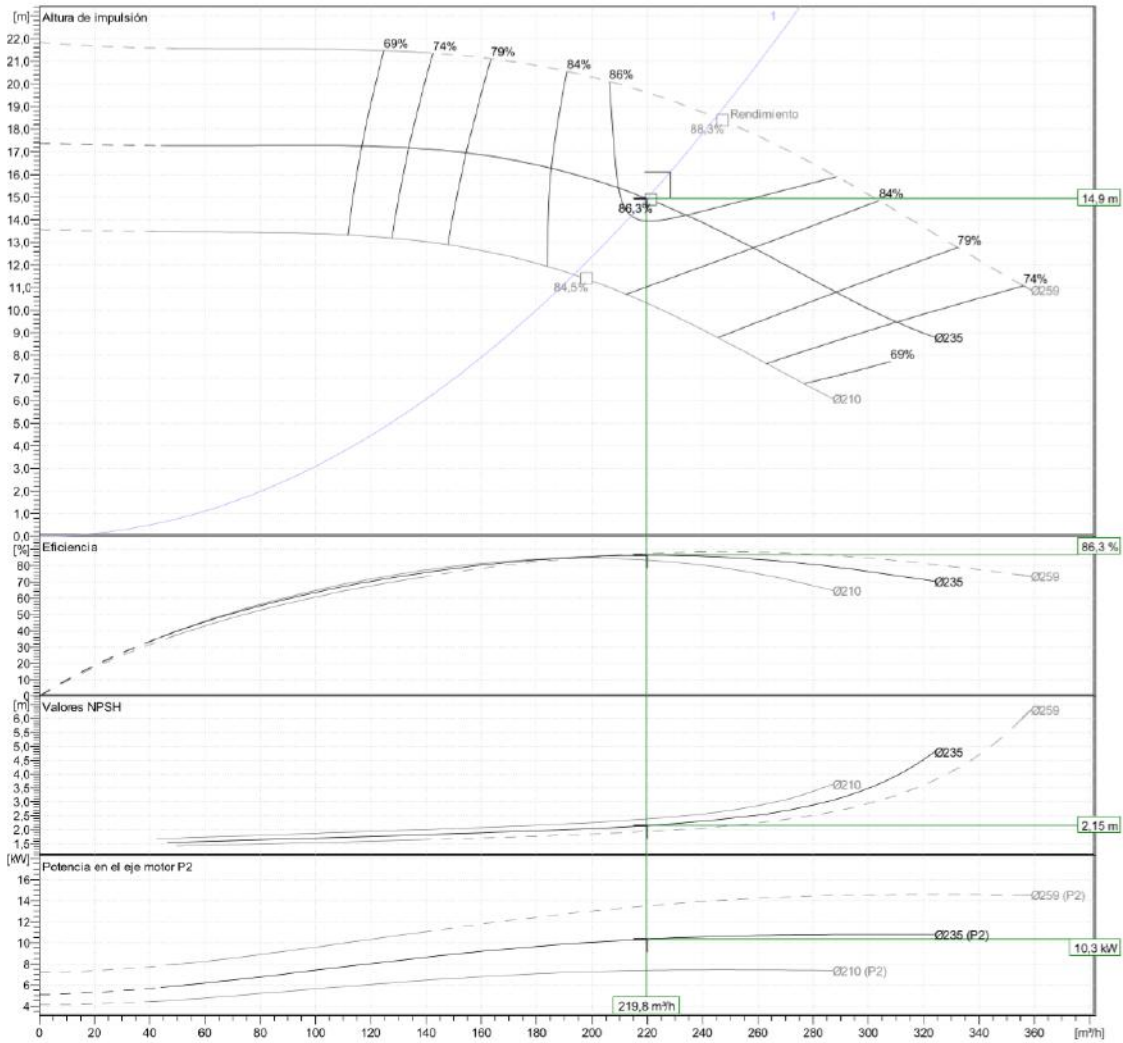


Figura 32. Curvas características de la bomba de Lowara seleccionada.

En las curvas características que aparecen en la figura anterior aparecen indicado a la derecha todos los parámetros de funcionamiento de la bomba en el punto de trabajo.

- Grundfos

La empresa Grundfos por su parte, cuenta con la aplicación de selección rápida para sus productos conocida como Grundfos Product Center. A través de la herramienta web mencionada se introducen los parámetros de funcionamiento, con el fin de seleccionar la bomba más adecuado existente dentro del catálogo de la compañía.

Introduzca punto de trabajo:

Caudal (Q)* m³/h

Altura (H)* m

Número de bombas

tension V

Selec. dimensionam. por:

Dimension. por aplicación

Diseño preferido

Dimension. por diseño bomba

Dimension. por familia bomba

Figura 33. Interfaz de introducción de datos de Grundfos Product Center.

Una vez se han introducido los datos correspondientes, la aplicación nos aporta una lista con las bombas que más se adecuan a las condiciones de trabajo que se han introducido en la misma. Esta vez la bomba de esta compañía que mejor rendimiento poseía es la NB 80-160/161 con un valor del mismo de 74,8 %, como se puede observar a través de las curvas características que se muestran en la figura 18.

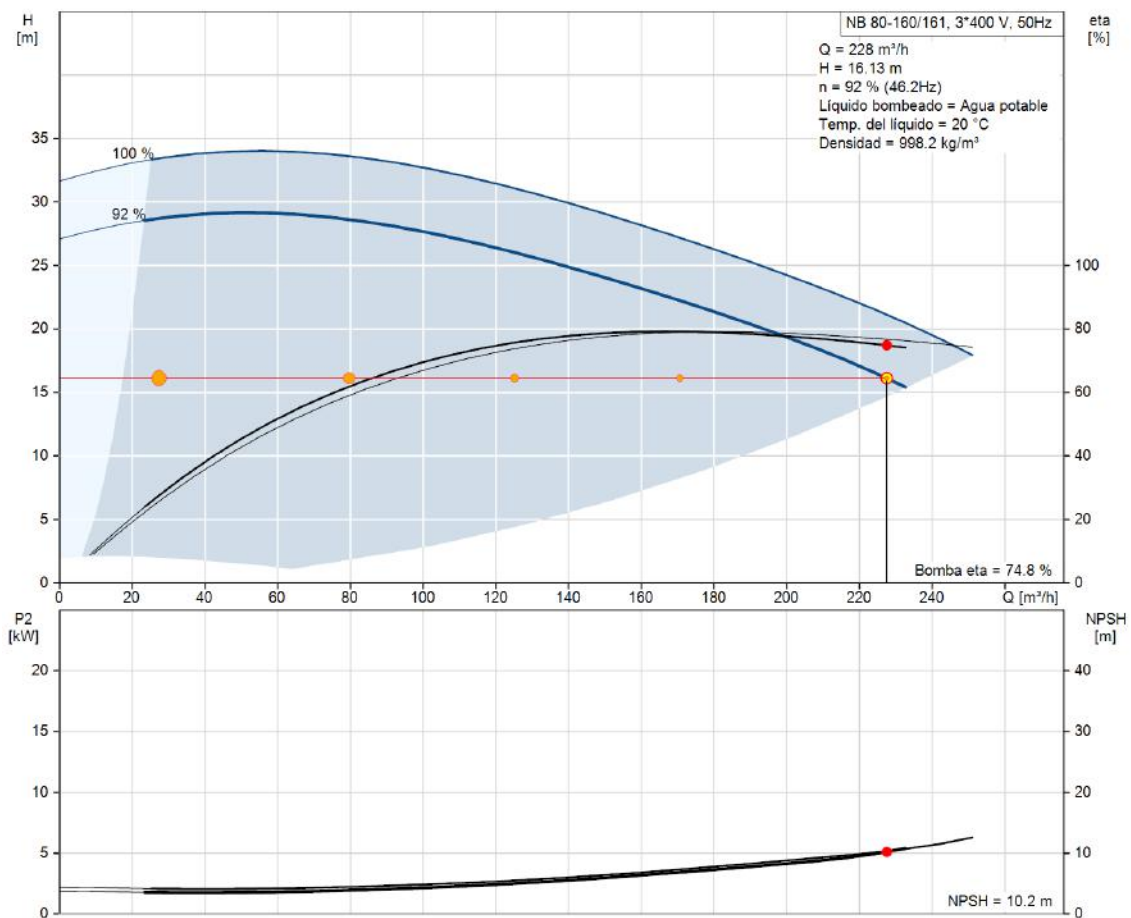


Figura 34. Curvas características de la bomba de Grundfos seleccionada.

- Sulzer

Por último se ha consultado la página web de Sulzer, la cual nos ofrece la herramienta de selección Sulzer Select.

Caudal, nominal	228.4 m ³ /h	Frecuencia	50 Hz
Presión / altura diferencial, rated	16.127 m	Criterio de búsqueda	Todas las velocidades idóneas
Condiciones Múltiples			

Figura 35. Interfaz de introducción de datos de Sulzer Select.

A partir de los datos que se han de introducir como se puede ver en la figura anterior, la aplicación aporta una serie de bombas que se ajustan a los mismos. De dicha lista la seleccionada por poseer el máximo rendimiento es la BE 315-1525, con un valor de 85,65% para el mismo. Este dato se puede contrastar en la colección de curvas características que se encuentran a continuación.

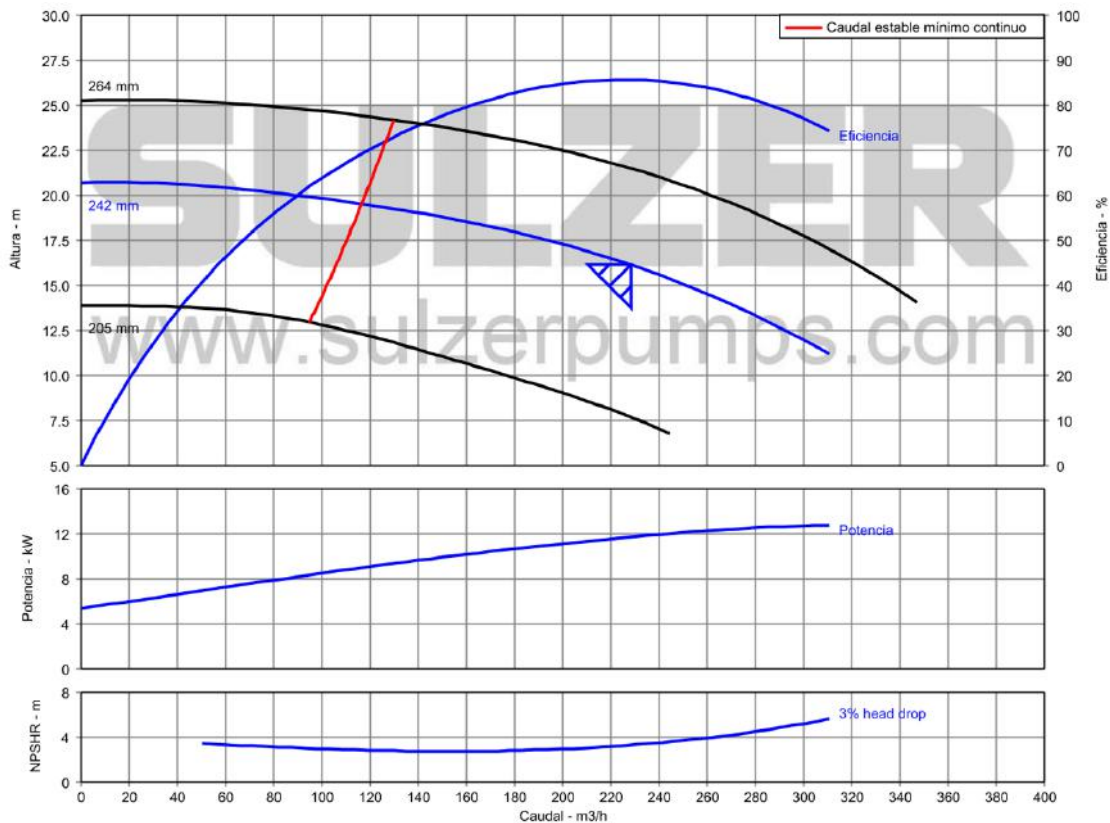


Figura 36. Curvas características de la bomba de Sulzer seleccionada.

Como en casos anteriores, el punto de trabajo de la bomba se indica con un triángulo en este caso de color azul que se puede observar en la figura anterior. A partir del mismo se pueden obtener el resto de parámetros correspondientes al punto de trabajo.

2.4.1. Bomba Booster seleccionada

A partir de las bombas que se han seleccionado de cada una de las empresas consultadas y de los datos obtenidos de las mismas, se debe elegir la que más rendimiento nos ofrezca. Para ello se ha confeccionado la siguiente tabla comparando los diferentes valores de eficiencia para cada una de ellas.

Fabricante	Rendimiento
Flowserve	83,40 %
KSB	82,50 %
Lowara	86,27 %
Grundfos	74,90 %
Sulzer	85,65 %

Tabla 12. Rendimientos de las bombas booster seleccionadas según fabricante.

Como se puede observar en la tabla de valores anterior, en la que se muestran los rendimientos de las bombas seleccionadas dependiendo del fabricante de las mismas, se ha llegado a la conclusión de que la bomba Booster que se instale en el núcleo de desalación de la EDAM bajo estudio sea la fabricada por Lowara ya que es la que presenta un rendimiento más alto, alcanzando un valor el mismo de 86,27 %.

Se ha seleccionado la bomba indicada, siguiendo la premisa de escoger la que tuviera el máximo rendimiento, debido a que la cuanto mayor sea el mismo el trabajo que realiza la bomba será más eficiente. Esto se traduce en una disminución en los consumos y en el mantenimiento de la misma.

Seguidamente, con el fin de su uso es cálculos posteriores se presenta la siguiente tabla en la que se indican los parámetros de funcionamiento más relevantes de la bomba Booster.

Fabricante	Lowara
Denominación	NSCF 125-250/110/P45VCC4
Rendimiento	86,27 %
Potencia motor eléctrico	11 kW

Tabla 13. Datos de la bomba Booster seleccionada para el caso de estudio.

2.5. Elección de la bomba de alta presión

Para la elección de la bomba de alta presión, se va a seguir el mismo procedimiento que el utilizado para el cálculo de la bomba Booster. Por tanto, lo primero que se debe hallar es la altura útil que tiene que aportar la bomba para de esta manera cumplir con los requerimientos exigidos en el funcionamiento de la EDAM bajo estudio en el presente proyecto.

La altura útil se hallará haciendo uso de la misma expresión expuesta para el dimensionado de la Booster y, además, se seguirán las mismas consideraciones tomadas, es decir:

- La variación de energía cinética, es decir, la variación de velocidad que se aparece en el segundo término de la ecuación se considerará despreciable ya que la bomba está destinada al aumento de presión.
- La cota a superar por la bomba también se considerará cero debido a que se encuentra a la misma altura que el resto de elementos de la instalación.

Por tanto, teniendo en cuenta lo comentado anteriormente, la expresión para la bomba de alta presión tendría la siguiente forma:

$$H_{AP} = \frac{P_S - P_e}{\rho * g}$$

Por último, para obtener la altura de la bomba se hace uso de la densidad del agua de alimentación ya calculada para la determinación de la altura útil de la bomba Booster, la

aceleración de la gravedad y de las presiones de entrada y salida de la bomba dadas ambas en Pa. Estos datos se muestran a continuación:

- *Densidad del agua de alimentación* $\rightarrow \rho = 1027,762 \text{ kg/m}^3$
- *Aceleración de la gravedad* $\rightarrow g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- *Presión de entrada bomba AP (P_e)*

$$P_e = 3 \text{ bar} * \frac{100000 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}} \rightarrow P_e = 300000 \text{ Pa}$$

- *Presión de salida bomba AP (P_s)*

$$P_s = 58,426 \text{ bar} * \frac{100000 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}} \rightarrow P_s = 5842600 \text{ Pa}$$

Cabe destacar que se ha escogido una presión de entrada a la bomba de 3 bar con el fin de que no se produjera el fenómeno de cavitación en el interior de la misma, el cual podría tener consecuencias fatales como el desgaste prematuro de elementos internos. Este valor se escoge para tener el NPSH_r para todas las bombas que se estudien a continuación y así no tener que estar recalculando la altura útil de la bomba teniendo en cuenta el NPSH_r de cada una de ellas.

Conocidos todos los parámetros que integran la ecuación para el cálculo de la altura útil de la bomba, se sustituyen para conocer el valor de la misma.

$$H_{AP} = \frac{5842600 \text{ Pa} - 300000 \text{ Pa}}{1027,762 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$H_{AP} = 549,733 \text{ m}$$

Seguidamente, después de haber obtenido el valor de la altura de la bomba, se han consultado distintos fabricantes con el fin de elegir la que tuviera un rendimiento más alto en las condiciones de trabajo de la EDAM. Para ello se han tenido en cuenta los datos que se muestran a continuación para la correcta selección de la bomba AP:

- Altura bomba Booster = 549,733 m
- Caudal bomba Booster = 188,3 m³/h
- Temperatura del agua = 20 °C

Los fabricantes de bombas que se han consultado en este caso son los mismos que se han tenido en cuenta para la selección de la bomba Booster, con lo cual se obviarán las explicaciones sobre los programas de selección de bombas que posee cada uno de ellos ya que se han hecho anteriormente.

Los datos que se han obtenido haciendo uso de las aplicaciones online para la selección de bombas de cada uno de los proveedores consultados son los siguientes.

- Flowserve

En este caso la compañía Flowserve ofrece como bomba más óptima la 3X11WXH-HC, con un rendimiento de un 78,2 % como se puede apreciar en la figura anterior en la que se nos muestran las curvas características de la bomba seleccionada.

En este caso la compañía Flowserve ofrece como bomba más óptima la 3X11WXH-HC, con un rendimiento de un 78,2 % como se puede apreciar en la figura siguiente en la que se nos muestran las curvas características de la bomba seleccionada.

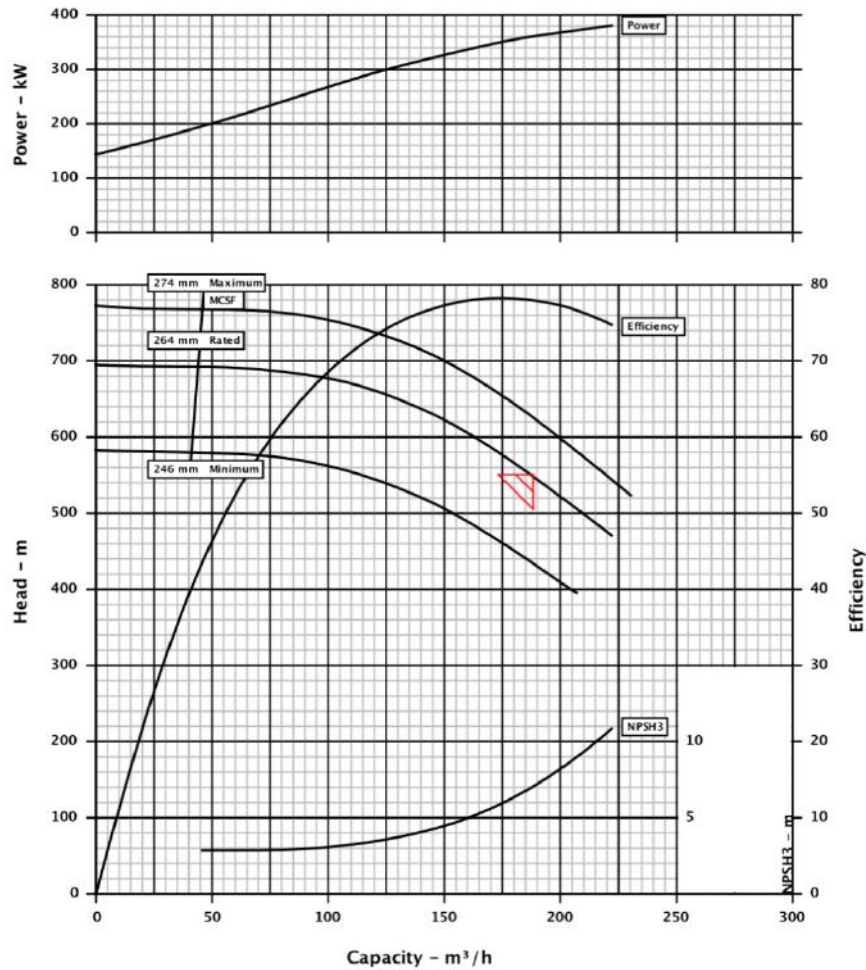


Figura 37. Curvas características de la bomba de Flowserve seleccionada.

Además se puede comprobar como la presión NPSH_r tiene un valor aproximado de 7 metros lo que equivale a menos de 1 bar con lo cual en este caso no tendríamos problemas de cavitación en el interior de la bomba.

- KSB

KSB por su parte ofrece una bomba de la serie Multitec que está especialmente diseñada para el tratamiento de aguas saladas. En este el modelo de la serie comentada más adecuado teniendo en cuenta la información de funcionamiento introducida es la Multitec CA 100-8.1, la cual nos aporta un rendimiento del 76,7 %.

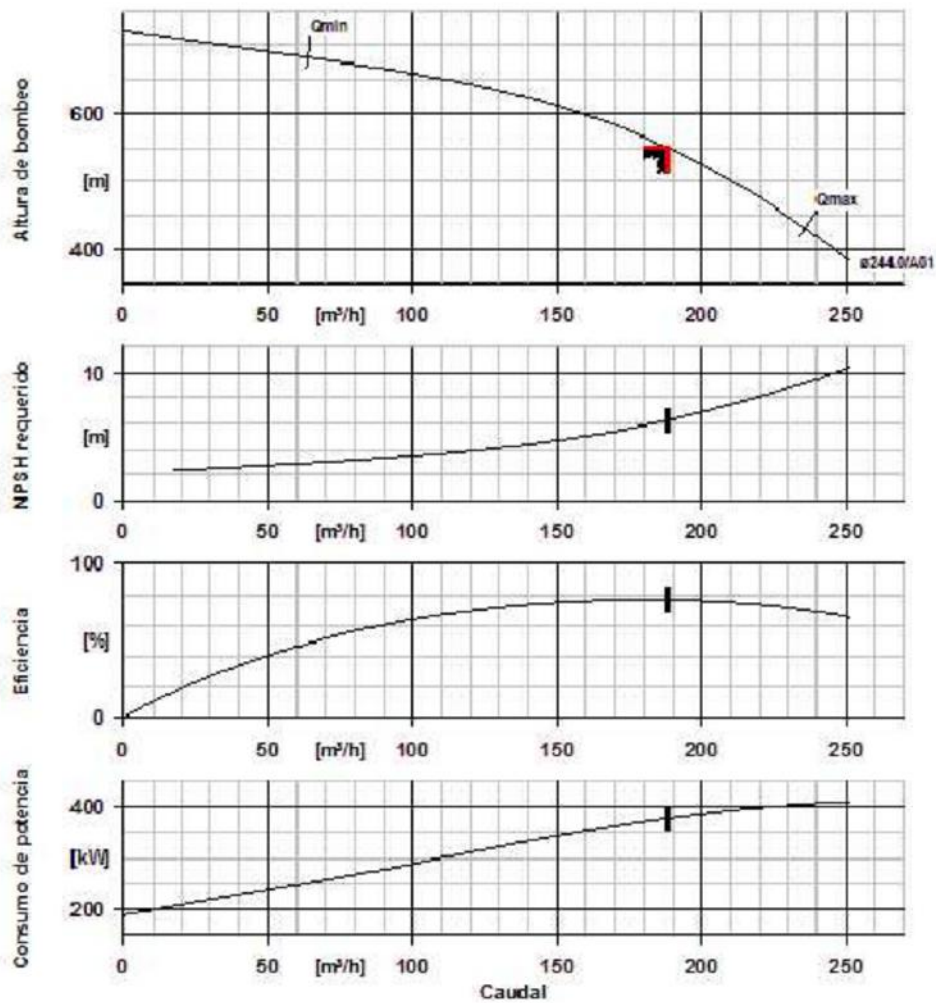


Figura 38. Curvas características de la bomba de KSB seleccionada.

Seguidamente como en el caso anterior, se debe comprobar si la $NPSH_r$ es menor que la presión que posee la bomba a la entrada. Este comprobación se realiza a través de la tercera gráfica que aparece en la figura anterior.

La $NPSH_r$ en este caso, vuelve a tener un valor de menos de diez metros con lo cual en el caso de estudio se cumple de manera holgada con este valor.

- Lowara

A través de la aplicación del proveedor Lowara, Xylect, se ha seleccionado una bomba con un valor de rendimiento de 74,96 %. La misma se denomina MPE 125.1/6 y como se puede comprobar a través de la figura siguiente, como en los casos previos el $NPSH_r$ es

pequeño, aproximadamente de 5 metros, con lo cual con la presión de entrada que se le aplica en el caso de estudio no habría ningún problema de cavitación.

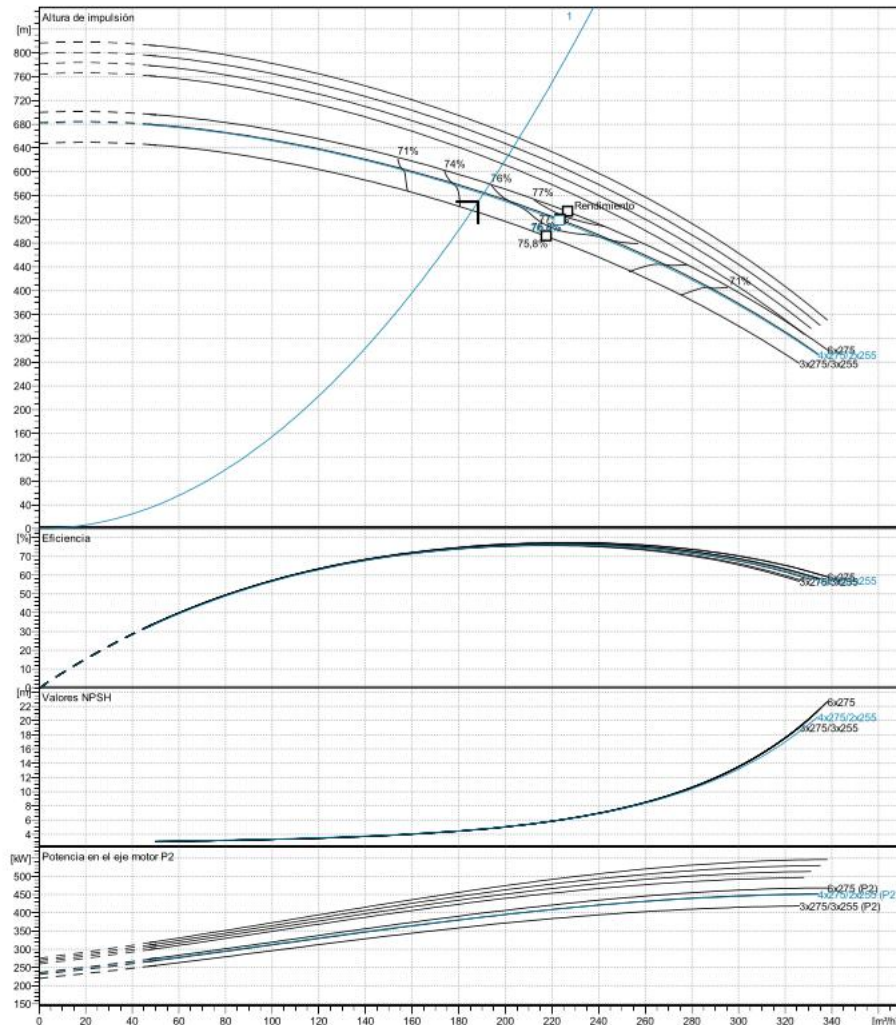


Figura 39. Curvas características de la bomba de Lowara seleccionada.

- Grundfos

En el caso de la elección de la bomba de alta presión Grundfos no ofrece ninguna dentro de su catálogo que se ajuste a las condiciones de trabajo que se han introducido a través de su aplicación selectora de bombas.

En este caso, este fabricante nos daba como opción el montaje de varias bombas para abastecer a las membranas con el caudal y la presión indicados, pero no es una solución viable debido a la mayor posibilidad de fallos y mayor costo tanto en

mantenimiento como en inversión inicial. Es por estos motivos que este proveedor ha sido descartado para la selección de la bomba de alta presión.

- Sulzer

Por último a través de su seleccionador de bombas, Sulzer aporta una lista de bombas de alta presión que cumplen con los parámetros de trabajo introducidos de las cuales la mejor que se adapte, debido a que tiene un mayor rendimiento, es la MD 150-360 (D)(Dd). Dicha bomba posee una eficiencia del 80,70 % como se puede observar en las gráficas que aparecen en la figura 24.

Como en todos los casos anteriores, con la finalidad de evaluar la posibilidad de que se produzca cavitación en la bomba se comprueba el valor del $NPSH_r$ que se muestra en la gráfica inferior de la figura 24. A partir de dicha gráfica se obtiene que el valor de la altura neta positiva en la aspiración es menor a 2,5 metros con lo cual no habría problemas de cavitación.

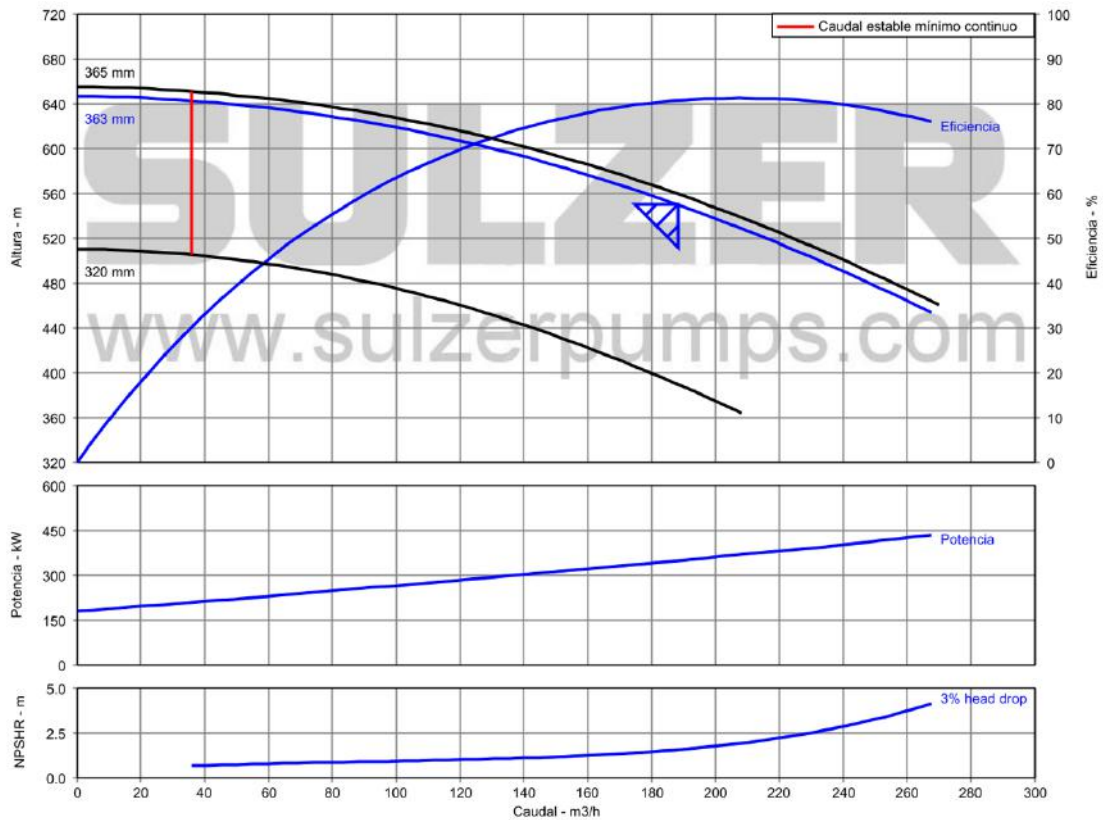


Figura 40. Curvas características de la bomba de Sulzer seleccionada.

2.5.1. Bomba de alta presión seleccionada

Después de haber consultado los fabricantes más importantes de bombas hidráulicas y de haber seleccionado de cada uno de ellos las bombas que más rendimiento tuvieran dentro de su catálogo, se realiza una comparación entre ellas.

Para elegir la bombas de alta presión más adecuada para la planta desaladora bajo estudio en este proyecto, se ha tenido en cuenta la consideración de elegir la que poseyera mayor rendimiento, por motivos expuesto anteriormente.

A continuación se muestra una tabla de valores en la que se compara el rendimiento de las bombas seleccionadas anteriormente.

Fabricante	Rendimiento
Flowserve	78,20 %
KSB	76,70 %
Lowara	74,96 %
Grundfos	-
Sulzer	80,70 %

Tabla 14. Rendimientos de las bombas de alta presión seleccionadas según fabricante.

A partir la tabla anterior, en la cual se comparan las diferentes bombas de cada uno de los fabricantes consultados, se ha tomado la consideración de seleccionar la bomba de MD 150-360 (D)(Dd) aportada por el fabricante Sulzer ya que es la que mayor rendimiento tiene, siendo la única que supera el 80 % alcanzando un 80,70 %.

Al igual que para la bomba Booster, se ha confeccionada una tabla en la que se presentan los parámetros de funcionamiento más relevantes de la bomba de alta presión con el fin de su uso en cálculos posteriores. Dicha tabla de valores es la que se encuentra a continuación.

Fabricante	Sulzer
Denominación	MD 150-360 (D)(Dd)
Rendimiento	80,70 %
Potencia motor eléctrico	375 kW

Tabla 15. Datos de la bomba de alta presión seleccionada para el caso de estudio.

2.6. Elección de la bomba captación

En este apartado se realizarán los cálculos y se tomarán las decisiones que se consideren oportunas para el diseño y dimensionado del sistema de captación de la planta desaladora bajo estudio.

2.6.1. Método de captación

Lo primero que se ha de tener en cuenta a la hora de realizar el diseño de la captación de una planta desaladora de agua de mar, es el método por el cual se extrae el agua del mar. Existen dos procedimientos claramente diferenciados, que son los que se explican a continuación.

2.6.1.1. Tomas cerradas, mediante pozos aislados o mediante una cántara común.

Si hacemos referencia a la solución mediante pozos aislados, estos se ejecutan con máquinas de perforación llegando a alcanzar profundidades superiores a los 40 metros. Esta profundidad es más o menos grande dependiendo de la profundidad a la que se encuentre la suficiente permeabilidad del terreno para garantizar el caudal de extracción demandado. Normalmente estas perforaciones se entuban con tuberías de PVC y diámetros del orden de 350 mm, aunque depende del caudal que se desee extraer. Las bombas de captación, que se usan en este caso, son bombas sumergibles instaladas en el interior de cada perforación. Si se opta por la solución de cántara común, la principal diferencia radicaría en las bombas ya que serían de carácter horizontal, habría menor cantidad de las mismas y un caudal unitario mayor para cada una.

Una vez comentadas las principales características de este tipo de captación de agua de alimentación, se enumeran a continuación las principales ventajas:

- Limpieza del agua debido a su filtrado a través del terreno, con lo cual la misma posee unos índices de turbidez (NTU) y de colmatación (SDI) bajos.
- Ausencia de actividad biológica y orgánica.
- Bajo contenido de oxígeno disuelto.
- Baja contaminación.
- Temperaturas sin variaciones importantes.

El aprovechamiento de las citadas ventajas abre la posibilidad de abaratar considerablemente los costes de los tratamientos, especialmente químicos, de la instalación,

y en ocasiones incluso los equipos debido a la comentada buena calidad del agua de alimentación.

Como inconvenientes más importantes en zonas continentales, se pueden presentar los que se enumeran a continuación:

- Contenidos importantes de algunos elementos secundarios como el hierro, aluminio, flúor u otros que exijan un tratamiento previo antes de alimentar las membranas. También puede afectar este problema a la eficiencia del proceso ya que debido a este motivo se suele optar por un diseño más conservador.
- Contaminación por diversos motivos como la presencia de nitratos, pesticidas, etc.
- Variaciones en la composición química del agua a lo largo del tiempo e incluso dependiendo de la época del año.

2.6.1.2. Tomas abiertas superficiales o a través de un emisario

En este tipo de método de extracción no existe ningún tipo de problema con el caudal de extracción, pero sin embargo, se reduce el rendimiento de la instalación, ya que normalmente al agua de alimentación captada tiene una calidad bastante inferior pudiendo estar afectadas por cualquiera de las siguientes causas:

- Actividad orgánica y biológica importante.
- Contenido en sólidos en suspensión importante y variable según las condiciones.
- Mayor exposición a la contaminación.
- Contenido de oxígeno disuelto más alto.
- Margen de variación de temperatura bastante amplio.

En el caso de optar por el uso de un emisario submarino, es conveniente anclar el mismo siempre y cuando las condiciones del terreno lo permitan, con el fin de evitar que el oleaje pudiera afectar al funcionamiento de la instalación.

Únicamente se recurre a este tipo de toma de captación en las instalaciones de agua

de mar, cuando la permeabilidad es sumamente baja imposibilitando el uso de pozos para la extracción del agua de alimentación. Además debido a que no tiene limitaciones en cuanto al caudal extraído se suele usar en plantas desaladoras con grandes volúmenes de producción.

Teniendo en cuenta las características tanto positivas como negativas de ambos métodos de captación de agua de mar, y las características de la planta de desalación que se está diseñando en este proyecto se ha tomado la decisión de usar las tomas mediante pozos como método de extracción de agua de mar. Dicha determinación se ha hecho por los siguientes motivos:

- Mayor limpieza del agua, lo que se traduciría en una menor inversión en sistemas de pretratamiento de aguas.
- Temperaturas de del agua de captación estables.
- Es el sistema elegido por las plantas de pequeña y mediana producción.

2.6.2. Pozos captación

Una vez se ha elegido el sistema de captación se han de determinar el número de pozos de captación que se han de colocar para extraer el caudal necesario de agua de mar que se necesita para producir los 4500 m³/día de permeado que se requieren. Para ello hemos tenido en cuenta el número de pozos colocados en otras plantas de similares características a la que se está diseñando.

Las plantas desaladoras que se han tomado como ejemplo son la planta desaladora de la Comunidad de Regantes de Las Galletas y la planta desaladora de Corralejo, ambas de 4000 m³/día. Dichas EDAM poseen un sistema de captación con tres pozos, dos de ellos trabajando de manera continua y el tercero de reserva en el caso de fallo o mantenimiento de los primeros.

Por tanto, teniendo en cuenta los ejemplos comentados se tomará para el caso de estudio tres pozos de captación dos de ellos activos de manera continua y el tercero de reserva.

Seguidamente debemos de conocer la profundidad de los pozos para de esa manera conocer la longitud de la tubería de captación. Para ello, en primer lugar se calculara la profundidad mínima de captación para la que se tienen que tener en cuenta los siguientes parámetros.

- Nivel de pozo → En este caso se ha tomado la diferencia de altura entre la zona más alta de la parcela donde se va a construir la desaladora y el nivel del mar. Para obtener dicho valor se ha hecho uso de la herramienta online Goolzoom, a partir de la cual se pueden hacer diferentes tipos de medidas sobre los mapas satélites. Realizado dicho cálculo sobre la parcela en cuestión, se ha obtenido un valor aproximado de 20 metros.
- Bajamar → Para obtener el valor de la bajamar máxima se ha usado los datos ofrecidos por la web de Puertos del Estado de la bolla de medición más cercana. En este caso era de la Santa Cruz de Tenerife, en la cual se ha medido un valor de bajamar máximo de 1,4 metros como se puede observar en la figura siguiente.

Estadística Bajamares	
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 41. Estadística bajamares obtenidos por la bolla de medición de Santa Cruz de Tenerife (Puertos del Estado).

- Pérdida de altura por filtración → Se ha tomado una pérdida de altura por el fenómeno de filtración de 1 metro.
- Disminución de altura debido al cono de succión → En este caso se le ha añadido un 1 metro más de altura debido al cono que se forma a la hora de realizar la succión del agua de alimentación.

Teniendo en cuenta los parámetros anteriores se obtiene una profundidad mínima para la captación de 23,4 metros, teniéndose que situar la bomba sumergible por debajo de dicha profundidad para asegurar la alimentación de la misma.

Una vez calculada la profundidad mínima de captación y teniendo en cuenta diferentes ejemplos, como el de la desaladora de Santa Cruz de Tenerife con unas profundidades de captación por debajo de los 36 metros o el de la desaladora de la Comunidad de Regantes de Las Galletas que posee pozos de hasta 60 metros de profundidad, se ha decidido tomar una profundidad media teniendo en cuenta todas las anteriormente comentadas. Por tanto se tomarán una profundidad para la captación de agua de mar de 40 metros.

2.6.3. Tuberías

Seguidamente se ha de definir la situación en la que se encontrarán los pozos de captación, con el fin de calcular la longitud de tubería de captación. Para ello se han consultado diferentes fuentes, decidiéndose que se colocarán los mismos en forma de cruz situados de manera simétrica a 20 metros cada uno de la unión común con el colector de captación el cual tendrán otros veinte metros de longitud hasta la entrada a la zona de pretratamiento como se puede observar en la siguiente figura.

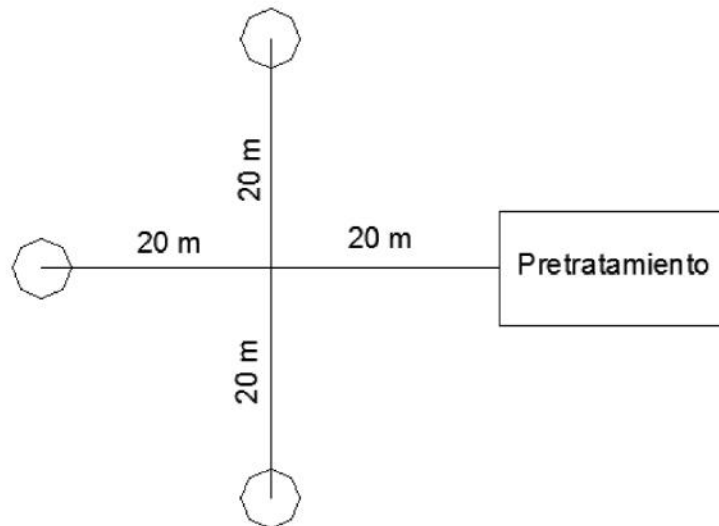


Figura 42. Disposición de los pozos de captación.

2.6.3.1. Material de las tuberías

El siguiente paso a seguir es la elección del material del que van a estar construidas las tuberías del sistema de captación de la planta de desalación y las dimensiones de las mismas, teniendo en cuenta que dentro del sistema hay dos tipos de tuberías.

- Las tuberías que conducen el agua de alimentación desde el pozo hasta el colector, que recibirán el nombre de tuberías de captación.
- La tubería encargada de recoger el agua proveniente de cada una de las tuberías de captación y conducirla hasta el pretratamiento, que se le denominará colector.

El primer paso es la elección del material del que estarán compuestas las tuberías del sistema de captación, para lo cual se ha seleccionado el PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio) del fabricante Flowtite, que es el distribuidor líder a nivel mundial de tuberías de este material. Se ha elegido este material porque presenta importantes ventajas, como las que se presentan a continuación:

- Alta resistencia a la corrosión

- Alta resistencia mecánica
- Superficie interior con un acabado excelente, lo que se traduce en una reducción de las pérdidas de carga y de la acumulación de lodos.
- Presenta una alta ligereza en comparación con otros materiales como el acero (4 veces más pesado) o el hormigón (10 veces más pesado).
- Poco mantenimiento, ya que según el fabricante posee una vida útil casi ilimitada.

2.6.3.2. Diámetros de las tuberías

Una vez escogido el material, se pasa al cálculo de los diámetros de tuberías necesarios para conducir el caudal proveniente de las bombas de captación para lo cual se hace uso del criterio de Bonet. Cabe destacar que este criterio da como resultado el diámetro mínimo que han de tener las tuberías para cumplir con la velocidad mínima recomendada.

$$D = 0,835 * Q^{\frac{2}{5}}$$

Figura 43. Criterio de Bonet para el cálculo de secciones.

El procedimiento para hallar el diámetro que se ha de usar en cada una de las conducciones anteriormente mencionadas, se divide en dos pasos. En el primero de ellos se ha de calcular el caudal que circula por cada una de las tuberías, y en el segundo paso a través del caudal y aplicando el criterio de Bonet se obtiene el diámetro buscado.

Seguidamente se seguirá el procedimiento anteriormente comentado para las dos conducciones que posee nuestro sistema de captación:

- Tuberías de captación
 - Cálculo del caudal, para el cual hay que tener en cuenta que circula la mitad de caudal de alimentación de la planta (5000 m³/día) debido a que hay dos bombas de alimentación. Además, hay tener en cuenta que para el uso del criterio de Bonet hay que tener el caudal en unidades de m³/s.

$$Q_{captación} = 5000 \frac{m^3}{día} * \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ segundos}}$$

$$Q_{captación} = 0,05785 \frac{m^3}{seg}$$

- Cálculo del diámetro de la tubería aplicando el criterio de Bonet.

$$D_{captación} = 0,835 * Q^{\frac{2}{5}} = 0,835 * (0,05785 \text{ m}^3/\text{seg})^{\frac{2}{5}}$$

$$D_{captación} = 0,267 \text{ m}$$

- Colector

- Cálculo del caudal, pero en este segundo caso teniendo en caso que el colector tiene que recoger todo el caudal de alimentación de la planta desaladora proveniente de las tuberías de captación ($10000 \text{ m}^3/\text{día}$), debiendo pasar el mismo a las unidades correctas para el uso de Bonet.

$$Q_{colector} = 10000 \frac{m^3}{día} * \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ segundos}}$$

$$Q_{colector} = 0,1157 \frac{m^3}{seg}$$

- Cálculo del diámetro de la tubería aplicando el criterio de Bonet.

$$D_{colector} = 0,835 * Q^{\frac{2}{5}} = 0,835 * (0,1157 \text{ m}^3/\text{seg})^{\frac{2}{5}}$$

$$D_{colector} = 0,352 \text{ m}$$

Una vez calculados los diámetros mínimos teóricos que deben tener cada una de las secciones, se debe de escoger el diámetro comercial inmediatamente superior que ofrezca el proveedor Flowtite en su catálogo. Estos diámetros comerciales son los que se muestran en la siguiente figura.

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

Figura 44. Diámetros comerciales ofrecidos por Flowtite.

Seguidamente, teniendo en cuenta los diámetros teóricos calculados anteriormente y la figura anterior donde se pueden visualizar los diámetros comerciales que nos ofrece el proveedor, se debe escoger el diámetro comercial más adecuados a los ya calculados.

En la tabla de valores que se muestra a continuación quedan reflejadas las elecciones de diámetros hechas en cada caso.

Conducciones	Diámetro teórico (mm)	Diámetro comercial (mm)
Tuberías de captación	267	300
Colector	352	400

Tabla 16. Diámetros comerciales elegidos según conducción.

2.6.3.3. Cálculo de las pérdidas de carga en las tuberías

Una vez que se conocen el material de las tuberías y los diámetros y caudales de las mismas, se pasa a realizar el cálculo del factor de fricción existente en cada una de ellas mediante un proceso iterativo haciendo uso de la ecuación de Colebrook, que se muestra a continuación.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left(\frac{k}{3,71 D} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f_0}} \right)$$

Como se puede ver, para hacer uso de la expresión anterior se debe conocer el valor de los siguientes parámetros:

- Numero de Reynolds (Re) → propio de cada tubería ya que depende del caudal que circula por las mismas y su sección. Esto se puede verificar en vista de la expresión del mismo que se muestra a continuación.

$$Re_D = \frac{4 * Q}{\pi * D * \nu}$$

donde:

- $Q \equiv$ Caudal que circula por la tubería
- $D \equiv$ Diámetro de la tubería
- $\nu \equiv$ viscosidad cinemática. Se tomará la del agua a 20°C

$$\nu (20^\circ C) = 1,003 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

- Valor de la rugosidad absoluta (k) → depende del material del que esté fabricada la tubería. En este caso, como las mismas están fabricadas de PRFV el valor de la rugosidad es de 0,029 mm según el fabricante.
- Valor inicial del factor de fricción (f_0) → para este valor se suele tomar inicialmente 0,015 o 0,020, sirve como valor inicial para llevar a cabo el proceso iterativo. Se elegirá en este caso un valor de 0,015.
- Diámetro de la tubería (D) → propio de cada tubería. Su valor es conocido ya que se ha calculado previamente para cada una de las mismas.

A través de los parámetros comentados anteriormente, el proceso que se ha de llevar para hallar el valor del factor de fricción para cada una de las tuberías consta de dos pasos. El primero de ellos es realizar el cálculo del número de Reynolds (Re) y en el segundo paso hay que sustituir los parámetros en la fórmula de Colebrook con el fin de iniciar el proceso

iterativo para hallar el factor de fricción. El proceso iterativo finalizará cuando el valor del factor de fricción obtenido se estabilice, haciendo uso de la herramienta informática Excel para llevarlo a cabo.

Seguidamente se seguirá el procedimiento anteriormente comentado para las dos conducciones que posee nuestro sistema de captación:

- Tuberías de captación
 - Cálculo del número de Reynolds, se realizará haciendo uso de los datos calculados a través de la expresión ya mostrada anteriormente.

$$Re_{D,captación} = \frac{4 * Q}{\pi * D * \nu} = \frac{4 * 0,05785 \frac{m^3}{seg}}{\pi * 0,300 m * 1,003 * 10^{-6} m^2/s}$$

$$Re_{D,captación} = 244873,2883$$

- Proceso iterativo, haciendo uso de la expresión de Colebrook teniendo en cuenta las premisas ya comentadas para llevar a cabo el proceso iterativo. Los resultados de dicho proceso se muestran en la siguiente tabla.

FACTOR DE FRICCIÓN (captación)	f inicial	f final
Iteración 1	0,015	0,015947696
Iteración 2	0,015947696	0,015866633
Iteración 3	0,015866633	0,015873329
Iteración 4	0,015873329	0,015872774
Iteración 5	0,015872774	0,01587282
Iteración 6	0,01587282	0,015872817
Iteración 7	0,015872817	0,015872817
Iteración 8	0,015872817	0,015872817
Iteración 9	0,015872817	0,015872817

Iteración 10	0,015872817	0,015872817
---------------------	-------------	-------------

Tabla 17. Resultados del factor de fricción para las tuberías de captación, aplicando proceso iterativo en Colebrook.

Como se puede observar en la tabla de valores anteriores a partir de la sexta iteración obtenemos siempre el mismo valor para el factor de fricción, con lo cual tomaremos un valor del mismo de 0,015872817.

- Colector
- Cálculo del número de Reynolds, el cálculo se realizará de manera homóloga al caso anterior pero teniendo en cuenta las diferencias de caudal y diámetro.

$$Re_{D,colector} = \frac{4 * Q}{\pi * D * v} = \frac{4 * 0,1157 \frac{m^3}{seg}}{\pi * 0,400 m * 1,003 * 10^{-6} m^2/s}$$

$$Re_{D,colector} = 367182,9893$$

- Proceso iterativo, realizado de manera análoga al caso anterior pero teniendo en cuenta la variación en el diámetro y el número de Reynolds. Se presentan en la siguiente tabla los resultados obtenidos.

FACTOR DE FRICCIÓN (colector)	f inicial	f final
Iteración 1	0,015	0,014709651
Iteración 2	0,014709651	0,014732124
Iteración 3	0,014732124	0,014730365
Iteración 4	0,014730365	0,014730502
Iteración 5	0,014730502	0,014730492
Iteración 6	0,014730492	0,014730493
Iteración 7	0,014730493	0,014730492
Iteración 8	0,014730492	0,014730492
Iteración 9	0,014730492	0,014730492

Iteración 10	0,014730492	0,014730492
---------------------	-------------	-------------

Tabla 18 .Resultados del factor de fricción para el colector, aplicando proceso iterativo en Colebrook.

Como se puede observar en la tabla de valores anteriores a partir de la séptima iteración obtenemos siempre el mismo valor para el factor de fricción, con lo cual tomaremos un valor del mismo de 0,014730492.

Seguidamente se pasa a hallar las pérdidas de carga que se dan por conducción en cada una de las tuberías que conforman el sistema de captación de la planta desaladora, a través de la ecuación de Darcy-Weisbach que se muestra a continuación.

$$H_r = f * \frac{8 * L * Q^2}{g * \pi^2 * D^5}$$

Como se puede ver, para hacer uso de la expresión anterior se debe conocer el valor de los siguientes parámetros:

- Factor de fricción (f) → propio de cada conducción. Valor conocido ya que se ha calculado anteriormente.
- Longitud de tubería (L) → propio de cada conducción. Está longitud es la suma de las longitudes de todos tramos de tuberías que conforman cada conducción.
- Caudal (Q) → propio de cada tubería. Valor conocido calculado previamente.
- Diámetro (D) → propio de cada tubería. Se conoce su valor porque se ha determinado previamente.
- Aceleración de la gravedad (g) → Dato conocido, el cual tiene un valor de 9,81 m/s².

Seguidamente, teniendo en cuenta los parámetros anteriores se calculan las pérdidas de carga que se dan en cada una de las secciones siguiendo un procedimiento que consta de dos pasos. En el primero de ellos se determina la longitud de las tuberías y en el segundo se

sustituyen los valores de los parámetros anteriores en la fórmula de Darcy-Weisbach, obteniéndose de esta manera el valor de las pérdidas de carga por conducción en cada una de las secciones del sistema de captación.

A continuación, se seguirá el procedimiento comentado en cada una de las secciones pertenecientes a la captación de la desaladora:

- Tuberías de captación
 - Determinación de la longitud (L), para ello en este caso se tendrá en cuenta la profundidad de captación anteriormente calculada (40 metros) y la longitud de la tubería superficial hasta el colector (20 metros). Esto quiere decir que la longitud de la tubería de captación es de 60 metros.
 - Cálculo de las pérdidas de carga por conducción (Hr).

$$H_{r,captación} = f * \frac{8 * L * Q^2}{g * \pi^2 * D^5} = f * \frac{8 * 60 \text{ m} * (0,05785 \text{ m}^3/\text{seg})^2}{9,81 \text{ m/s}^2 * \pi^2 * (0,300 \text{ m})^5}$$

$$H_{r,captación} = 0,1084 \text{ metros}$$

- Colector
 - Determinación de la longitud (L), para la cual únicamente tenemos en cuenta la longitud del colector que es de 20 metros.
 - Cálculo de las pérdidas de carga por conducción (Hr).

$$H_{r,captación} = f * \frac{8 * L * Q^2}{g * \pi^2 * D^5} = f * \frac{8 * 20 \text{ m} * (0,1157 \text{ m}^3/\text{seg})^2}{9,81 \text{ m/s}^2 * \pi^2 * (0,400 \text{ m})^5}$$

$$H_{r,captación} = 0,0318 \text{ metros}$$

2.6.3.4. Pérdidas de carga debidas a accesorios

Por último, se pasan a calcular las pérdidas por accesorios en el sistema de captación a través de la expresión siguiente:

$$H_r = k * \frac{V^2}{2 * g}$$

Como se puede observar, para la resolución anterior debemos de tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Coeficiente de pérdida (k), es un valor adimensional propio de cada accesorio que esta tabulado.
- Aceleración de la gravedad (g), con un valor de 9,81 m/s².
- Velocidad del fluido (V), propio de cada una de las tuberías dependiendo del caudal y de la sección de las mismas.

En este caso, solo se han considerado pérdidas por accesorios en las tuberías de captación, en las cuales se ha supuesto un codo de 90° en cada una de ellas y una conexión para evaluar de manera aproximada la pérdida en la conexión de las tuberías de captación en el colector.

Lo primero que se debe hacer es calcular la velocidad que posee el fluido dentro de las tuberías de captación a partir del caudal que circula por las mismas y su sección.

$$V_{captación} = \frac{Q}{S} = \frac{0,05785 \text{ m}^3/\text{seg}}{\pi * \left(\frac{0,3 \text{ m}}{2}\right)^2} \rightarrow V_{captación} = 0,8184 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

$$V_{colector} = \frac{Q}{S} = \frac{0,1157 \text{ m}^3/\text{seg}}{\pi * \left(\frac{0,4 \text{ m}}{2}\right)^2} \rightarrow V_{captación} = 0,9207 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

Seguidamente, se determinan los valores del coeficiente de pérdidas a partir de los datos tabulados en el libro de “Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas” de José Agüera Soriano.

- Codo de 90° → k = 0,9
- Conexión en T → k = 1,8

Una vez determinados todos los parámetros necesarios para la obtención del valor de las pérdidas cargas producidas por los accesorios, se sustituyen en la expresión para el cálculo de dichas pérdidas ya expuesta. Para obtener el valor total de la pérdida de carga producida por accesorios debemos de sumar las producidas en cada uno de los considerados, teniendo en cuenta que la velocidad que se tiene en cuenta en las pérdidas de la conexión en T es la que se da en el colector con el fin de escoger el caso más desfavorable.

$$H_{r,accesorios} = H_{r,codo\ 90^\circ} + H_{r,conexión\ T} = k_{codo\ 90^\circ} * \frac{V_{captación}^2}{2 * g} + k_T * \frac{V_{colector}^2}{2 * g}$$

$$H_{r,accesorios} = 0,9 * \frac{(0,8184 \text{ m/seg})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} + 1,8 * \frac{(0,9207 \text{ m/seg})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$H_{r,accesorios} = 0,1085 \text{ metros}$$

Teniendo ya calculadas las pérdidas, tanto las debidas a conducción como las producidas por la existencia de accesorios, se pasa a calcular la altura útil que debe aportar la bomba de captación al agua de mar para conseguir llegar en las condiciones correctas (3 bar de presión) a la entrada de la bomba de alta presión. Para ello se hace uso de la expresión de la altura útil ya usada en casos anteriores pero en este caso añadiéndole las pérdidas de carga calculadas.

$$H_{captación} = \frac{P_s - P_e}{\rho * g} + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2g} + z_B + H_{r,captación} + H_{r,colector} + H_{r,accesorios}$$

Además, para llevar a cabo el cálculo se han de tener en cuenta una serie de consideraciones:

- Se considera una caída de presión del fluido, como consecuencia del paso del mismo por el pretratamiento, de 2 bar. Generalmente esta pérdida es algo menor, pero se ha escogido el valor anterior con el fin de situarse en las peores condiciones de trabajo y asegurarnos siempre la presión de 3 bar a la entrada de la bomba de alta presión.
- Por último, se sabe que la presión a la entrada de la bomba de captación tiene que tener un valor de 3 bar.
- Se ha de tener en cuenta que las unidades en las que se han de colocar las unidades de presión para el cálculo es en Pa.
- Se considera despreciable la variación de energía cinética que se da en el fluido a través de su paso por la bomba.
- El valor de la densidad del agua ya ha sido calculado previamente, teniendo un valor el mismo de 1027,762 kg/m³.
- La aceleración de la gravedad es de 9,81 m/s².

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, lo primero que se ha de hacer es cambiar las unidades de la presión a Pa.

$$P_s = 2 \text{ bar} + 3 \text{ bar} = 5 \text{ bar} * \frac{100000 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}} \rightarrow P_s = 500000 \text{ Pa}$$

En este caso solo se tiene en cuenta la presión de salida de la bomba debido a que la presión de entrada es la presión que habría en el pozo de captación debido a la columna de agua situada sobre la bomba, la cual es desconocida.

En cuanto al $NPSH_r$, por las bombas de captación se supondrá que no habrá problemas ya que el mismo estará cubierto por la presión existente en el pozo de captación ya comentada, con lo cual no habría problemas de cavitación en las bombas sumergibles.

Seguidamente, conocidos todos los parámetros, se sustituye en la expresión para el cálculo de la altura útil de la bomba, teniendo en cuenta las consideraciones que se han propuesto, y se obtiene el mismo.

$$H_{captación} = \frac{P_s - P_e}{\rho * g} + z_B + H_{r,captación} + H_{r,colector} + H_{r,accesorios}$$

$$H_{captación} = \frac{500000 \text{ Pa}}{1027,762 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2} + 40 \text{ m} + 0,1084 \text{ m} + 0,0318 \text{ m} + 0,1085 \text{ m}$$

$$H_{captación} = 89,840 \text{ metros}$$

Por tanto, las condiciones de trabajo a las que se tienen que enfrentar las bombas de captación de la planta desaladora bajo estudio son las siguientes.

- Altura bomba de captación = 89,840 m
- Caudal bomba captación = 208,33 m³/h
- Temperatura del agua = 20 °C

A partir de los datos anteriores se procede a la selección de la bomba más adecuada haciendo uso de las aplicaciones de selección que nos ofrecen los distintos fabricantes. En

este caso solo se tendrán en cuenta los proveedores KSB y Lowara, obviándose las explicaciones de las herramientas selectoras de cada uno de ellos ya que se han explicado con anterioridad.

- KSB

La empresa KSB da la posibilidad de detallar el uso que se le va a dar a la bomba, con lo cual se le indicará, además de los parámetros de funcionamiento, el uso al cual está destinada la bomba. La interfaz de selección se puede observar en la siguiente figura.

Figura 45. Interfaz de KSB Easy Select para la introducción de datos.

Una vez se han introducido los datos la propia compañía, ofrece directamente la bomba de su catálogo que mejor se adecue a las condiciones de trabajo introducidas. En este caso la bomba que nos aporta KSB es la UPAB 250C-250, la cual alcanza un rendimiento del 79,9 % como se puede observar en el conjunto de curvas características de la misma que se muestran a continuación.

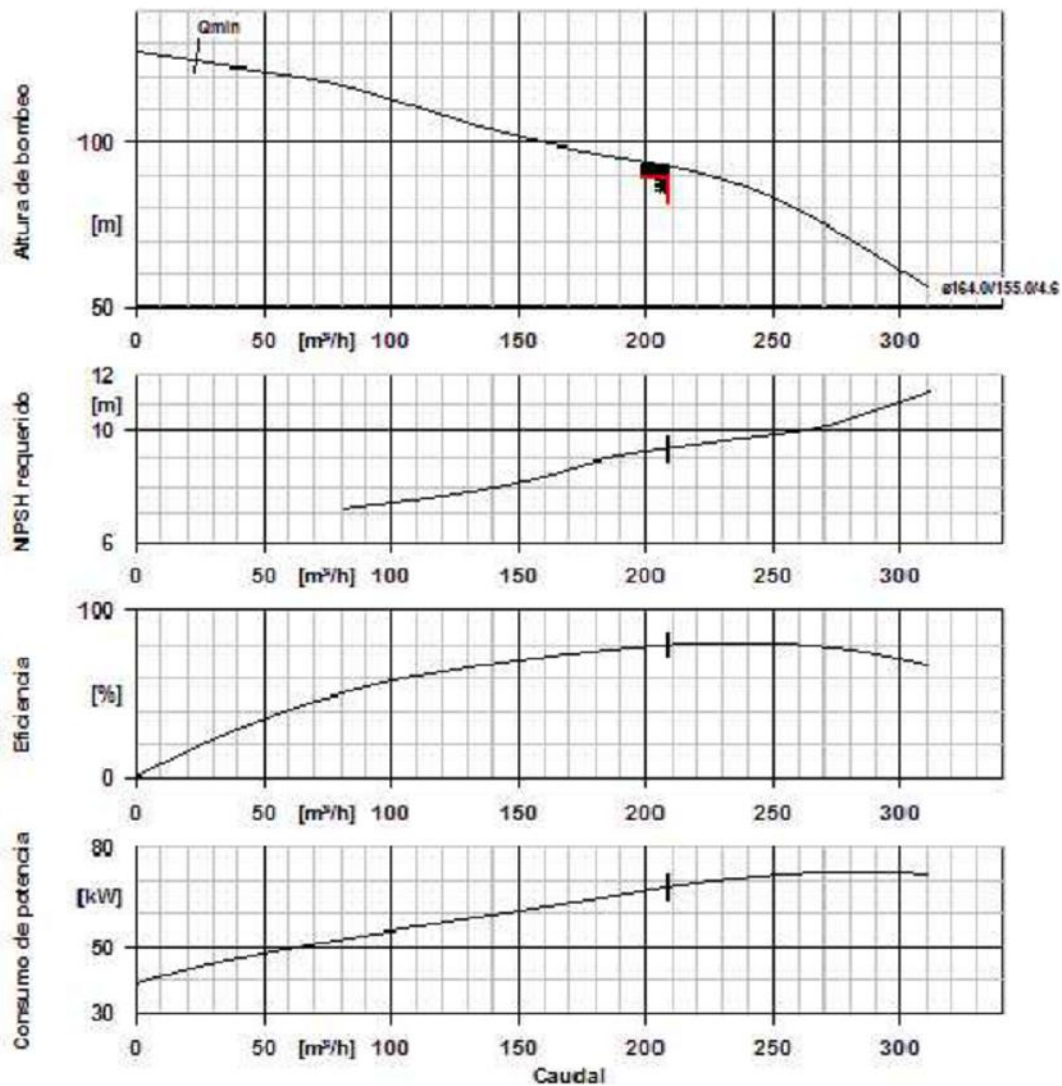


Figura 46. Conjunto de curvas características de la bomba de KSB seleccionada.

- Lowara

En el caso de la aplicación selectora de Lowara, teniendo en cuenta los parámetros de funcionamiento, aporta una lista de bombas sumergibles que se adaptan a dichos parámetros. De las cuales, se ha seleccionado la que mayor rendimiento tuviera, siendo la misma la Z10220 3/2A-L8W.

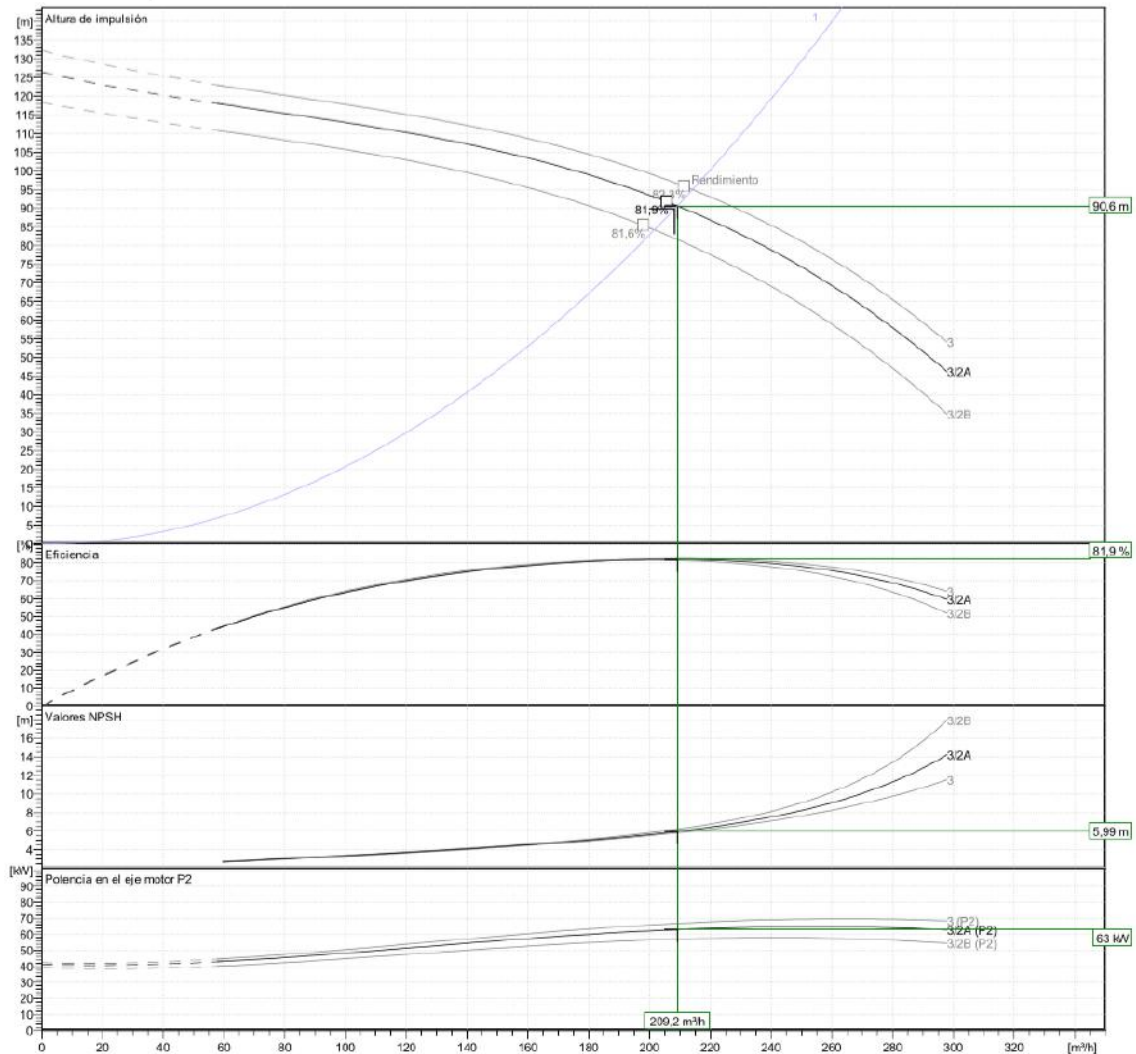


Figura 47. Curvas características de la bomba de Lowara seleccionada.

Como se puede observar en la figura anterior, en la cual se muestran las curvas características de la bomba seleccionada, se obtiene un valor de eficiencia del 81,9 %.

2.6.4. Bomba de captación seleccionada

Una vez se han realizado los cálculos necesarios y se han consultado los principales fabricantes para la selección de la bomba de captación, se realizará una comparación entre las aportadas por cada uno de los proveedores con el objetivo de elegir la que mayor rendimiento ofrezca en las condiciones de trabajo de la planta desaladora bajo estudio. Para ello se ha confeccionado la tabla que se muestra a continuación.

Fabricante	Rendimiento
KSB	79,9%
Lowara	81,9%

Tabla 19. Comparación de los rendimientos de las bombas de captación seleccionadas según fabricante.

Como se puede observar en la tabla anterior, en la que se muestran los diferentes rendimientos de la bomba seleccionada, la bomba que mayor rendimiento aporta es la de Lowara, con un 81,9%, un poco más alto que la ofrecida por KSB, 79,9%.

En este caso la bomba seleccionada no será la de Lowara, a pesar de poseer mayor rendimiento, debido a que no se especifica en su ficha técnica que pueda ser usada para la extracción de agua salada mientras que la de KSB está especialmente diseñada para este uso. Por tanto, como poseen un rendimiento similar y teniendo en cuenta el detalle comentado, se ha tomado la determinación de que la bomba elegida sea la UPAB 250C-250 de KSB.

Seguidamente, con el fin de su uso es cálculos posteriores se presenta la siguiente tabla en la que se indican los parámetros de funcionamiento más relevantes de la bomba captación.

Fabricante	KSB
Denominación	UPAB 250C-250
Rendimiento	79,90 %
Potencia motor eléctrico	67 kW

Figura 48. Datos de la bomba de captación seleccionada en el caso de estudio.

2.7. Elección de la bomba de distribución

En este apartado se realizarán los cálculos y se tomarán las decisiones que se considere oportunas para el diseño y dimensionado del sistema de distribución de la planta desaladora bajo estudio.

Para el diseño del sistema de distribución se ha de tener en cuenta el destino final del permeado producida por la planta desaladora. Para ello se ha tomado como ejemplo la

planta desaladora de la Comunidad de regantes de Las Galletas, la cual envía el agua desalada a un depósito cercano, el cual contiene agua procedentes de fuentes convencionales con el objetivo de homogeneizar el agua, antes de enviarla a las zonas de riego.

En el caso de estudio, por tanto, se optará por la misma solución ya que el agua desalada está destinada al sector agrícola de la zona. Para ello, como destino se ha elegido el depósito más cercano a la ubicación de la EDAM, el cual es que se muestra en la siguiente figura.



Figura 49. Situación del depósito respecto a la EDAM.

Una vez que se ha determinado el destino del permeado de la desaladora bajo estudio, se debe de determinar el recorrido que va a seguir el permeado para llegar de un punto a otro, el cual debe de cumplir los siguientes requisitos:

- Ha de tener un diseño sencillo, con el fin de utilizar el menor número de accesorios posibles disminuyendo las pérdidas de carga.
- Debe de interferir lo menos posible con los elementos previamente construidos en el terreno.

Teniendo en cuenta los requisitos de diseño anteriores, el recorrido que se ha considerado como válido es el que se presenta en la siguiente figura.



Figura 50. Recorrido a seguir por el permeado hasta el depósito.

Seguidamente, a través de la página web Goolzoom, se calcula de manera aproximada tanto la distancia del recorrido como la cota a superar haciendo uso de las herramientas de medida que nos cede la misma. Los resultados obtenidos son los que se muestran en la siguiente tabla.

Distancia aproximada (m)	1039
Diferencia de cota (m)	25

Tabla 20. Valores aproximados de diferencia de cota y distancia del recorrido entre EDAM y depósito (Goolzoom).

Conocida la diferencia de cota, la distancia del recorrido que ha de seguir el permeado y el caudal que se tiene del mismo se debe decidir las tuberías a través de las cuales debe ser conducido el flujo de agua desalada.

En este caso, se ha seleccionado el mismo tipo de tuberías seleccionado para las conducciones del sistema de captación de la planta, es decir, se volvería a seleccionar el

PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio) del fabricante Flowtite, que es el distribuidor líder a nivel mundial de tuberías de este material. Se ha tomado esta decisión por las importantes ventajas que presenta este material en comparación con el resto, las cuales han sido comentadas ya.

Elegido el material de la tubería y el proveedor de las mismas, se pasa al cálculo del diámetro que ha de tener la misma para conducir el caudal proveniente de la bomba de distribución, a la salida de la EDAM. Con el fin de calcular, el diámetro comentado se hace uso del criterio de Bonet a través del cual obtendremos el diámetro mínimo que tienen que tener las tuberías para conducir un determinado caudal.

$$D = 0,835 * Q^{\frac{2}{5}}$$

Figura 51. Criterio de Bonet para el cálculo de secciones.

Simplemente sustituyendo en la expresión anterior se obtiene el diámetro teórico que tendría que tener la tubería de distribución. Para ello hay que tener en cuenta las unidades en las que debe de estar el caudal para sustituir en la ecuación de Bonet, deben de ser de m^3/seg . Por tanto, lo primero que se deba de hacer es poner en las unidades correcta el caudal de permeado.

$$Q_{distribución} = 4500 \frac{m^3}{día} * \frac{1 día}{86400 segundos}$$

$$Q_{distribución} = 0,05208 \frac{m^3}{seg}$$

Una vez se tiene el caudal en las unidades correctas, se pasa a hacer uso del criterio de Bonet para obtener el diámetro mínimo de la tubería de captación.

$$D_{distribución} = 0,835 * Q^{\frac{2}{5}} = 0,835 * (0,05208 m^3/seg)^{\frac{2}{5}}$$

$$D_{distribución} = 0,256 \text{ m}$$

Una vez calculado el diámetro mínimo que debe tener la tubería de distribución, se debe de escoger el diámetro comercial inmediatamente superior que ofrezca el proveedor Flowtite en su catálogo. Estos diámetros comerciales son los que se muestran en la figura 28. Por tanto, la tubería de captación tendrá un diámetro comercial de 300 mm.

Determinados tanto el material de la tubería como el diámetro de las misma, se pasa a realizar el cálculo del factor de fricción existente mediante un proceso iterativo haciendo uso de la ecuación de Colebrook, que se muestra a continuación.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left(\frac{\frac{k}{D}}{3,71} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f_0}} \right)$$

Para resolver la ecuación anterior se tomarán las mismas consideraciones que se expresan en el apartado 2.6.3.3. Además, como se comenta en el mencionado apartado para hallar el valor de "f" se han de seguir los siguientes pasos:

- Cálculo del número de Reynolds

$$Re_{D,colector} = \frac{4 * Q}{\pi * D * v} = \frac{4 * 0,05208 \frac{m^3}{seg}}{\pi * 0,300 \text{ m} * 1,003 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}}$$

$$Re_{D,colector} = 220373,2652$$

- Proceso iterativo, haciendo uso de la expresión de Colebrook teniendo en cuenta las premisas comentadas en el apartado 2.6.3.3. para llevar a cabo el proceso iterativo. Los resultados de dicho proceso se muestran en la siguiente tabla.

FACTOR DE FRICCIÓN (distribución)	f inicial	f final
Iteración 1	0,015	0,01623608
Iteración 2	0,01623608	0,016126043
Iteración 3	0,016126043	0,016135411
Iteración 4	0,016135411	0,016134611
Iteración 5	0,016134611	0,016134679
Iteración 6	0,016134679	0,016134673
Iteración 7	0,016134673	0,016134674
Iteración 8	0,016134674	0,016134674
Iteración 9	0,016134674	0,016134674
Iteración 10	0,016134674	0,016134674

Tabla 21. Resultados del factor de fricción para la tubería de distribución, aplicando proceso iterativo en Colebrook.

Como se puede observar en la tabla de valores anteriores a partir de la séptima iteración obtenemos siempre el mismo valor para el factor de fricción, con lo cual tomaremos un valor del mismo de 0,016134674.

Seguidamente se pasa a hallar las pérdidas de carga que se dan por conducción en cada una de las tuberías que conforman el sistema de captación de la planta desaladora, a través de la ecuación de Darcy-Weisbach que se muestra a continuación.

$$H_r = f * \frac{8 * L * Q^2}{g * \pi^2 * D^5}$$

Sustituyendo en la expresión anterior los diferentes parámetros, ya calculados previamente, obtenemos las pérdidas de carga debido a la conducción del fluido a través de la tubería de distribución.

$$H_{r,distribución} = f * \frac{8 * L * Q^2}{g * \pi^2 * D^5} = 0,01613 * \frac{8 * 1039 \text{ m} * (0,05208 \text{ m}^3/\text{seg})^2}{9,81 \text{ m}/\text{s}^2 * \pi^2 * (0,300 \text{ m})^5}$$

$$H_{r,distribución} = 1,5458 \text{ metros}$$

Por último, se pasan a calcular las pérdidas por accesorios en el sistema de captación a través de la expresión siguiente:

$$H_r = k * \frac{V^2}{2 * g}$$

Con el fin de resolver la ecuación anterior, se siguen las premisas aportadas en el apartado 2.6.3.4. para la resolución de la misma. En este caso se han considerado, teniendo en cuenta el recorrido elegido, cuatro codos de 90° a lo largo de la tubería de distribución.

Siguiendo el procedimiento comentado en el apartado 2.6.3.4., lo primero que se debe hacer es calcular la velocidad a la cual circula el agua por la tubería de distribución.

$$V_{distribución} = \frac{Q}{S} = \frac{0,05208 \text{ m}^3/\text{seg}}{\pi * \left(\frac{0,3 \text{ m}}{2}\right)^2} \rightarrow V_{distribución} = 0,7368 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

Seguidamente, se determina el valor del coeficiente de pérdidas (K) a partir de los datos tabulados en el libro de “Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas” de José Agüera Soriano. En el caso del codo de 90° este coeficiente tiene un valor de 0,9.

Por último, una vez calculados todos los parámetros necesarios para la resolución de la ecuación de Darcy-Weisbach se pasa a hacer uso de la misma para obtener el valor de las pérdidas de carga debida a accesorios. Hay que tener en cuenta que hay instalados cuatro codos de 90° y el resultado obtenido a través de la ecuación hace referencia a las pérdidas producidas en un solo accesorio, con lo cual habría que multiplicar el mismo por el número de codos instalados.

$$H_{r,accesorios} = 4 * \left(k_{codo 90^\circ} * \frac{V_{distribución}^2}{2 * g} \right) = 4 * \left(0,9 * \frac{(0,7368 \text{ m/seg})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} \right)$$

$$H_{r,accesorios} = 0,0996 \text{ metros}$$

A partir de los datos anteriores se pasa al cálculo de la altura útil que debe aportar la bomba de distribución. Para ello se hace uso de la expresión de la altura útil ya usada en casos anterior pero en este caso añadiéndole las pérdidas de carga calculadas, tanto las debidas a conducción como las producidas por los accesorios.

$$H_{captación} = \frac{P_S - P_e}{\rho * g} + \frac{V_S^2 - V_e^2}{2g} + z_B + H_{r,distribución} + H_{r,accesorios}$$

Con el fin de simplificar la expresión anterior se han de tener en cuenta una serie de consideraciones:

- Se considerable despreciable el término de presión en este caso. Esta consideración se ha tomado debido a que la presión de entrada a la bomba (que coincide con presión del permeado a la salida de las membranas) es pequeña, además no se requiere presión a la llegada de agua al depósito.
- Se considera despreciable la variación de energía cinética que se da en el fluido a través de su paso por la bomba.

Seguidamente, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se observa cómo queda la expresión del cálculo de la altura útil de la bomba.

$$H_{distribución} = z_B + H_{r,distribución} + H_{r,accesorios}$$

Como era de esperar, debido a las necesidades que se requieren en el sistema de distribución, el cálculo de la altura útil solo está afectado por la diferencia de cota.

$$H_{distribución} = 25 \text{ m} + 1,5458 \text{ m} + 0,0996 \text{ m}$$

$$H_{distribución} = 26,6454 \text{ m}$$

En vista del resultado anterior, las condiciones de trabajo a las que se tiene que enfrentar la bomba de distribución de la planta desaladora bajo estudio son las siguientes.

- Altura bomba de distribución = 26,6454 m
- Caudal bomba de distribución = 187,5 m³/h
- Temperatura del agua = 20 °C

A partir de los datos anteriores se procede a la selección de la bomba más adecuada haciendo uso de las aplicaciones de selección que nos ofrecen los distintos fabricantes. En este caso solo se tendrán en cuenta los principales fabricantes del mercado, obviándose las explicaciones de las herramientas selectoras de cada uno de ellos ya que se han explicado con anterioridad.

Cabe destacar que en este caso ha sido imposible realizar el dimensionado de la bomba de distribución a través del fabricante KSB debido al fallo de su herramienta online de selección. Por este motivo, no se tendrá en cuenta al mismo para la selección de la bomba bajo estudio.

- Flowserve

Haciendo uso de la herramienta online que ofrece este fabricante, denominada Affinity, se obtiene la bomba que tiene un mayor rendimiento en las condiciones de trabajo que se introducen en dicha aplicación.

Una vez introducidos los parámetros de funcionamiento indicados anteriormente se obtiene que la bomba de su catálogo, que nos ofrece mayor rendimiento es la MBLC125100-315L, alcanzado un valor del mismo de 79,7 % como se puede observar en la siguiente figura.

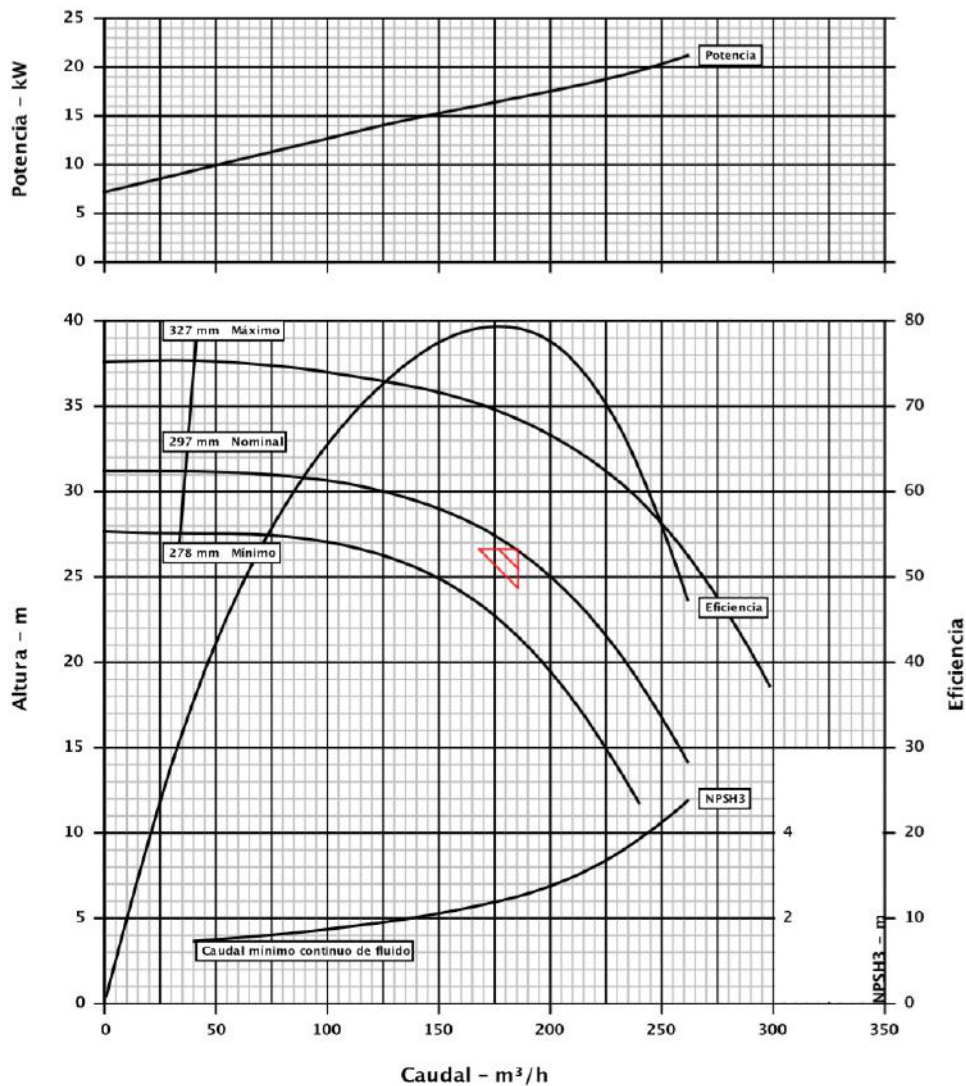


Figura 52. Curvas características de la bomba de Flowserve elegida

- Lowara

Al igual que en caso anterior, mediante la introducción de los parámetros de funcionamiento, el fabricante ofrece una lista de bombas que se adaptan a los mismos. De dicha lista se ha elegido la NSCF 125-315/220/W45VCC4 ya que es la que mayor rendimiento presentaba, con un valor del mismo de 82,2 %.

El dato de rendimiento obtenido para la bomba, al igual que el resto de parámetros de funcionamiento relevantes se pueden observar en la figura siguiente donde se muestran las curvas características de la bomba seleccionada.

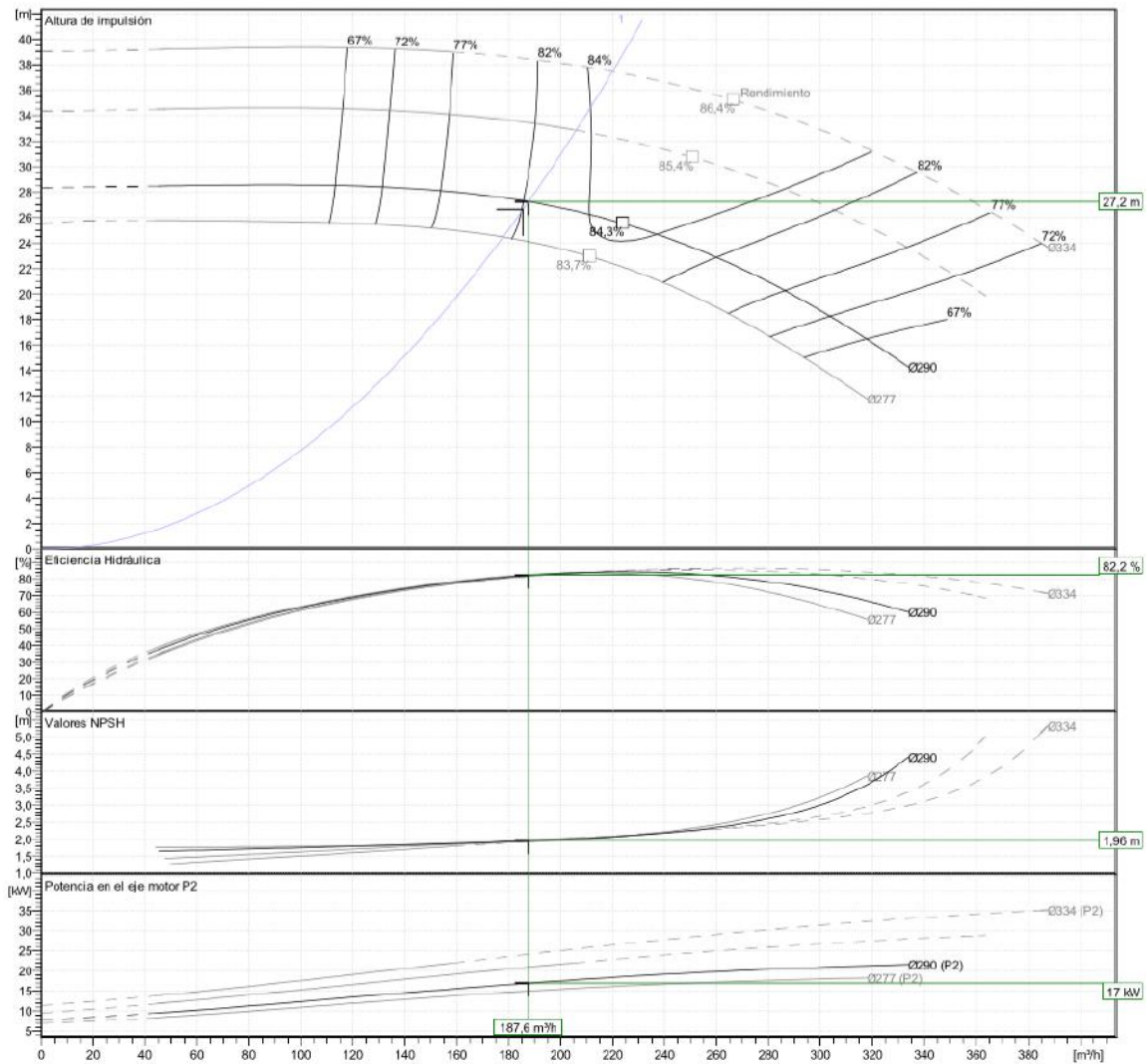


Figura 53. Curvas características de la bomba de Lowara seleccionada.

- Grundfos

Por su parte, el fabricante Grundfos nos ofrece a través de su seleccionador online Grundfos Product Center, la lista de bombas de su catálogo que se adecuan a las condiciones de trabajo que se introducen a través de dicha aplicación.

Para la selección de la bomba se ha escogido la que tuviera mayor rendimiento de la lista ofrecida por Grundfos, que en este caso es la NBG 125-80-200/222 A-E2-A-BQQE con un rendimiento del 79 %.

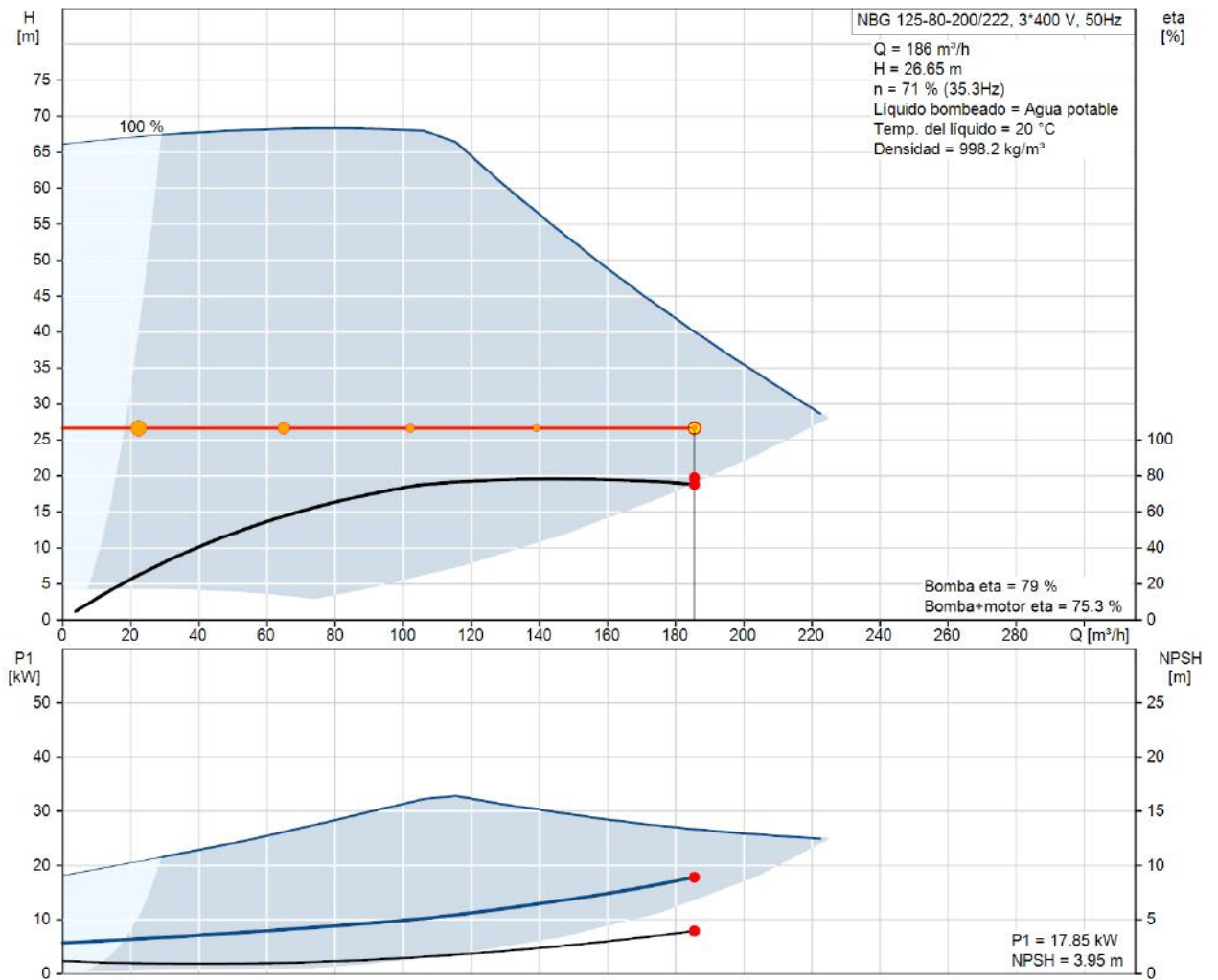


Figura 54. Curvas características ofrecidas por Grundfos para la bomba seleccionada.

Tanto el rendimiento comentado como el resto de parámetros de relevancia en el funcionamiento de la bomba, se muestran en curvas características ofrecidas por Grundfos que aparecen en la figura anterior.

- Sulzer

Por último, realizando el mismo proceso que se ha seguido para la selección en el caso de los otros fabricantes, se han introducido los parámetros de funcionamiento de la bomba de distribución en la aplicación de selección de bombas ofrecida por la compañía, Sulzer Select.

Una vez se han introducido los datos, se muestra una lista de bombas que se adaptan a los parámetros de funcionamiento introducidos, de la cual se ha escogido la SZM 325-01 por presentar el mayor rendimiento, un 80,50 %.

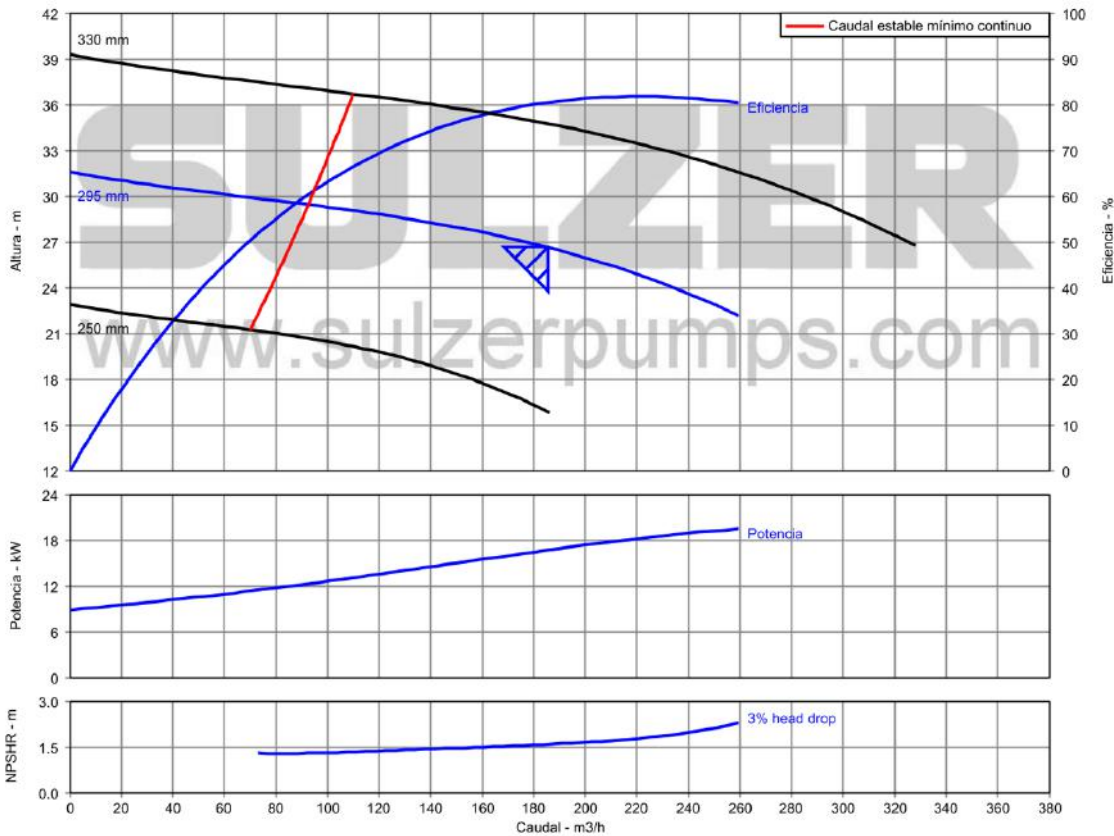


Figura 55. Curvas características ofrecidas por Sulzer para la bomba seleccionada.

En la figura anterior se muestran las curvas características de la bomba ofrecidas por el fabricante, en las que se puede observar tanto el rendimiento como el resto de parámetros de importancia de la misma.

2.7.1. Bomba de distribución seleccionada

A partir de las bombas que se han seleccionado de cada una de las empresas consultadas y de los datos obtenidos de las mismas, se debe elegir la que más rendimiento nos ofrezca. Para ello se ha confeccionado la siguiente tabla comparando los diferentes valores de eficiencia para cada una de ellas.

Fabricante	Rendimiento
Flowserve	79,70 %
Lowara	82,20 %
Grundfos	79,00 %
Sulzer	80,20 %

Figura 56. Rendimientos de las bombas de distribución seleccionadas según fabricante.

Como se puede observar en la tabla de valores anterior, en la que se muestran los rendimientos de las bombas seleccionadas dependiendo del fabricante de las mismas, se ha llegado a la conclusión de que la bomba de distribución que se instale en el núcleo de desalación de la EDAM bajo estudio, sea la fabricada por Lowara ya que es la que presenta un rendimiento más alto, alcanzando un valor el mismo de 82,20 %.

Seguidamente, con el fin de su uso es cálculos posteriores se presenta la siguiente tabla en la que se indican los parámetros de funcionamiento más relevantes de la bomba de distribución.

Fabricante	Lowara
Denominación	NSCF 125-315/220/W45VCC4
Rendimiento	82,20 %
Potencia motor eléctrico	20 kW

Tabla 22. Datos de la bomba de distribución seleccionada para el caso de estudio.

ANEXO III

DIMENSIONADO DEL SISTEMA EÓLICO

3. Dimensionado del sistema eólico

En el siguiente anexo se realizarán los cálculos necesarios para dimensionar el sistema eólico que se encargará de producir la energía necesaria para el funcionamiento de la planta desaladora bajo estudio en el presente proyecto.

3.1. Estudio de las condiciones eólicas

En primer lugar, para evaluar las condiciones eólicas que se dan en la zona donde se instalará la desaladora y a su vez poder dimensionar el sistema eólico, consultamos el Atlas Eólico de España ofrecido en la página web del Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). En dicho atlas se debe buscar los datos del punto de registro más cercano al lugar donde se pretenden instalar los aerogeneradores que compondrán el sistema eólico de la desaladora.

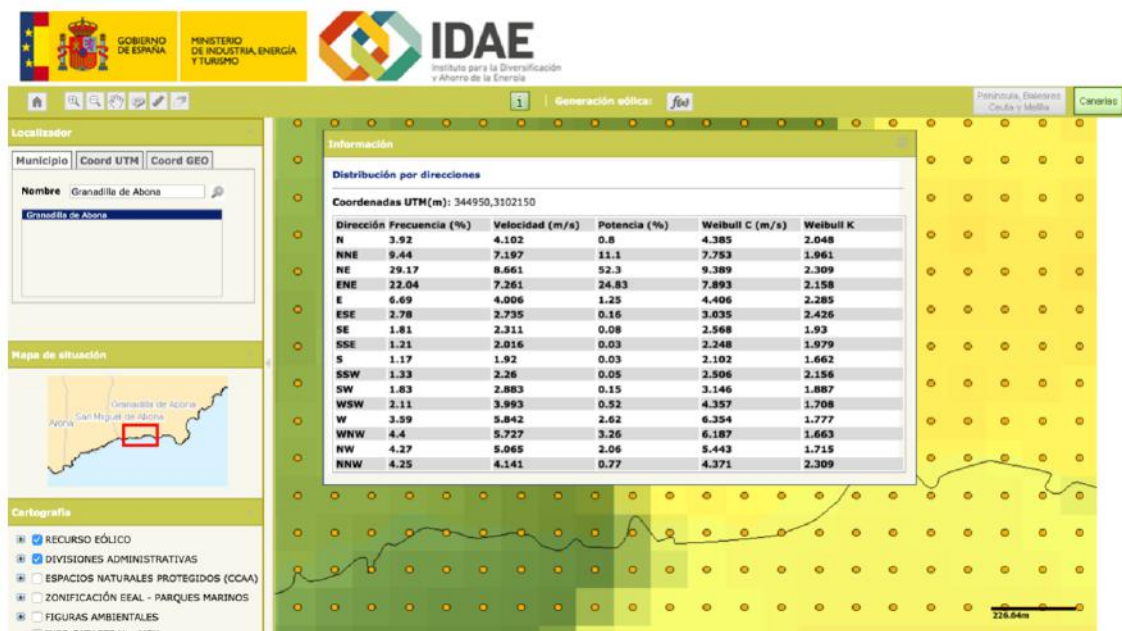


Figura 57. Datos eólicos registrados en el lugar de instalación de los aerogeneradores (IDAE).

En la figura anterior se puede observar, los datos ofrecidos por el IDEA obtenidos en el punto de registro más cercano a la ubicación de la desaladora bajo estudio. A continuación se muestran los mismos en una tabla para mayor claridad.

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	1,920	0,03	2,102	1,662
SSW	1,33	2,260	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 23. Valores eólico obtenidos a través del IDAE.

A través de los datos ofrecidos en la tabla anterior se puede construir la rosa de los vientos, a través de la cual se puede determinar la orientación más adecuado para los aerogeneradores al igual que se puede observar en que direcciones se alcanzan las mayores velocidades.

En este caso se van a construir dos rosas de los vientos, una en la que se muestre la frecuencia con la que sopla el viento en cada una de las direcciones y otra en la que se represente en que direcciones lo hace con mayor o menor intensidad.

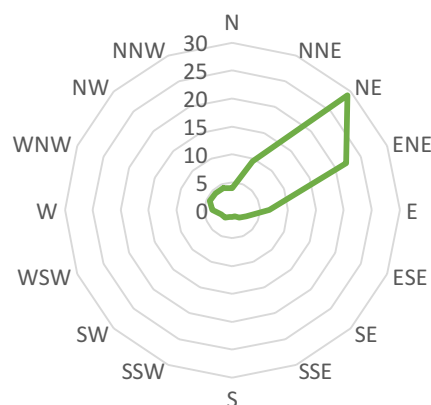


Figura 58. Rosa de los vientos de frecuencias.

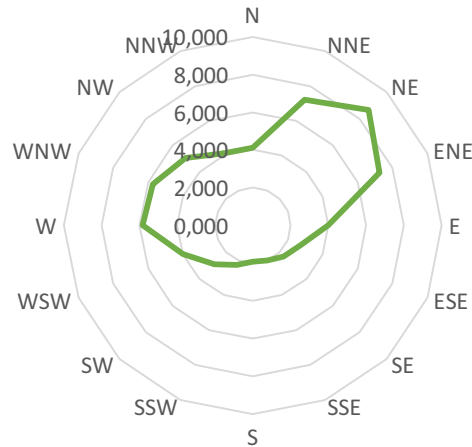


Figura 59. Rosa de los vientos de velocidades.

Como se puede observar en las gráficas anteriores, tanto la dirección en la que sopla el viento con mayor frecuencia como en la que lo hace con mayor intensidad, es la dirección Nordeste. Esta preferencia del viento es destacable, si se compara con el resto de direcciones cardinales.

El hecho de que en la misma dirección coincidan máxima frecuencia y máximas velocidades, tiene como resultado un aprovechamiento más óptimo del aerogenerador. El Nordeste por tanto será la dirección óptima para el máximo aprovechamiento del recurso eólico.

Seguidamente se llevará a cabo el cálculo de la distribución de Weibull, la cual permite conocer la frecuencia con las que se dan las distintas velocidades del viento en una determinada zona. Dicha distribución se calcula a partir de la siguiente expresión.

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

donde:

- $K \equiv$ *parámetro de forma*, suele tener un valor de entre 1,5 y 3 aunque en algún caso aislado se ha llegado a detectar valores cercanos a 1. Además para valores de $K = 2$, la distribución anterior se conoce como distribución de Rayleigh.

- $C \equiv$ parámetro de escala, dado en unidades de $\frac{m}{s}$
- $V \equiv$ velocidad del viento en $\frac{m}{s}$

El valor de estos parámetros para obtener la distribución se obtienen de los datos facilitados por el IDEA recogidos en la tabla 1. Para calcular el valor aproximado de los mismos se ha tomado las medias de los datos que aparecen en dicha tabla, obteniéndose los siguientes valores.

Parámetros de Weibull	Valor medio
WEIBULL C (m/s)	4,759
WEIBULL K	1,998

Tabla 24. Valores medios de los parámetros de Weibull.

A partir de los datos anteriores se pasa a realizar el cálculo de la distribución de Weibull, aunque cabe destacar que en este caso no se ha hecho a través de la expresión anteriormente mostrada sino que se ha hecho uso de la herramienta “Distribución Weibull) del programa informático Excel.

Haciendo uso de los datos anteriores y la función que nos aporta el Excel para el cálculo de la distribución, se calcula la misma para velocidades de 0 a 30 metros por segundo obteniéndose los siguientes resultados.

Velocidad (m/s)	f(v)	f(v) (%)	horas/año
0	0,0000E+00	0,000%	0,00
1	8,4637E-02	8,464%	741,42
2	1,4808E-01	14,808%	1.297,17
3	1,7798E-01	17,798%	1.559,14
4	1,7415E-01	17,415%	1.525,54
5	1,4629E-01	14,629%	1.281,49
6	1,0803E-01	10,803%	946,35
7	7,1029E-02	7,103%	622,21

8	4,1893E-02	4,189%	366,99
9	2,2275E-02	2,227%	195,13
10	1,0712E-02	1,071%	93,84
11	4,6706E-03	0,467%	40,91
12	1,8496E-03	0,185%	16,20
13	6,6612E-04	0,067%	5,84
14	2,1841E-04	0,022%	1,91
15	6,5250E-05	0,007%	0,57
16	1,7774E-05	0,002%	0,16
17	4,4168E-06	0,000%	0,04
18	1,0018E-06	0,000%	0,01
19	2,0744E-07	0,000%	0,00
20	3,9235E-08	0,000%	0,00
21	6,7795E-09	0,000%	0,00
22	1,0705E-09	0,000%	0,00
23	1,5449E-10	0,000%	0,00
24	2,0382E-11	0,000%	0,00
25	2,4587E-12	0,000%	0,00
26	2,7121E-13	0,000%	0,00
27	2,7360E-14	0,000%	0,00
28	2,5246E-15	0,000%	0,00
29	2,1310E-16	0,000%	0,00
30	1,6455E-17	0,000%	0,00

Tabla 25. Valores obtenidos para la distribución de Weibull.

Como se puede observar, a través de la frecuencia que se ha obtenido, haciendo uso de la distribución de Weibull, se han calculado las horas al año que el viento sopla a cada una de las velocidades indicadas en la tabla 3. Para ello se ha multiplicado la frecuencia por el número de horas que posee un año (8760 horas), debido a que dicha frecuencia es el porcentaje, en tanto por uno, en que se dan las diferentes velocidades a lo largo del tiempo.

Además de ello, haciendo uso de los datos expuestos en la tabla 3, se ha construido la gráfica de distribución de velocidades.

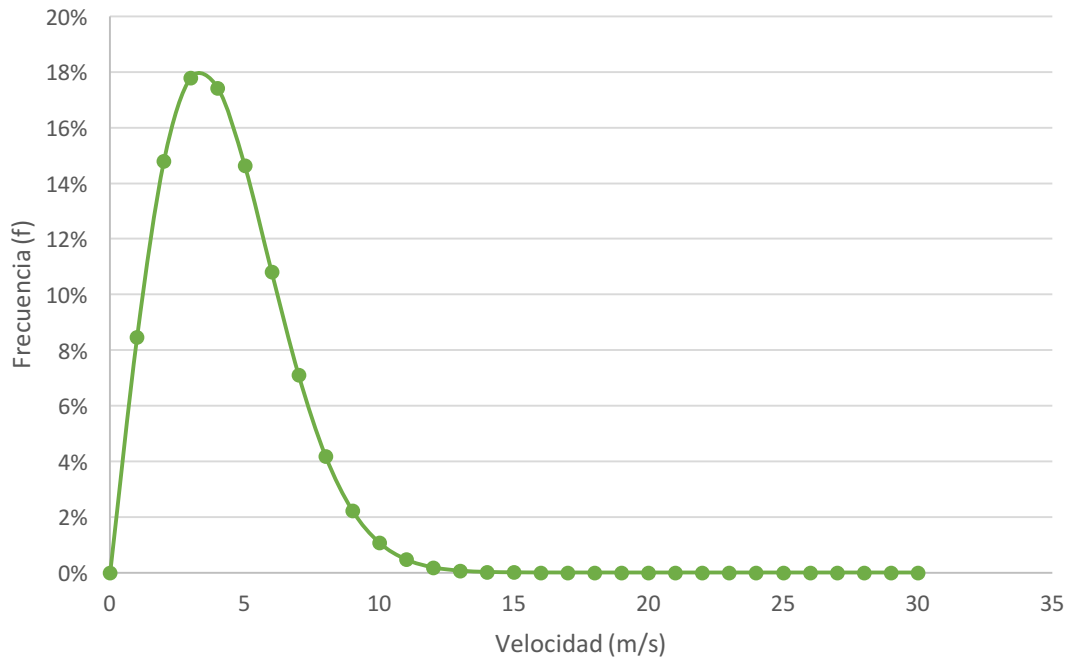


Tabla 26. Distribución de velocidades.

Como era de esperar, el máximo de la gráfica que se observa en la figura anterior se alcanza con una velocidad ligeramente superior a 4 m/s. Esto era de esperar ya que la media de las velocidades que se observan en la tabla 1 tiene un valor de 4,38 m/s.

3.2. Selección del aerogenerador

Seguidamente, con las rosas de los vientos y la distribución de Weibull construida, se pasa a la selección del aerogenerador que se instalará en la planta desaladora con el objetivo de abastecer energéticamente la misma.

Con el fin de obtener el aerogenerador que se adecue mejor a las condiciones eólicas que se dan en la zona de ubicación de nuestra planta se tendrán en cuenta los siguientes requisitos de diseño:

- Se buscará un aerogenerador que nos aporte una potencia anual ligeramente superior al consumo que conlleva el funcionamiento de la desaladora.
- El factor de carga (FC) del aerogenerador tiene que ser el más alto posible.

- Se admiten diseño de uno o dos aerogeneradores, eligiendo la configuración que mejor se adapte a los requisitos previos.

Teniendo en cuenta los requisitos anteriormente comentados se han consultado distintos fabricantes de aerogeneradores, de los cuales se han escogido los aerogeneradores que se han creído más convenientes para las condiciones que se dan en la zona de instalación de la EDAM. Estos fabricantes y los modelos que se han sido objeto de estudio son los que se muestran en la siguiente tabla.

Fabricante	Modelo	Potencia nominal (kW)
Gamesa	G58-850	850
Vestas	V80	2000
Enercon	E-82	2000
Nordex	N80	2500
Made	AE-90	2000
Repower	MM-82	2000

Tabla 27. Aerogeneradores objeto de estudio.

Como se ha comentado anteriormente, se debe elegir un aerogenerador que produzca una cantidad de energía al año ligeramente superior al consumo de la planta desaladora. Es por este motivo que se han de calcular las producciones de cada modelo de aerogenerador.

Cabe destacar que para el modelo de Gamesa G58-850, se tendrán en cuenta dos unidades del mismo.

Para llevar a cabo el cálculo de la producción energética anual de cada uno de los aerogeneradores se hace uso de la curva de potencia que nos ofrecen los fabricantes de los mismos, en la que se puede ver que potencia generan dependiendo de la velocidad del viento, y de las frecuencias obtenidas a través de la distribución de Weibull, a través de las cuales se conoce las horas al año que el viento sopla a una determinada velocidad. Teniendo

en cuenta los parámetros comentados se puede obtener la producción de energía al año de cada aerogenerador.

En este caso, con el fin de agilizar los cálculos y que fueran los mismos lo más fiables posibles, se ha hecho uso de la aplicación online ofrecida por Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) para realizar los cálculos de la producción energética de cada uno de los aerogeneradores. Para hacer uso de esta aplicación web se han de introducir las coordenadas UTM de la ubicación de los mismos, que en el caso de estudio son las siguientes:

COORDENADAS UTM	
X	344840,18
Y	3101725,31

Tabla 28. Coordenadas UTM de la ubicación de la desaladora.

Además de ello, hay que introducir la altura para la cual se desean realizar los cálculos, es decir, la altura que tendrá el aerogenerador. Las más comúnmente usadas y de las cuales se poseen una mayor cantidad de datos son 40, 60 y 80 metros. A pesar de que cuanto mayor altura, los vientos son mayores y más estables debido en gran parte a la menor incidencia de la rugosidad del terreno, para el caso de estudio se ha elegido un valor de 60 metros de altura por los siguientes motivos:

- Debido a la cercanía al aeropuerto Tenerife Sur, ya que no se quieren causar interferencias con el tráfico aeroportuario.
- Como resultado de la búsqueda de la altura de los aerogeneradores usados en el parque eólico del sur de Tenerife, los cuales miden entre 40 y 60 metros de altura.

Mediante la introducción de las coordenadas UTM, la altura y eligiendo el modelo de aerogenerador del que se quiera realizar el estudio, se puede conocer la producción energética del mismo. Para los aerogeneradores indicados en la tabla 5 las producciones de energía anuales son las que se muestran a continuación.

Aerogenerador	Producción energética anual (kWh)
Gamesa G58-850	2132243,7
Vestas V80	4296138,7
Enercon E-82	4931542,3
Nordex N80	4397473,7
Made AE-90	5014948,5
Repower MM-82	4354735,2

Tabla 29. Producciones energéticas anuales de los aerogeneradores seleccionados (ITC).

Seguidamente, prosiguiendo con la selección del aerogenerador se calcula el factor de carga de cada uno de ellos. Dicho factor indica la relación entre la producción energética real del aerogenerador y la producción que tendría el mismo si estuviera trabajando de manera continua a su potencia nominal.

Para el cálculo del factor de carga, se hace uso de la siguiente expresión:

$$FC (\%) = \frac{\text{Producción energética anual (kWh)}}{\text{Producción energética máxima anual (kWh)}} * 100$$

A continuación, se muestra una tabla con diferentes intervalos de valores de factores de carga y la calificación que tienen lo mismo desde el punto de vista energético en un sistema eólico.

Factor de carga (FC)	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 30. Calificación del funcionamiento de las instalaciones según el FC.

Seguidamente, teniendo en cuenta para evaluar los distintos casos los valores aportados por la tabla anterior, se realiza el cálculo del factor de carga para cada uno de los aerogeneradores bajo estudio aplicándole la expresión mostrada anteriormente.

Aerogeneradores	Cantidad	Potencia nominal (kW)	Energía anual producida por unidad(kWh)	Energía anual producida (kWh)	FC (%)	Calificación
Gamesa G58-850	2	850	2132243,7	4264487,4	28,636	Bueno
Vestas V80	1	2000	4296138,7	4296138,7	24,521	Aceptable
Enercon E-82	1	2000	4931542,3	4931542,3	28,148	Bueno
Nordex N80	1	2500	4397473,7	4397473,7	20,079	Aceptable
Made AE-90/2MW	1	2000	5014948,5	5014948,5	28,624	Bueno
Repower MM-82	1	2000	4354735,2	4354735,2	24,855	Aceptable

Tabla 31. Factor de carga y producción energética anual para los aerogeneradores seleccionados.

Por último, en vista de los datos obtenidos, y teniendo en cuenta de que el consumo energético anual de la desaladora es de 4257360 kWh (suponiendo una disponibilidad del 90%), se ha elegido el aerogenerador G58-850 fabricado por Gamesa del que se instalarán dos unidades.

A continuación se muestra una tabla resumen con los datos obtenidos para el aerogenerador elegido.

Fabricante	Gamesa
Modelo	G58-850
Potencia nominal (kW)	850
Unidades instaladas	2
Producción energética anual (kWh)	4264487,4
Factor de carga	28,636
Consumo anual de la planta (kWh)	4257360
Exceso energético estimado (kWh)	7127,4

Tabla 32. Parámetros de importancia del aerogenerador seleccionado.

Esta elección es la más adecuada para la planta desaladora bajo estudio ya que presenta una producción energética ligeramente superior a la demanda de la planta y además posee el factor de carga más elevado.

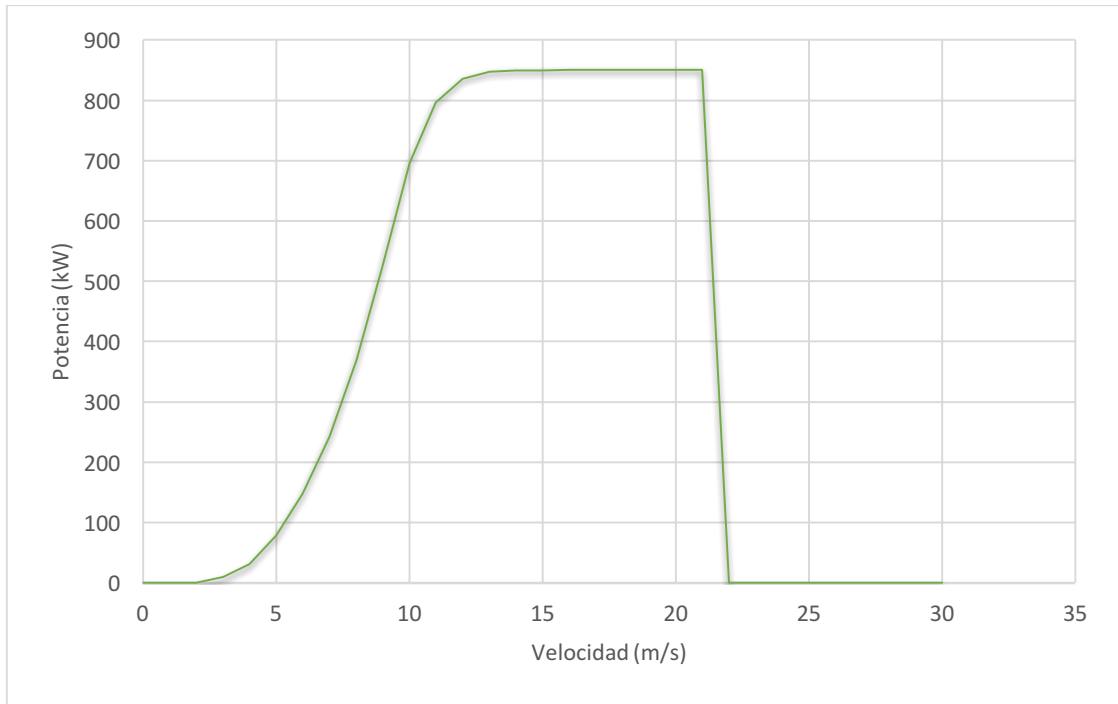


Figura 60. Curva de potencia aerogenerador G58-850.

3.3. Solución para la variabilidad de producción eólica

Como se sabe a pesar de que la producción energética anual del aerogenerador sea similar al consumo de la EDAM, no se puede asegurar el abastecimiento energético de la planta debido a variabilidad del viento. Esto hace que haya momentos en los que se produzca un exceso de energía procedente de los aerogeneradores y otros en los que haya escasez de la misma.

Con el fin de solucionar este problema se conectará la planta desaladora a la red eléctrica, de manera que se pueda ceder a la misma los excesos de energía producida en los picos de producción con el fin de no desaprovecharla y tomar energía en los momentos de escasez de producción. El problema de todo ello es que la red eléctrica no es un verdadero almacenador de energía, con lo cual, la energía en exceso producida en la instalación no puede ser cedida a la misma en caso de que no haya escasez de la misma.

Teniendo en cuenta la problemática anterior, se han encontrado dos posibles soluciones que tienen el objetivo de desaprovechar la menor cantidad de energía posible:

- Destinar el exceso energético a la producción de hidrógeno, el cual puede ser almacenado y usado posteriormente a través de pilas de combustible para producir energía eléctrica en los momentos de escasez de la misma.
- Diseñar un sistema de almacenamiento a través de baterías que pueda almacenar parte de la energía generada en exceso, con el fin de utilizar la misma en los momentos en que no haya producción de la misma.

Se han contemplado otras opciones como la que se ha implantado en la isla de El Hierro, a través de la cual la energía producida en exceso es usada para la elevación de agua desde un depósito a una determinada cota a otro que se encuentra en una cota superior, para luego en los momentos de escasez utilizar la energía hidráulica del agua para la producción de energía como en una central hidroeléctrica. Esta opción era inviable debido a las condiciones del terreno.

ANEXO IV

CÁLCULOS ENERGÉTICOS

4. Cálculos energéticos

4.1. Consumo específico de la planta

Una vez se han elegido todos los equipos que se han de instalar en la planta desaladora y se conocen las potencias de todos ellos, se pasa a realizar el cálculo del consumo específico de la planta. Este consumo es un parámetro característico de las instalaciones de desalación, a partir del cual se conoce el consumo de energía en kWh por cada metro cúbico de agua desalada.

Para realizar el cálculo del mismo, lo primero que se ha de conocer son las potencia y a su vez el consumo energético de los diferentes dispositivos instalados en la planta.

La potencia a partir de la que se ha hecho el cálculo energético para cada una de las bombas, es la potencia máxima que consumen los motores eléctricos asociados a las mismas, aunque en realidad el consumo es algo menor. Se ha decidido tomar esta consideración con el fin de obtener de realizar los cálculos teniendo en cuenta el peor de los casos desde el punto de vista energético.

Además de ello, para realizar el cálculo del consumo energético de las bombas se ha supuesto un trabajo continuo de las mismas sin paradas a lo largo del día, es decir, 24 horas de funcionamiento diarias.

Los resultados del consumo energético de las bombas teniendo en cuenta las consideraciones anteriores son los que se muestran a continuación:

Dispositivo	Cantidad	Potencia (kW)	Tiempo (horas)	Energía consumida al día (kWh)
Bomba AP	1	375	24	9000
Bomba Booster	1	11	24	264
Bomba de captación	2	67	24	3216
Bomba de distribución	1	20	24	480

Tabla 33. Potencias y consumos energéticos de las distintas bombas.

Una vez se conocen los consumos energéticos diarios de cada uno de los dispositivos, se pasa a realizar el cálculo del consumo específico de la planta. Para ello se hace uso de la siguiente expresión.

$$\text{Consumo específico} = \frac{\text{Consumo energético diario}}{\text{Producción diaria}}$$

A partir de la expresión anterior, teniendo en cuenta el consumo total de las diferentes bombas y añadiéndole 0,15 kWh/m³ correspondiente al consumo de otros equipos como válvulas, sistemas de control, etc. calculamos el consumo específico de la desaladora bajo estudio en el presente proyecto.

$$\text{Consumo específico} = \frac{\text{Consumo energético diario}}{\text{Producción diaria}}$$

$$\text{Consumo específico} = \frac{9000 \text{ kWh} + 264 \text{ kWh} + 3216 \text{ kWh} + 480 \text{ kWh}}{4500 \text{ m}^3} + 0,15 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Consumo específico} = 3,03 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

4.2. Costes de producción y consumo energético anual

A partir del consumo específico de la planta se pasa a calcular el coste del metro cúbico, el consumo energético anual y el coste energético anual. En primer lugar, se pasa a calcular el coste del metro cúbico conociendo que el valor medio del kWh, según datos extraídos de la página web de Endesa, es de 0,141033 euros. El cálculo de dicho costo se encuentra a continuación.

$$\text{Coste } m^3 = \text{Consumo específico} * \text{Precio del kwh}$$

$$\text{Coste } m^3 = 3,03 \frac{kWh}{m^3} * 0,141033 \frac{euros}{kWh}$$

$$\text{Coste } m^3 = 0,427 \frac{euros}{m^3}$$

En segundo lugar, se calcula el consumo energético anual teniendo en cuenta el consumo energético diario, y que se considera una disponibilidad del 90% al año.

$$\text{Consumo energético anual} = \text{Consumo energético diario} * \text{Disponibilidad} * 365 \text{ días}$$

$$\text{Consumo energético anual} = (9000 + 264 + 3216 + 480)kWh * 0,9 * 365 \text{ días}$$

$$\text{Consumo energético anual} = 4257360 kWh$$

Seguidamente, teniendo en cuenta el consumo energético anual anteriormente calculado y el precio del kWh se obtiene, multiplicando ambos, el coste energético anual.

$$\text{Coste energético anual} = \text{Consumo energético anual} * \text{Precio del kWh}$$

$$\text{Coste energético anual} = 4257360 kWh * 0,141033 \frac{euros}{kWh}$$

$$\text{Coste energético anual} = 600428,25 euros$$

Como vemos el coste energético anual tiene un valor de 600428,25 euros, costo que a priori no se tendría en la planta ya que la misma está conectada a los aerogeneradores calculados en el Anexo III, los cuales tiene un producción anual media superior al consumo de la planta. Esto es relativo, ya que como se sabe la planta no estará abastecida de manera continua por los aerogeneradores debido a la variabilidad del viento. Es por ello que se han de buscar soluciones como las aportadas en el Anexo III, para solventar este problema de la manera más eficiente y con los menores costos energéticos.

A continuación, se presenta una tabla resumen en la cual quedan reflejados los cálculos energéticos realizados.

Consumo específico (kWh/m³)	3,03
Coste del metro cúbico desalado (euros/m³)	0,427
Consumo energético diario (kWh)	12960
Consumo energético anual (kWh)	4257360
Coste energético anual (euros)	600428,25

Tabla 34. Tabla-resumen cálculos energéticos.