



**Escuela Superior
de Ingeniería y Tecnología**
Universidad de La Laguna

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO CON ENERGÍA EÓLICA PARA ABASTECIMIENTO HUMANO EN GRAN CANARIA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

AUTOR: Marvin Jozef González Van leeuwe

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ÍNDICE GENERAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO
CON ENERGÍA EÓLICA PARA ABASTECIMIENTO HUMANO
EN GRAN CANARIA**

AUTOR: Marvin Jozef González Van leeuwe

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

MEMORIA

1. Objeto	1
1.1. Abstract.....	1
2. Alcance	2
3. Justificación del proyecto	4
4. Antecedentes	5
4.1. Recursos hídricos a nivel mundial.....	5
4.2. Recursos hídricos en España y en las Islas Canarias.....	6
4.3. Desalación de agua de mar	8
4.3.1. Osmosis inversa (OI)	9
4.3.1. Antecedentes de desalación en Canarias y en la isla de Gran Canaria	10
4.4. Energía eólica	13
4.4.1. Viento.....	13
4.4.2. Aerogeneradores	14
4.4.3. Tendencias de generación de la energía eólica	15
4.4.4. Generación de energía a partir del hidrógeno	16
4.5. Antecedentes de sistemas de OI con energía eólica.....	17
5. Normativa y referencias	18
5.1. Disposiciones legales y normativa aplicable	18
5.2. Bibliografía	18
5.3. Programas de cálculo y herramientas empleadas	18
5.4. Otras referencias	19
6. Definiciones y abreviaturas	20

6.1. Definiciones.....	20
6.2. Abreviaturas.....	20
7. Requisitos de diseño.....	21
7.1. Requisitos establecidos por el peticionario.....	21
7.2. Emplazamiento.....	21
7.3. Capacidad de la planta.....	28
7.4. Datos de partida.....	32
7.4.1. Temperatura del agua de captación/alimentación.....	32
7.4.2. Composición del agua de captación/alimentación.....	33
7.4.3. Valores límite en la composición del agua producto.....	34
8. Análisis de soluciones.....	35
8.1. Esquema general de todas las instalaciones.....	35
8.2. Sistema de captación de agua de mar.....	36
8.2.1. Tipo de captación.....	36
8.2.2. Pozos de captación.....	36
8.3. Núcleo de desalación.....	37
8.3.1. Elección del modelo de membranas.....	37
8.3.2. Especificaciones del bastidor de membranas.....	38
8.3.3. Recuperador de energía y selección final del bastidor de membranas.....	39
8.3.4. Resumen de las características del núcleo de desalación.....	40
8.3.5. Prueba con membranas híbridas.....	41
8.4. Tuberías principales (longitudes, cotas y diámetros).....	41
8.4.1. Tuberías de captación.....	42
8.4.2. Tubería de alimentación.....	42
8.4.3. Tuberías de distribución.....	43

8.4.4. Tubería de rechazo de salmuera	44
8.4.5. Resumen de las tuberías principales de la EDAM	44
8.5. Tratamientos sobre el agua	44
8.5.1. Pretratamientos físicos	45
8.5.2. Pretratamientos químicos	45
8.5.3. Postratamientos	45
8.6. Bombas principales del sistema	46
8.6.1. Bombas de captación	47
8.6.2. Bombas de distribución	47
8.6.3. Bomba de rechazo	48
8.6.4. Bomba de alta presión (HPP)	48
8.6.5. Bomba Booster	49
8.7. Resumen de las bombas y consumo específico final.....	50
8.8. Dimensionamiento del sistema eólico	51
8.8.1. Análisis del recurso eólico	51
8.8.2. Selección del aerogenerador para la potencia prevista	52
8.9. Aprovechamiento de energía.....	54
9. Resultados	55
9.1. Ubicación de las instalaciones y poblaciones a abastecer	55
9.2. Finalidad de la EDAM.....	56
9.3. Sistemas de captación y alimentación	56
9.4. Pretratamientos	56
9.5. Núcleo de desalación	56
9.6. Sistema de distribución.....	57
9.7. Postratamientos	57

9.8. Rechazo de salmuera 57

9.9. Abastecimiento con energía eólica..... 58

9.10. Aprovechamiento de energía..... 58

10. Conclusiones59

10.1. Conclusions 60

ANEXO I – Introducción teórica a la desalación por osmosis inversa

1. Generalidades de la desalación de agua de mar	1
2. Funcionamiento de la osmosis inversa	3
2.1. Ecuaciones fundamentales empleadas en la osmosis inversa.....	4
3. Parámetros característicos de la osmosis inversa	7
3.1. Salinidad y conductividad	7
3.2. Composición química.....	8
3.3. Gases disueltos.....	9
3.4. Temperatura.....	9
3.5. pH	10
3.6. Alcalinidad.....	10
3.7. Dureza	10
4. Instalaciones desaladoras de osmosis inversa	11
4.1. Captación	11
4.1.1. Captación cerrada (Pozos)	11
4.1.2. Captación abierta.....	13
4.2. Pretratamiento	14
4.2.1. Pretratamiento físico	14
4.2.2. Pretratamiento químico	15
4.3. Postratamiento	16
4.4. Núcleo de desalación	17
4.4.1. Bastidor de membranas	17
4.4.2. Colocación de las membranas	20

4.4.3. Parámetros técnicos de las membranas	21
4.4.4. Recuperador de energía	21
4.5. Bombas.....	22
4.6. Depósito regulador.....	23
4.7. Otros elementos y equipos de las instalaciones desaladoras	23

ANEXO II – Cálculos para el dimensionamiento del sistema de desalación

1. Introducción.....	1
2. Dimensionamiento inicial del bastidor de membranas	2
2.1. Análisis del agua de mar y requisitos necesarios para su consumo.....	2
2.2. Elección de las membranas con IMSDesign	5
2.2.1. Tren de permeado.....	5
2.2.2. Preselección de los modelos de membranas	6
2.2.3. Cálculos y selección final del modelo de membranas	8
2.3. Especificación inicial del sistema de desalación	12
2.3.1. Selección del número de etapas	12
2.3.2. Selección de la conversión y número de membranas y tubos de presión	12
3. Dimensionado del recuperador de energía.....	17
3.1. Obtención de parámetros con IMSDesign	18
3.2. Introducción de datos en la hoja de cálculo.....	21
3.3. Análisis de los resultados obtenidos	23
4. Pruebas con bastidor de membranas híbridas.....	27

ANEXO III – Cálculos para el dimensionamiento de tuberías, bombas y tratamientos. Consumo específico final

1. Introducción	1
2. Dimensionamiento del sistema de captación.....	2
2.1. Tipo de captación (Pozos).....	3
2.2. Número total de pozos de captación y colocación en el espacio.....	3
2.3. Dimensionamiento de los pozos de captación.....	4
3. Dimensionamiento de las longitudes de tuberías y su colocación en el terreno	8
3.1. Longitud y cotas de altura de las tuberías de captación	8
3.2. Longitud y cotas de altura de la tubería de alimentación	8
3.3. Longitud y cotas de altura de la tubería de distribución	9
3.4. Longitud y cotas de altura de la tubería de rechazo de salmuera	12
4. Dimensionamiento de los diámetros de las tuberías	14
4.1. Elección del material de las tuberías y diámetros nominales	14
4.2. Cálculos de los diámetros de las tuberías	17
5. Dimensionamiento del pretratamiento	19
5.1. Pretratamiento físico	19
5.2. Pretratamiento químico	20
6. Dimensionamiento del postratamiento	21
7. Cálculo de las pérdidas de carga en la instalación	22
7.1. Pérdidas de carga en las tuberías	22
7.2. Pérdidas de carga en los accesorios de las tuberías	25
7.3. Pérdidas de carga totales.....	27

8. Dimensionamiento de las bombas de la instalación.....	29
8.1. Procedimientos de selección de las bombas	29
8.1.1. Balance de energía	29
8.1.2. Curvas características y punto de operación	31
8.1.3. Cavitación	33
8.2. Bombas de captación	35
8.2.1. Cálculos para la bomba de captación	35
8.2.2. Selección de la bomba de captación	36
8.3. Bomba de distribución.....	40
8.3.1. Cálculos para la bomba de distribución	40
8.3.2. Selección de la bomba de distribución.....	41
8.4. Bomba de rechazo de salmuera	45
8.4.1. Cálculos para la bomba de rechazo	45
8.5. Bomba de alta presión (HPP).....	46
8.5.1. Cálculos para la bomba de alta presión (HPP).....	46
8.5.2. Selección de la bomba de alta presión (HPP)	47
8.6. Bomba Booster	49
8.6.1. Cálculos para la bomba Booster.....	49
8.6.2. Selección de la bomba Booster	50
8.7. Resumen de las bombas del sistema	53
9. Cálculo del consumo específico final de la EDAM	54
9.1. Consumo específico final con ERI	54
9.2. Consumo específico final con IMSDesign	55
9.3. Consumo específico final con las potencias de las bombas	56

ANEXO IV – Cálculos para el dimensionamiento del sistema eólico

1. Introducción	1
2. Análisis del recurso eólico de la zona.....	2
2.1. Emplazamiento del aerogenerador	2
2.2. Datos del recurso eólico y orientación del aerogenerador	3
2.3. Distribución de probabilidad de velocidad del viento	6
3. Selección del aerogenerador para la potencia prevista	9
3.1. Energía eléctrica necesaria y coordenadas del emplazamiento.....	11
3.2. Selección de los modelos disponibles en el mercado	12
3.3. Análisis energético de los modelos disponibles.....	15
3.4. Selección final del modelo específico de aerogenerador.....	17

ANEXO V – Aprovechamiento del exceso de energía eólica y del rechazo de salmuera de osmosis inversa

1. Introducción.....	1
2. Aprovechamiento de la energía eólica	2
2.1. Hidrógeno	2
2.2. Vertido a la red eléctrica	3
2.3. Bombeo reversible (elevación de agua)	4
2.4. Compresión de aire	4
2.5. Desalinear el aerogenerador	5
2.6. Otras opciones para casos donde haya déficit de energía eólica.....	5
3. Aprovechamiento de la salmuera.....	6

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

MEMORIA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO
CON ENERGÍA EÓLICA PARA ABASTECIMIENTO HUMANO
EN GRAN CANARIA**

AUTOR: Marvin Jozef González Van leeuwe

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

HOJA DE IDENTIFICACIÓN

TÍTULO DEL PROYECTO

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO CON ENERGÍA EÓLICA PARA ABASTECIMIENTO HUMANO EN GRAN CANARIA.

DATOS DEL PETICIONARIO

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

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

TELÉFONO: +34 922 845 059

E-MAIL: esit@ull.es

DATOS DEL AUTOR

NOMBRE: MARVIN JOZEF GONZÁLEZ VAN LEEUWE

NIF: 43382805-K

DATOS DEL TUTOR

NOMBRE: VICENTE JOSÉ ROMERO TERNERO

FECHA

JULIO 2018

ÍNDICE - MEMORIA

1. Objeto.....	1
1.1. Abstract	1
2. Alcance.....	2
3. Justificación del proyecto	4
4. Antecedentes.....	5
4.1. Recursos hídricos a nivel mundial.....	5
4.2. Recursos hídricos en España y en las Islas Canarias	6
4.3. Desalación de agua de mar.....	8
4.3.1. Osmosis inversa (OI).....	9
4.3.2. Antecedentes de desalación en Canarias y en la isla de Gran Canaria	10
4.4. Energía eólica	13
4.4.1. Viento	13
4.4.2. Aerogeneradores.....	14
4.4.3. Tendencias de la generación de energía eólica	15
4.4.4. Generación de energía a partir del hidrógeno	16
4.5. Antecedentes de sistemas de OI con energía eólica	17
5. Normativa y referencias.....	18
5.1. Disposiciones legales y normativa aplicable	18
5.2. Bibliografía.....	18
5.3. Programas de cálculo y herramientas empleadas.....	18
5.4. Otras referencias.....	19
6. Definiciones y abreviaturas	20

6.1. Definiciones	20
6.2. Abreviaturas	20
7. Requisitos de diseño	21
7.1. Requisitos establecidos por el peticionario.....	21
7.2. Emplazamiento	21
7.3. Capacidad de la planta.....	28
7.4. Datos de partida.....	32
7.4.1. Temperatura del agua de captación/alimentación	32
7.4.2. Composición del agua de captación/alimentación	33
7.4.3. Valores límites en la composición del agua producto.....	34
8. Análisis de soluciones.....	35
8.1. Esquema general de todas las instalaciones	35
8.2. Sistema de captación de agua de mar	36
8.2.1. Tipo de captación	36
8.2.2. Pozos de captación	36
8.3. Núcleo de desalación.....	37
8.3.1. Elección del modelo de membranas.....	37
8.3.2. Especificaciones del bastidor de membranas	38
8.3.3. Recuperador de energía y selección final del bastidor de membranas	39
8.3.4. Resumen de las características del núcleo de desalación.....	40
8.3.5. Prueba con membranas híbridas	41
8.4. Tuberías principales (longitudes, cotas y diámetros).....	41
8.4.1. Tuberías de captación.....	42
8.4.2. Tubería de alimentación.....	42
8.4.3. Tubería de distribución	43

8.4.4. Tubería de rechazo de salmuera	44
8.4.5. Resumen de las tuberías principales de la EDAM	44
8.5. Tratamientos sobre el agua	44
8.5.1. Pretratamientos físicos	45
8.5.2. Pretratamientos químicos	45
8.5.3. Postratamientos	45
8.6. Bombas principales del sistema	46
8.6.1. Bombas de captación	47
8.6.2. Bombas de distribución	47
8.6.3. Bomba de rechazo	48
8.6.4. Bomba de alta presión (HPP)	48
8.6.5. Bomba Booster	49
8.7. Resumen de las bombas y consumo específico final	50
8.8. Dimensionamiento del sistema eólico	51
8.8.1. Análisis del recurso eólico	51
8.8.2. Selección del aerogenerador para la potencia prevista	52
8.9. Aprovechamiento de energía	54
9. Resultados	55
9.1. Ubicación de las instalaciones y poblaciones a abastecer	55
9.2. Finalidad de la EDAM	56
9.3. Sistemas de captación y alimentación	56
9.4. Pretratamientos	56
9.5. Núcleo de desalación	56
9.6. Sistema de distribución	57
9.7. Postratamientos	57

9.8. Rechazo de salmuera	57
9.9. Abastecimiento con energía eólica	58
9.10. Aprovechamiento de energía.....	58
10. Conclusiones	59
10.1. Conclusions	60

Índice de figuras – Memoria

Figura 1: Disponibilidad de agua dulce en el planeta Tierra en el año 2000 (Fuente: www.3.bp.blogspot.com)	5
Figura 2: Crecimiento de la población mundial entre 1750 y 2050 (Fuente: www.habitat.aq.upm.es).....	6
Figura 3: Escorrentía total media anual en el territorio español (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)	7
Figura 4: Crecimiento demográfico de las Islas Canarias entre los años 2000 y 2011 (Fuente: ISTAC).....	8
Figura 5: Esquema del proceso de osmosis directa (Fuente: www.aquasalud.com).....	9
Figura 6: Esquema del proceso de osmosis inversa (Fuente: www.aquasalud.com).....	10
Figura 7: Cantidad de agua desalada consumida en las Islas Canarias (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de la FCCA)	11
Figura 8: Patrones globales de viento en el planeta Tierra (Fuente: www.ilustresmarinos.wordpress.com)	14
Figura 9: Partes principales de un aerogenerador (Fuente: www.centraleolica.wordpress.com) .	14
Figura 10: Potencia eólica acumulada a nivel mundial entre 2001 y 2017 (Fuente: Global Wind Energy Council)	16
Figura 11: Instalaciones desaladoras activas en el municipio de Agüimes, G.C. (Fuente: Aguas Gran Canaria)	23
Figura 12: Densidad de potencia media del viento a 80 metros de altura en Canarias (Fuente: IDAE).....	23
Figura 13: Núcleos poblacionales que abastecerá nuestra EDAM (Fuente: Google Maps)	24
Figura 14: Colocación inicial de las EDAM y del sistema de captación (Fuente: Grafcan).....	25
Figura 15: Perfil longitudinal del terreno en el emplazamiento inicial (Fuente: Goolzoom)	25
Figura 16: Emplazamientos definitivos para la EDAM y los pozos de captación (Fuente: Grafcan).....	26
Figura 17: Características de la parcela seleccionada para la EDAM (Fuente: Grafcan)	26
Figura 18: Características de la parcela seleccionada para los pozos de captación (Fuente: Grafcan).....	26
Figura 19: Terreno en el que se colocará nuestro sistema eólico (Fuente: Grafcan)	27

Figura 20: Espacios naturales protegidos de la zona, en color azul (Fuente: Grafcan)	27
Figura 21: Usos del suelo de la zona, en color lila los de uso industrial (Fuente: Grafcan).....	28
Figura 22: Número de habitantes entre los años 2012 y 2016 en las zonas de interés (Fuente: ISTAC).....	29
Figura 23: Tasa de variación interanual del número de habitantes en el municipio de Agüimes (Fuente: ISTAC)	29
Figura 24: Consumo medio en la comunidad de Canarias en el año 2014, junto con su tasa de variación anual (Fuente: INE).....	31
Figura 25: Esquema general de todas las instalaciones (Fuente: Elaboración propia)	35
Figura 26: Esquema de la colocación de los pozos de captación y del punto colector (Fuente: Elaboración propia).....	37
Figura 27: Membrana SWSC4 MAX, del fabricante Hydranautics (Fuente: www.membranes.com)	38
Figura 28: Interior del intercambiador de presión PX-Q300 (Fuente: Energy Recovery).....	39
Figura 29: Distancia en metros desde los pozos de captación hasta la EDAM (Fuente: Goolzoom)	43
Figura 30: Longitud de la tubería de distribución desde la EDAM hasta el depósito regulador (Fuente: Goolzoom)	43
Figura 31: Distancia desde la EDAM hasta la isobata de -20 metros (Fuente: Grafcan)	44
Figura 32: Imagen de la bomba sumergible Wilo K8.130 (Fuente: Wilo-Select 4)	47
Figura 33: Imagen de la bomba Grundfos CR 150-6 (Fuente: Grundfos Webcaps)	48
Figura 34: Imagen de la bomba KSB CA 125-10.2 (Fuente: KSB Easysselect).....	49
Figura 35: Imagen de la bomba Etaline 150-150-200 (Fuente: KSB Easysselect)	49
Figura 36: Aerogenerador seleccionado para nuestra EDAM (Fuente: Grafcan).....	51
Figura 37: Rosa de los vientos de las frecuencias (%) y las velocidades (m/s) a 80 m en el más punto cercano al emplazamiento del aerogenerador (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de IDAE).....	52
Figura 38: Gráfica de distribución de velocidades obtenida mediante Weibull (Fuente: Elaboración propia).....	52
Figura 39: Aerogenerador D6 62/1250kW de DeWind (Fuente: www.en.wind-turbine-models.com).....	53

Figura 40: Ubicación seleccionada para las instalaciones de nuestro proyecto, junto a las poblaciones que se abastecerán (Fuente: Grafcan)55

Índice de tablas – Memoria

Tabla 1: Total de volumen de agua desalada en las Islas Canarias (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de la FCCA)	11
Tabla 2: Cálculo del número de habitantes en las zonas a abastecer en 2023 a partir de los datos conocidos (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos del ISTAC).....	30
Tabla 3: Cálculo del consumo de agua para Canarias para el año 2023 (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos del INE).....	31
Tabla 4: Valores para la temperatura del agua de mar tomados a lo largo del año 2017 por la Boya de Gran Canaria (Fuente: Puertos del Estado).....	33
Tabla 5: Valores para la composición del agua de mar en S/C de Tenerife (Fuente: Labaqua)...	34
Tabla 6: Valores límite establecidos para agua de abastecimiento humano (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos del RD 140/2003).....	34
Tabla 7: Resumen para cada opción de membranas y % de conversión (Fuente: Elaboración propia)	39
Tabla 8: Consumos para cada configuración con el intercambiador de presión (Fuente: Elaboración propia).....	40
Tabla 9: Características del núcleo de desalación con rendimientos de bombas supuestos (Fuente: Elaboración propia).....	41
Tabla 10: Resultados para cada combinación de membranas híbridas estudiadas (Fuente: Elaboración propia).....	41
Tabla 11: Resumen de las tuberías principales del sistema (Fuente: Elaboración propia)	44
Tabla 12: Resultados finales para las pérdidas de carga en nuestra EDAM (Fuente: Elaboración propia)	46
Tabla 13: Modelos seleccionados para las bombas de captación (Fuente: Elaboración propia) ..	47
Tabla 14: Modelos seleccionados para las bombas de distribución (Fuente: Elaboración propia)	47
Tabla 15: Modelos seleccionados para la bomba Booster (Fuente: Elaboración propia)	49
Tabla 16: Consumos específicos de cada bomba de la EDAM (Fuente: Elaboración propia)	50
Tabla 17: Lista de modelos de aerogeneradores disponibles (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de www.thewindpower.net y de la aplicación online del ITC)	53

1. Objeto

Este trabajo se ha realizado teniendo como fin principal la demostración de los conocimientos y competencias adquiridos a lo largo del Grado en Ingeniería Mecánica. El desarrollo de este proyecto será de tipo autónomo e individual, con la supervisión de un tutor académico. Dentro de los conocimientos y competencias a desarrollar, destacarán: la redacción, firma y desarrollo de proyectos de ingeniería, el manejo de normativas y reglamentos pertenecientes al ámbito del trabajo, y la realización de cálculos y mediciones.

El objetivo específico de este proyecto es el estudio de una instalación desaladora de agua de mar, que tendrá como emplazamiento el Polígono Industrial de Arinaga, en Gran Canaria (España). El destino del agua desalada, 3500 m³/día, será el abastecimiento de agua potable a los núcleos poblacionales cercanos al emplazamiento de la planta, dentro del municipio de Agüimes. Este abastecimiento será completo durante los próximos cinco años, para poder afrontar el crecimiento de la población local y el turismo, y el aumento de su consumo de agua potable. Una vez pasado este periodo, se podrá optar por un aumento de la capacidad de la planta desaladora.

El consumo específico de la planta es de 3,53 kWh/m³, que será abastecido con un aerogenerador con una potencia nominal de 1250 kW. Se analizarán los consumos energéticos de la planta y la generación de energía eólica, y se dimensionarán los elementos principales de los cuales se compone una planta desaladora de este tipo, de osmosis inversa.

1.1. Abstract

This project has been developed with the principal objective of demonstrating the knowledge and competences acquired during the Mechanical Engineering Degree. This project will be developed in an autonomous and individual environment, with the supervision of an academic tutor. Within all the knowledge and competences to be developed, the ones who stand out, are: the redaction and development of engineering projects, the handling of norms and regulations which affect our topic, and the skills of making calculations and measurements.

The specific objective of this project is the study of a seawater desalination plant, which will be located at Polígono Industrial de Arinaga, in Gran Canaria (Spain). The destiny of the desalted water, 3500 m³/day, will be the supplying of drinking water to the populations nearby our plant, within the municipality of Agüimes. This supply will account for all the drinking water consumed in the region during the next five years, to face the growth of population and tourism, and the increase of their drinking water consumption. Once this time period is over, the capacity of the plant could be increased.

The specific consumption of our plant will be 3,53 kWh/m³, which will be supplied with a wind turbine with a nominal power of 1250 kW. The specific consumptions and the generation of wind energy will be analyzed, and the main elements of the inverse osmosis system will be sized.

2. Alcance

En este proyecto se estudiará una planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa, que se alimentará energéticamente a partir de un sistema eólico de aerogeneradores. Estará ubicada en el municipio de Agüimes, en Gran Canaria, concretamente en el Polígono Industrial de Arinaga. La planta producirá 3500 m³ de agua potable al día, cuyo destino final será el abastecimiento con agua potable de los núcleos poblacionales de Cruce, Playa y Polígono Industrial de Arinaga.

Este estudio se centrará en el dimensionamiento del núcleo de desalación y de su consumo, para lo cual se dimensionará también un sistema eólico con la capacidad necesaria para alimentar a dicho núcleo de desalación. Además, se realizará también un estudio de las posibilidades de aprovechamiento del rechazo de salmuera, proveniente de la desalación, y de los excesos de energía eléctrica generados por el sistema eólico.

Así, los apartados de este proyecto serán los que se enumeran a continuación, separados en tres grandes grupos.

Primero, los apartados del núcleo de desalación, que son:

- Emplazamiento de las instalaciones desaladoras.
- Cálculo de la producción diaria necesaria para abastecer a las poblaciones objetivo (capacidad de la planta).
- Dimensionamiento del núcleo de desalación:
 - Estudio del agua de mar que se someterá al proceso de desalación.
 - Elección de las membranas de desalación por osmosis inversa.
 - Dimensionamiento del bastidor de membranas.
 - Elección y dimensionamiento del sistema de recuperación de energía.
 - Elección, emplazamiento y dimensionamiento de las tuberías principales del sistema.
 - Elección y dimensionamiento de las bombas principales del sistema.
- Dimensionado de los pre y post-tratamientos del sistema.
- Dimensionado del sistema de captación del agua de alimentación.
- Dimensionado del sistema de distribución de agua producto.
- Dimensionado del sistema de rechazo de salmuera.
- Cálculo del consumo específico de la planta desaladora.

Segundo, los apartados del sistema eólico, que son los siguientes:

- Emplazamiento de los aerogeneradores.
- Cálculo del potencial eólico en el emplazamiento de los aerogeneradores.
- Estudio de la producción energética promedio de una selección de modelos de aerogeneradores en dicho emplazamiento.
- Elección del modelo de aerogenerador que abastecerá las necesidades energéticas de la planta desaladora.

Y, por último, los apartados del estudio de aprovechamiento de energía, que tratarán sobre la gestión del exceso de energía eólica producida y del potencial energético del rechazo de salmuera.

También se ha realizado un documento de introducción teórica a la desalación por osmosis inversa, en donde se explican brevemente los elementos tenidos en cuenta en este estudio y sus funciones en una planta de desaladora de este tipo.

Cabe destacar que, al no ser este un proyecto ejecutable, se excluyen los siguientes documentos de este estudio:

- Estudio de seguridad y salud (tanto básico como de entidad propia).
- Pliego de condiciones.
- Mediciones y presupuestos (por lo que se excluyen los costes de los equipos y membranas).
- Proyecto de obra civil (estructura, zapatas, etc.).
- Planificación.
- Conducciones en el interior de la planta desaladora.
- Instalaciones destinadas al control y la distribución de agua en las conducciones como, por ejemplo, válvulas, caudalímetros y variadores de frecuencia.
- Análisis químicos-biológicos en los pre y post-tratamientos del sistema.
- Estudios de entidad propia necesarios para un dimensionamiento más preciso de la instalación, tales como estudios geológicos, del agua de mar o demás factores que pueden tener influencia sobre los cálculos.
- Instalaciones propias de la edificación de la planta, tales como instalaciones eléctricas, electrónicas, sistemas de control y automatización, climatización, abastecimiento de agua, saneamiento y contraincendios.
- Instalaciones destinadas al control del flujo de rechazo de salmuera.
- Estudios de entidad propia tales como impacto medioambiental o de seguridad y salud.

Así, este estudio girará en torno al análisis, cálculo y dimensionado de los aspectos mecánicos y energéticos que forman parte del proceso de desalación de agua de mar por osmosis inversa y de la generación de energía eléctrica a partir de los recursos eólicos disponibles. Si se diese el caso de que este proyecto fuese ejecutable, habría que tomar en cuenta todos los aspectos mencionados anteriormente para el correcto desarrollo del trabajo. Debido a falta de tiempo, se ha decidido dejar fuera todos estos puntos, al no ser estrictamente necesarios para el desarrollo de este estudio no ejecutable, llevando así a una acotación del proyecto.

3. Justificación del proyecto

Las Islas Canarias destacan por un clima escaso de precipitaciones, lo cual da lugar a una sobreexplotación continua e irreversible de los recursos hídricos convencionales. Este problema ha requerido de una solución en la forma de un desarrollo notable de inversiones e infraestructuras destinadas a la desalación de aguas salobres y de mar.

En concreto, la isla de Gran Canaria es una de las que más ha experimentado esta tendencia, en donde aproximadamente la mitad del agua consumida por la población, la industria, la agricultura y el turismo proviene de la desalación de agua de mar. Además, Gran Canaria es la isla del archipiélago canario que mayor número de instalaciones desaladoras tiene actualmente en funcionamiento. Tiene una producción de agua desalada, de 77,1 hm³/año, que prácticamente dobla la cantidad que se produce en conjunto en las otras islas punteras en esta tecnología, que son Lanzarote, Fuerteventura y Tenerife.

Por otro lado, se trata de la segunda isla más poblada de la comunidad autónoma, ligeramente por detrás de Tenerife. Su crecimiento demográfico sigue la tendencia del archipiélago, en continuo aumento. La afluencia turística también se caracteriza por un rápido crecimiento debido a la recuperación económica que se ha experimentado en los últimos años.

Para afrontar los problemas de sobreexplotación de los recursos hídricos convencionales y el aumento del número de personas a abastecer con agua apta para consumo humano, será preciso aumentar la producción de agua desalada de alta calidad que es capaz de proporcionar la industria de desalinización. Actualmente, la población de la zona de Arinaga, perteneciente al municipio de Agüimes en Gran Canaria, se abastece a partir de aguas subterráneas. Se prevé que esta población sufra un considerable aumento en los próximos años, por lo que hará falta una instalación desaladora de agua de mar que supla el aumento del consumo de agua potable y que le dé un descanso a los recursos hídricos explotados actualmente.

Es preciso que esta instalación desaladora se abastezca energéticamente mediante un sistema de energía eólica, al haber un generoso recurso eólico en la zona mencionada. Además, esto implicaría que la planta desaladora no tendría dependencia de la red eléctrica ni de fuentes de energía contaminantes, teniendo así un bajo impacto medioambiental. Existen antecedentes de la combinación de ambas tecnologías en Canarias, mencionadas más adelante en este documento.

Cabe destacar que el propio Cabildo de Gran Canaria ha propuesto, en alguna ocasión, planes futuros para una instalación desaladora abastecida con energía renovables en la zona de Arinaga, por lo cual este proyecto cobra sentido y es, en principio, viable y beneficioso para los habitantes locales, los turistas y los recursos hídricos de la región.

Por último, la capacidad de la planta, de 3500 m³/día, tiene como objetivo el abastecimiento total de las poblaciones de Cruce, Polígono y Playa de Arinaga hasta el año 2023. Durante este tiempo, se dará, como ya se ha mencionado anteriormente, un descanso a los recursos hídricos convencionales actualmente explotados. Una vez terminado este periodo, se podría optar, según las necesidades, por un aumento de la producción de la planta o por la construcción de otra más.

4. Antecedentes

4.1. Recursos hídricos a nivel mundial

El agua es el componente más esencial en la vida y en las actividades del ser humano, por lo que tiene una gran influencia sobre la economía de nuestra sociedad. Debido a ello, su distribución a lo largo del planeta Tierra juega un gran papel en nuestro día a día, limitando el desarrollo de aquellas regiones que sufren escasez de recursos hídricos, al ser la industria, la agricultura y la población altamente dependientes del agua.

En cuanto a la distribución, aproximadamente el 97% de agua en nuestro planeta se encuentra en mares y océanos, por lo que hablaríamos de agua salada. El otro 3% es aquella porción que puede emplear el ser humano. Se estima que dicho porcentaje vale para unos 35 millones de kilómetros cúbicos de agua. Como se mencionó en el párrafo anterior y como se puede observar en la Figura 1, dicha masa de agua está repartida de una forma muy heterogénea alrededor del planeta, jugando en contra del desarrollo de las regiones desfavorecidas en cuanto a riqueza en recursos hídricos, ya sea por sus condiciones geográficas y climáticas, o por motivos económicos o de contaminación.

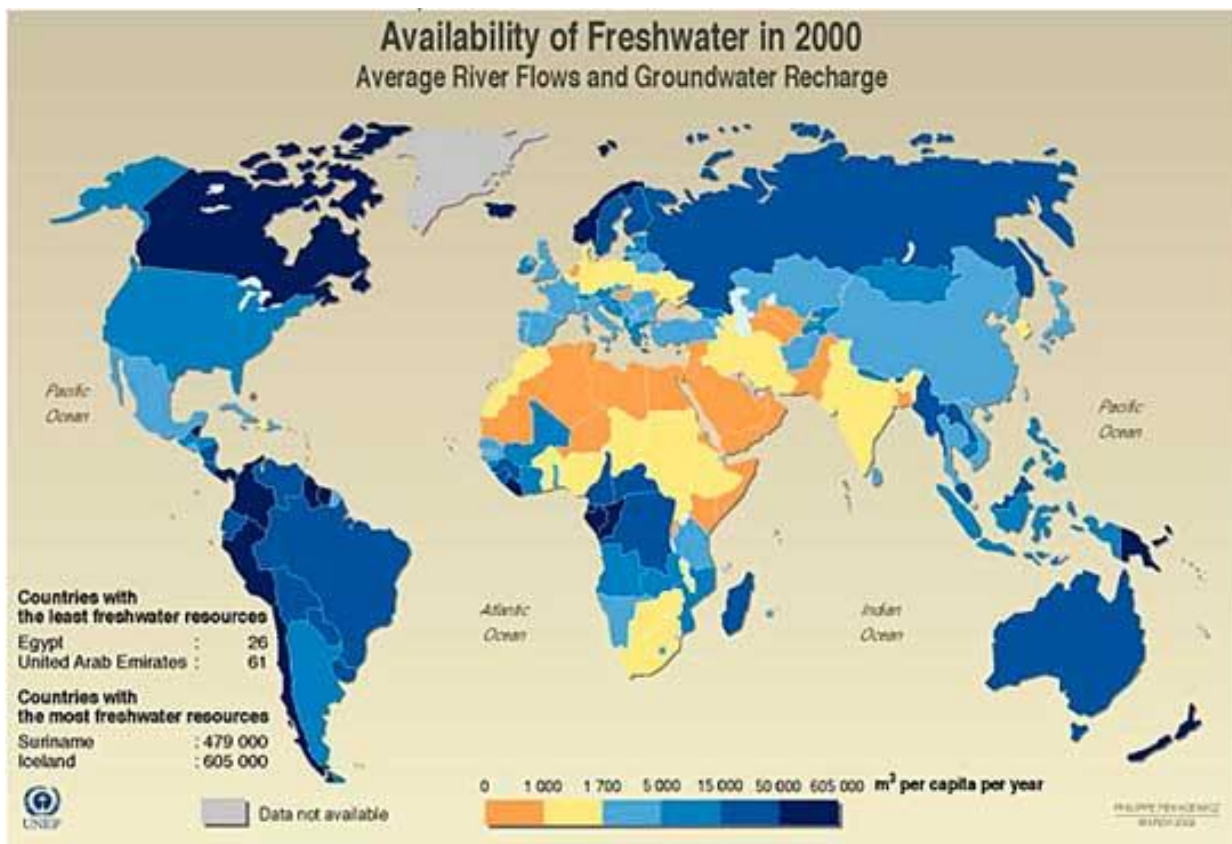


Figura 1: Disponibilidad de agua dulce en el planeta Tierra en el año 2000 (Fuente: www.3.bp.blogspot.com)

Además de esta situación de distribución desigual de agua a lo largo del globo terráqueo, también existe la problemática del crecimiento de la población mundial. Este hecho da lugar a una sobreexplotación de los recursos hídricos disponibles, cuyo déficit aumenta con el paso del tiempo, y a un aumento del número de consumidores de dichos recursos. En la Figura 2 se refleja el crecimiento de la población mundial desde el año 1750 hasta la estimación para el año 2050. Cabe destacar que se diferencia el crecimiento demográfico de las regiones en vías de desarrollo frente a aquellas que ya se encuentran industrializadas.

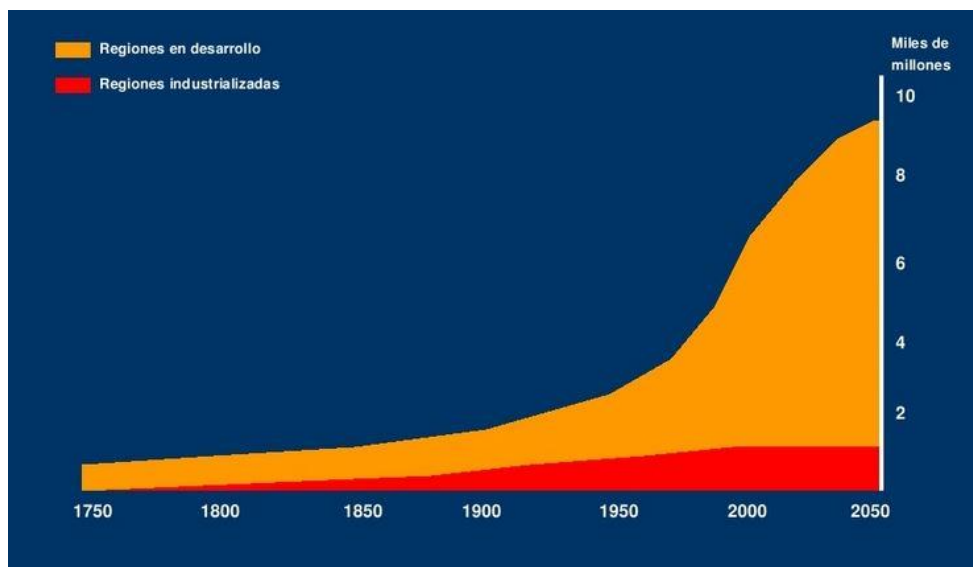


Figura 2: Crecimiento de la población mundial entre 1750 y 2050 (Fuente: www.habitat.aq.upm.es)

Es bastante notable que el crecimiento de la población en los países en vías de desarrollo es muy superior al de los países industrializados. Muchas de estas regiones en desarrollo pertenecen al continente africano, que, como se puede observar en la Figura 1, sufren de una sequía notable en cuanto a recursos hídricos. La combinación de estas dos situaciones (alto crecimiento demográfico unido a poca agua potable disponible) hace que el desarrollo socio-económico de zonas como éstas sea prácticamente imposible sin el empleo de tecnologías que generen agua potable a partir de aquellos recursos hídricos que en un principio no son aptos para consumo humano, o usos industriales o agrícolas (como el agua de mar).

4.2. Recursos hídricos en España y en las Islas Canarias

En cuanto al territorio nacional español, estamos de nuevo ante una situación de una distribución de recursos hídricos bastante desigual. Por lo general, las regiones del norte del país gozan de altas cantidades de disponibilidad de agua dulce (como el País Vasco o Galicia), mientras que las regiones que se encuentran en el sur sufren de mayor escasez (como, por ejemplo, Murcia).

También se da el caso en el que, dentro de una misma región, las zonas del norte tienen mayores recursos hídricos que el sur. Esta distribución queda reflejada en la Figura 3, en la cual se representa la escorrentía media anual en España.

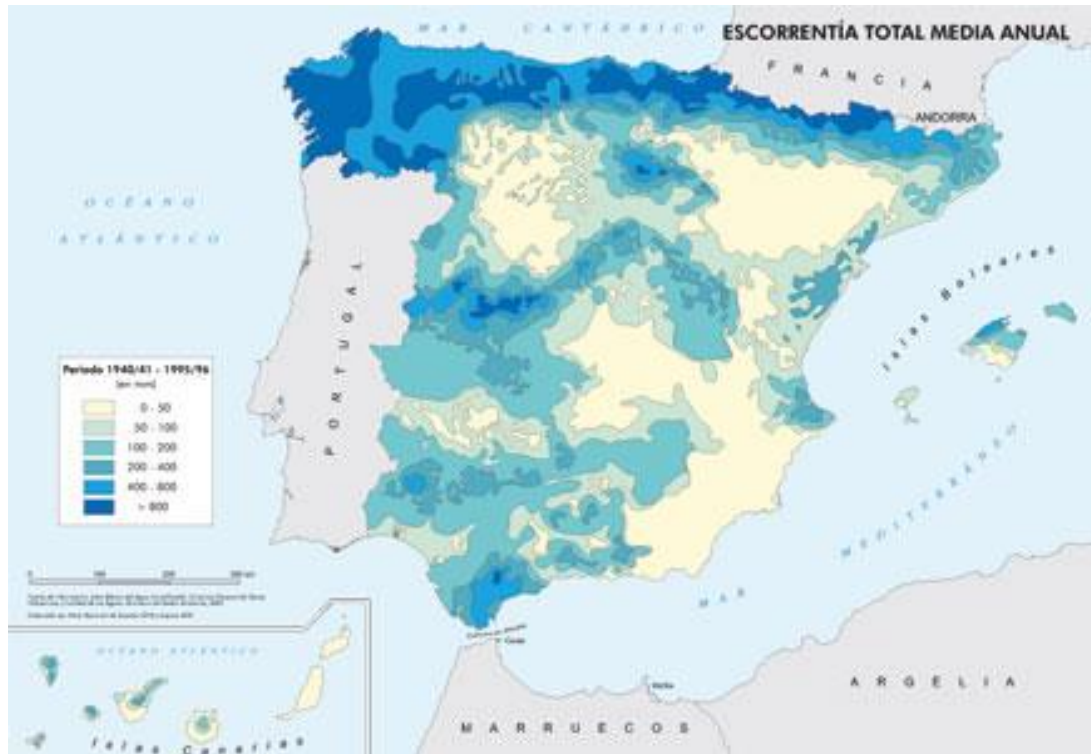


Figura 3: Escorrentía total media anual en el territorio español (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)

Una de las zonas dentro de España con estas características, son las Islas Canarias. Sin embargo, aunque las zonas norte de las islas tengan más disponibilidad de agua dulce, ésta suele estar por debajo de las necesidades que tiene la población del archipiélago, sobre todo debido a la ausencia de ríos y a la irregularidad de las precipitaciones. Esto tiene consecuencias negativas sobre el desarrollo socio-económico de esta comunidad autónoma.

Así, durante las últimas décadas ha tenido lugar una sobreexplotación de acuíferos y pozos en el archipiélago, dando lugar a un descenso drástico de sus niveles de agua (el cual se agrava año tras año), con el deterioro del medio ambiente que este hecho conlleva. Por ello, es necesario buscar alternativas de obtener agua potable, y permitir que los recursos hídricos convencionales (acuíferos, pozos y galerías) se recuperen de forma natural y vuelvan a sus estados iniciales.

A este problema ambiental hay que sumar el hecho de que la población del archipiélago canario y el turismo están en un continuo crecimiento, y el reto de abastecer a todos los habitantes y visitantes de las islas es cada vez mayor. En la Figura 4 se puede observar el crecimiento demográfico experimentado por la región entre los años 2000 y 2011, según el ISTAC.

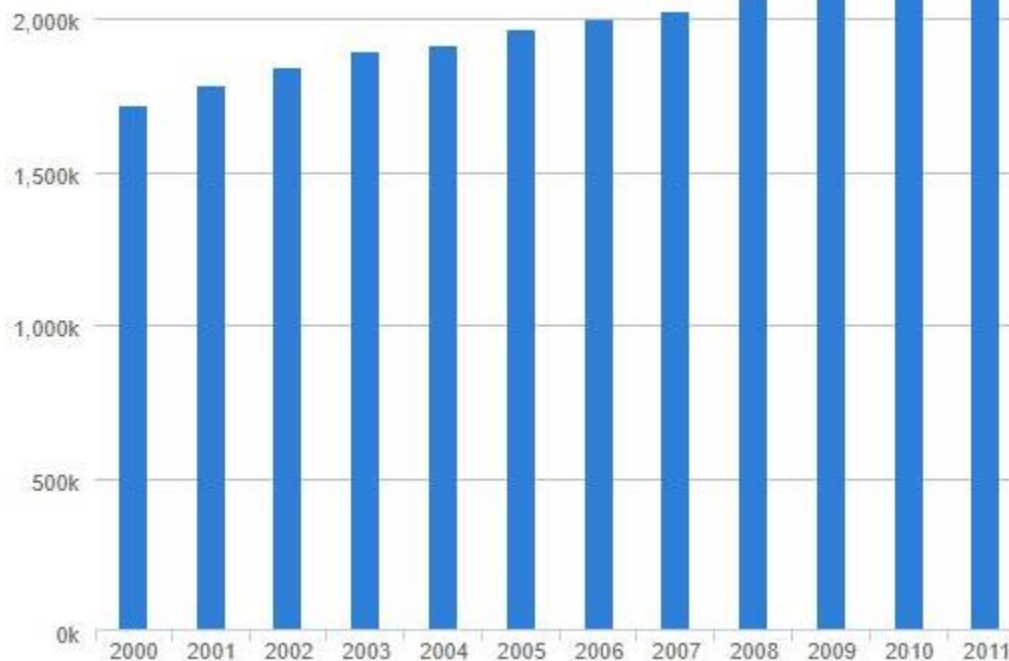


Figura 4: Crecimiento demográfico de las Islas Canarias entre los años 2000 y 2011 (Fuente: ISTAC)

Para solucionar la problemática mencionada anteriormente (poca disponibilidad de recursos hídricos y un crecimiento continuo de la población a abastecer de agua potable), se debe hacer uso de recursos hídricos no convencionales, como la desalación de agua de mar, para poder cubrir el déficit actual del cual sufren los recursos hídricos convencionales de Canarias.

4.3. Desalación de agua de mar

Antes de comenzar con este apartado, cabe destacar que se realizará tan sólo una breve mención de las técnicas de desalación de agua de mar y su impacto en las Islas Canarias. Para una explicación más detallada de estas técnicas, y de los equipos y consideraciones pertenecientes a aquella tecnología que se empleará en este proyecto (la osmosis inversa), es recomendable dirigirse al Anexo I de este estudio, en el cual se realiza una introducción teórica de todos los puntos mencionados anteriormente.

En cuanto a la desalación de agua de mar, ésta puede ser muy ventajosa para Canarias ya que, al ser islas, se encuentran rodeadas por agua de mar en su totalidad, por lo que se tiene una disponibilidad muy alta de dicho recurso en comparación a otros, como podrían ser las galerías o las lluvias pluviales.

En cuanto a la técnica de desalación de agua de mar, hay cuatro variantes que son las que más frecuentemente se emplean, actualmente, a nivel mundial: la osmosis inversa (OI), la destilación multiefecto (MED), la destilación súbita multietapa (MSF) y la electrodiálisis (ED). De todas éstas, destaca, por su uso extendido, la OI.

4.3.1. Osmosis inversa (OI)

Para poder entender este fenómeno, primero debemos de comprender el funcionamiento de la osmosis directa, el cual se produce de forma espontánea y natural. Para que suceda, debe de haber dos fluidos de concentraciones diferentes en contacto, pero separados entre sí por una membrana semipermeable. Este proceso queda reflejado en la Figura 5.

La membrana tendrá la función de dejar pasar un porcentaje del total de moléculas de disolvente, y no permitir que pasen las moléculas de soluto.

En nuestro caso, tendríamos agua de mar. A un lado de la membrana semipermeable se situaría el agua de mar con menos sal de ambos lados, es decir, la menos concentrada. Desde ella, el agua pasará al otro lado de la membrana, dejando atrás la sal, para intentar diluir el fluido de la izquierda, el más concentrado. Una vez que se genera una presión debido a que a la izquierda habrá más cantidad de fluido que a la derecha (mayor columna de agua), se detiene el paso de agua de un lado al otro. Esta presión es conocida como presión osmótica, que tendrá un papel muy importante en el proceso de osmosis inversa.

En la OI, se aplicará presión sobre el lado en el que se encuentre el fluido más concentrado. Esta presión será igual o mayor que la presión osmótica del fluido. Esto tiene como resultado la circulación de agua en sentido inverso que en la osmosis directa. Es decir, el agua circularía hacia el lado en donde está el fluido menos concentrado (solución diluida), reduciendo su concentración de sal. El fenómeno de la OI es ampliamente utilizado en varias aplicaciones como, por ejemplo, la obtención de agua potable. Un esquema de este proceso se representa en la Figura 6.

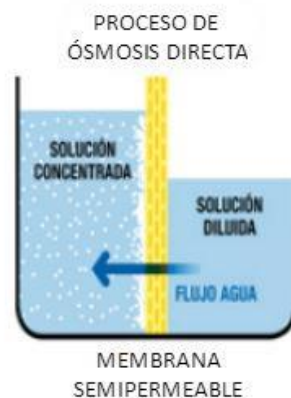


Figura 5: Esquema del proceso de osmosis directa (Fuente: www.aquasalud.com)

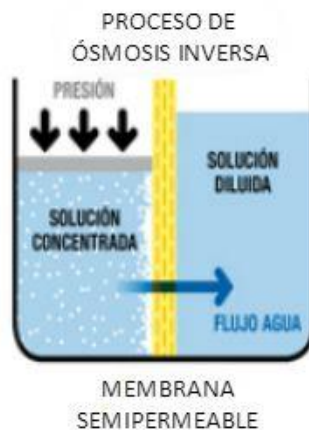


Figura 6: Esquema del proceso de osmosis inversa (Fuente: www.aquasalud.com)

La OI se caracteriza por ser un proceso de difusión, realizada a través de la membrana semipermeable. Ésta deja pasar a las moléculas del agua sin problemas, mientras que las moléculas de las sales y otros sólidos disueltos en el agua no son capaces de atravesar la membrana, quedándose atrás.

En nuestra EDAM, el agua de mar entrará, una vez tratada correctamente, al bastidor de membranas. En ellas se realizará la osmosis inversa. El flujo de agua de mar se separará en dos. Uno será el agua producto o permeado, que será el flujo diluido y con una concentración de sales muy baja. Es el agua que ha logrado atravesar las membranas. Por otro lado, saldrá el rechazo o salmuera, que será el flujo concentrado. Contendrá las sales que no han logrado atravesar las membranas. Las cantidades de agua que salgan por un lado u otro dependerán del porcentaje de conversión que tenga el núcleo de desalación de la planta.

Como se mencionó anteriormente, al inicio de este apartado, para una mayor profundización en la OI y en las instalaciones y equipos que se emplean en este proceso, es preciso consultar el Anexo I de este proyecto.

4.3.2. Antecedentes de desalación en Canarias y en la isla de Gran Canaria

Para las Islas Canarias, la desalación de agua de mar es un hecho sin el cual sería imposible concebir su desarrollo económico y turístico reciente. A lo largo de los siglos, sus habitantes han tenido que hacer frente al déficit de recursos hídricos convencionales, en cuya batalla la desalación ha sido una pieza clave.

Alrededor de mediados de los años setenta se produjo la primera aparición de plantas desaladoras de agua de mar. La primera experiencia de desalación tuvo lugar en la isla de Lanzarote en el año 1964. A partir de este momento, se produjo un desarrollo fugaz de diversas

tecnologías, siendo Canarias incluso un banco de pruebas de técnicas que posteriormente se emplearían e implantarían en otras regiones del planeta.

En la Tabla 1, se representa el total de volumen de agua desalada en las Islas Canarias. Por otro lado, en la Figura 7 se representa la cantidad de agua desalada dentro del total del consumo de agua para cada isla.

Isla	Volumen de agua desalada (hm ³ /año)
La Palma	0,1
El Hierro	0,5
La Gomera	0
Tenerife	18
Gran Canaria	77,1
Fuerteventura	11,9
Lanzarote	16,9

Tabla 1: Total de volumen de agua desalada en las Islas Canarias (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de la FCCA)

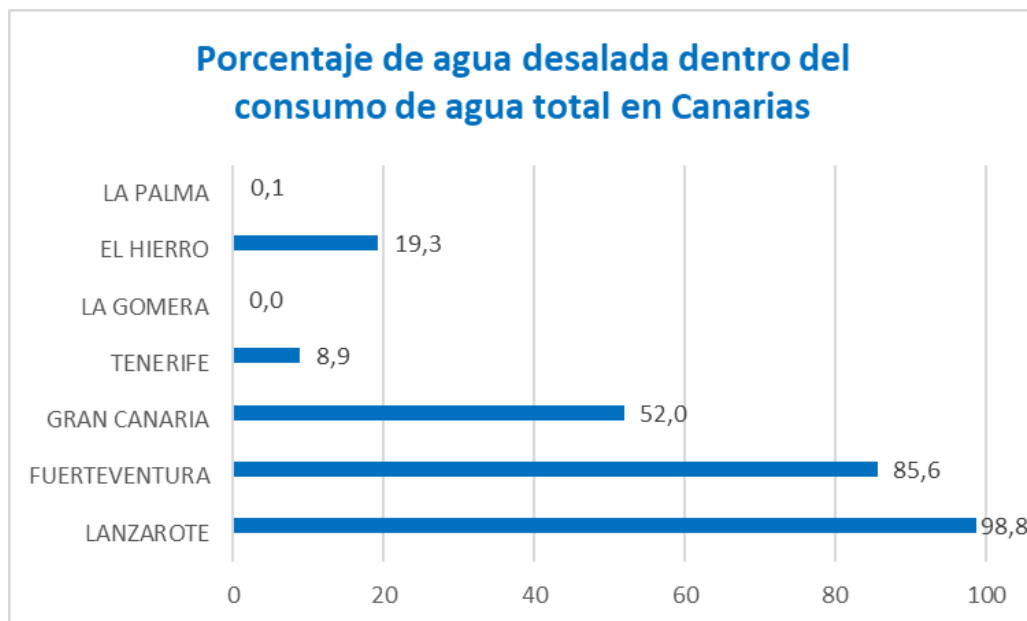


Figura 7: Cantidad de agua desalada consumida en las Islas Canarias (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de la FCCA)

Como se puede ver, Fuerteventura y Lanzarote son muy dependientes de agua desalada, debido a las características de extrema sequía de las que sufren estas islas. Después, Gran Canaria viene por detrás, en donde la mitad de agua consumida proviene de instalaciones desaladoras. Por otro lado, La Gomera y La Palma prácticamente no emplean agua desalada, al gozar de un gran número de acuíferos y pozos, y de un alto índice de lluvias pluviales a lo largo del año. Sin

embargo, la isla en la que más agua se desala (con una diferencia de casi 60 hm³/año frente a Lanzarote, Fuerteventura y Tenerife) es Gran Canaria, debido a la alta cantidad de habitantes que posee ésta. Además, también se trata de una isla que carece de lluvias pluviales y recursos hídricos convencionales.

Profundizando en Gran Canaria, al ser la isla en la cual se situará nuestra EDAM, ésta tiene una superficie total aproximada de 1560 km² y unos 815.000 habitantes (según los datos del INE para el año 2007). La desalación ha hecho posible, en los últimos años, la supervivencia de algunos núcleos de población de la isla en cuanto a la demanda de agua potable. Si analizamos cronológicamente el desarrollo de esta tecnología, tenemos que:

- **PRIMEROS AÑOS:** tras la primera experiencia de desalación (Lanzarote, 1964), Las Palmas de Gran Canaria ya sufría una cierta escasez de agua. En 1969 entró en funcionamiento la planta desaladora Las Palmas I con 20.000 m³/día. Fue una de las más grandes del mundo en aquellos momentos. En los años 90 fue sustituida. A mediados de los años 70 se instaló la primera planta de OI en las islas. Más adelante, también se instalaron plantas de evaporación multietapa, de electrodiálisis y de electrodiálisis reversible.
- **PLANES REGIONALES POSTERIORES:** en 1986, se pone en funcionamiento la planta desaladora Las Palmas III, de unos 36.000 m³/día. Se trata de la primera planta de gran tamaño de OI para agua de mar en Canarias. Además, introdujo el sistema de recuperación de energía mediante turbinas (intercambiador de presión), ampliamente empleado hoy en las plantas de OI. Actualmente, también hay una desaladora de unos 33.000 m³/día en Pozo Izquierdo (municipio de Santa Lucía), destinada a abastecer a 200.000 habitantes. En cuanto al resto de la isla, se desarrolló un alto número de desaladoras de medio y pequeño tamaño.

Actualmente, hay una capacidad total de unos 335.000 m³/día instalados en Gran Canaria. De ellos, 215.000 m³/día se destinan al abastecimiento público. El restante de 120.000 m³/día se destina a usos agrícolas. Se abastece a poblaciones por debajo de cotas de 300 metros de altura. Varios complejos turísticos e instalaciones hoteleras tienen sus propias desaladoras, cuya producción varía entre los 50 y 4000 m³/día.

Un 76% de toda esta capacidad se emplea para desalar agua de mar. El resto, para aguas salobres. En cuanto a la captación de dicha agua de mar, los dos sistemas más empleados son los de toma abierta y la toma en pozo playero.

En total, unos 308.000 m³/día operan con OI (un 92% de la capacidad total instalada). Dicha tecnología se introdujo a finales de los años 70. Desde entonces, ha habido mejoras sustanciales en las membranas y en el sistema de alta presión (en cuanto a las bombas y el recuperador de energía). Actualmente, la mayor planta en funcionamiento es capaz de producir 52.000 m³/día (situada en la capital de la isla, Las Palmas).

4.4. Energía eólica

En este apartado, se expondrá una breve introducción teórica a la energía eólica y su aprovechamiento mediante aerogeneradores. Para la explicación del método de cálculo para generación eólica que se empleará en este proyecto, es conveniente consultar el Anexo IV, en el cual se analiza dicho método antes de aplicarlo en los cálculos a desarrollar.

También se hará una breve mención las técnicas de generación de energía mediante el hidrógeno. Se optará principalmente por este método para los momentos en los que el sistema eólico no produzca la suficiente energía para alimentar al sistema de desalación. Para un mayor desarrollo de ésta, hay que dirigirse al Anexo V de este estudio, en el cual se analiza esta tecnología junto a otras empleadas en los casos contrarios, cuando hay un exceso de energía eólica generada y se debe de disipar o almacenar de alguna forma.

En cuanto a la energía eólica en general, ésta se obtiene a partir del viento, el cual genera una energía cinética al actuar sobre las máquinas empleadas en el sistema eólico, que posteriormente se transformará en energía eléctrica. Presenta unas claras ventajas frente a otras fuentes de energía convencionales:

- Es una energía renovable (inagotable).
- No requiere de combustión, por lo que es una energía limpia al no producir emisiones.
- Se puede instalar en zonas desérticas, para no interferir en la vida diaria del ser humano. Además, su instalación es rápida y barata a medida que avanza la tecnología.

4.4.1. Viento

El viento es generado por el calentamiento desigual del aire que se produce a lo largo del globo terráqueo. Éste se vuelve más intenso durante las horas diurnas, con localización en el ecuador del planeta. Normalmente, el aire caliente tiende a ascender para posteriormente circular en la parte superior de la atmósfera. Después, cae en las zonas más frías.

Así, con la combinación del calentamiento heterogéneo del planeta junto con las fuerzas centrífugas y de Coriolis (debidas ambas a la rotación de la Tierra), se forman vientos con unas tendencias permanentes.

En la Figura 8 se reflejan los patrones globales del viento, es decir, las direcciones en las que éste circula a lo largo de la superficie de nuestro planeta.

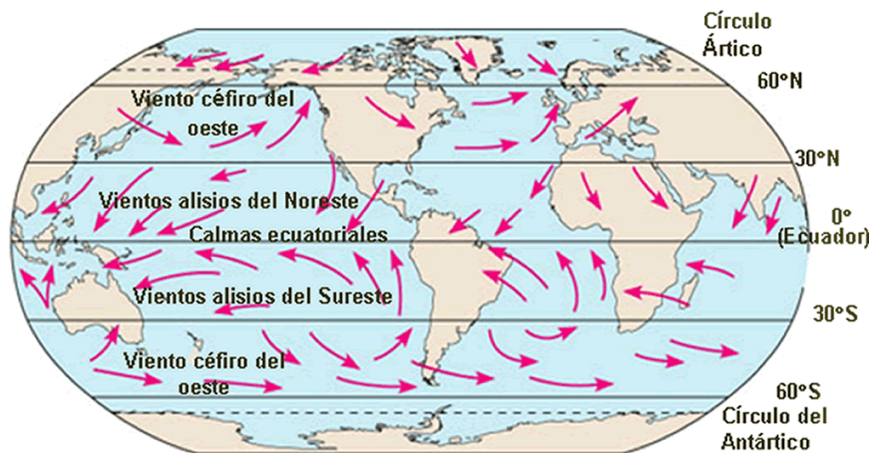


Figura 8: Patrones globales de viento en el planeta Tierra (Fuente: www.ilustresmarinos.wordpress.com)

4.4.2. Aerogeneradores

Un aerogenerador es una máquina que es capaz de convertir la energía cinética que contiene el viento en energía eléctrica. En la actualidad, el tipo de aerogeneradores más empleados son los de tres palas y orientados a barlovento. Tienen una torre tubular.

Básicamente, el funcionamiento de estas máquinas se basa en el hecho de que el viento, al incidir con cierta velocidad sobre las palas del aerogenerador, ejerce una fuerza sobre éstas. Estas fuerzas resultan en un par mecánico que se transformará en energía eléctrica tras pasar por los equipos que se encuentran dentro de la turbina del aerogenerador. Generalmente, sus palas giran entre las 13 y las 20 revoluciones por segundos, pudiendo ser a velocidades variables o constantes. Durante el giro, la velocidad del rotor variará en función de la velocidad con la que el viento incide sobre las palas del aerogenerador.

Las partes básicas del aerogenerador son el rotor y la góndola. En la góndola, encontramos los elementos representados en la Figura 9.

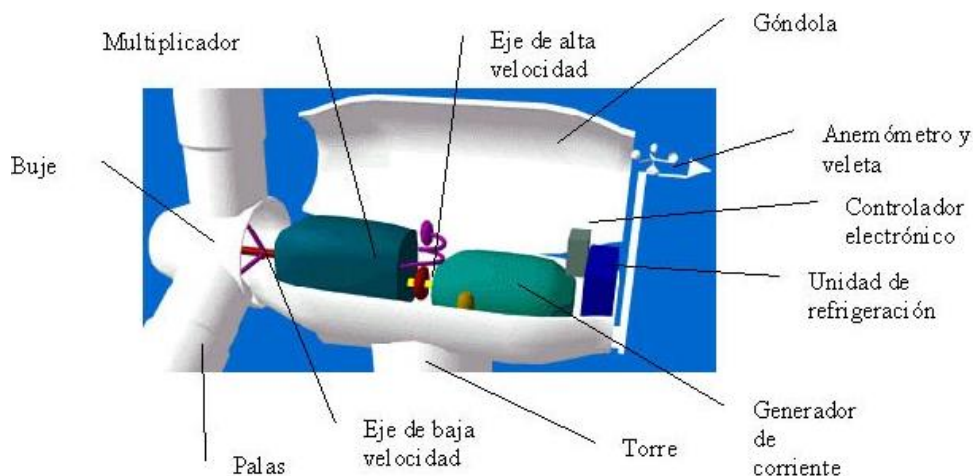


Figura 9: Partes principales de un aerogenerador (Fuente: www.centraleolica.wordpress.com)

Dichos elementos tienen las siguientes funciones:

- Torre: es la estructura que soporta la góndola y el rotor. Es de gran interés que tenga una gran altura, al aumentar la velocidad del viento cuanto mayor sea ésta. En su base dispone de un sistema de conexión a la red eléctrica y necesitará de cimientos para proporcionar rigidez y estabilidad a la estructura. En su interior, tiene una escalera para que los operarios puedan acceder al interior de la góndola.
- Palas: se encargan de absorber la energía cinética del viento y de transferirla al buje.
- Buje: conecta las palas con el eje de baja velocidad.
- Eje de baja velocidad: transfiere el movimiento rotatorio al multiplicador.
- Multiplicador: se encarga de aumentar la velocidad que entra del eje de baja velocidad para transferirla al eje de alta velocidad. Se trata de un sistema de engranajes.
- Eje de alta velocidad: transfiere el movimiento rotatorio al generador eléctrico.
- Generador eléctrico: transforma la energía mecánica en eléctrica.
- Controladores electrónicos: controlan la velocidad de giro del rotor.
- Unidad de refrigeración: controla las temperaturas de los elementos mecánicos, electrónicos y eléctricos del aerogenerador.
- Anemómetro: mide las velocidades del viento.
- Veleta: indica la dirección en la que sopla el viento en relación con los puntos cardinales.

A pesar de no estar representados en la Figura 9, también cabe mencionar e indicar el funcionamiento de los siguientes elementos:

- Freno hidráulico: cuando se rebasen los límites de seguridad (por ejemplo, excesivas velocidades del viento), se accionan para detener el aerogenerador.
- Corona de orientación: el aerogenerador puede girar 360° sobre sí mismo mediante un sistema de ruedas dentadas y un motor.
- Transductores de control: interpretan las señales electrónicas que le envía el anemómetro para conectar el aerogenerador cuando las velocidades del viento superen los 5 m/s.

La vida útil del aerogenerador y sus componentes se ve gravemente afectada al sufrir desgaste y fatiga debido al esfuerzo que produce el viento sobre ellos. Así, por lo general, se diseña un aerogenerador con el objetivo de que su vida útil se encuentre en torno a los 20 años.

4.4.3. Tendencias de la generación de energía eólica

Según los datos recopilados por la Asociación Empresarial Eólica, en el año 2017 se tenía una energía eólica total instalada de 539.123 MW, a nivel mundial. De esta cantidad, los mayores productores son China, EEUU, Alemania, India y España. En la Figura 10 se representa la potencia

eólica acumulada mundialmente entre los años 2001 y 2017, que se encuentra en continuo crecimiento.

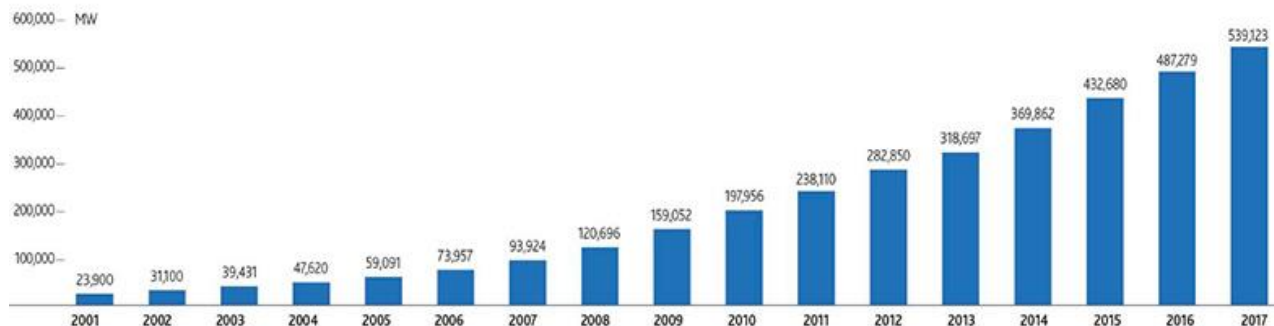


Figura 10: Potencia eólica acumulada a nivel mundial entre 2001 y 2017 (Fuente: Global Wind Energy Council)

4.4.4. Generación de energía a partir del hidrógeno

El Hidrógeno es el elemento más abundante en nuestro planeta (el 90% de la materia está constituida por él), por lo que, en un principio, sería bastante viable emplearlo como combustible. Además, no es tóxico y es inodoro, incoloro e insípido en su forma natural no gaseosa. Sin embargo, se encuentra combinado con otros elementos, por lo que es un combustible que se obtiene mediante fabricación, lo cual implica altos costes.

Para poder extraer energía a partir del hidrógeno, se emplea una tecnología similar a la empleada para la fabricación de pilas, que transforman la energía química en eléctrica mediante una reacción electroquímica, liberando electricidad, agua (H₂O) y calor. Lo más común es tener un sistema en el que un electrolizador genere hidrógeno a partir de agua y energía eléctrica, para posteriormente generar electricidad mediante el hidrógeno y una pila de combustible.

Las principales ventajas de emplear hidrógeno como fuente de energía son las siguientes:

- Alta eficiencia: puede llegar a ser mayor que la del carbón o el petróleo.
- Nula toxicidad: no perjudica a las personas ni al medio ambiente al ser emitido.
- Silencioso
- Nula contaminación: se toma a partir del agua y posteriormente se devuelve a ella. Tampoco consume recursos naturales.

Por otro lado, el principal inconveniente de esta tecnología son sus altos costes, al estar la mayoría de productos en su fase experimental.

4.5. Antecedentes de sistemas de OI con energía eólica

Al emplearse energías de bajo coste relativo (como lo es la energía eólica), el coste de producción de agua desalada será inferior, por lo cual es muy interesante unificar estas dos tecnologías, tanto para los beneficios económicos como los ambientales que trae consigo dicha medida.

En las Islas Canarias, una gran porción del gasto energético va destinada a la desalinización de agua de mar, sobre todo en las islas de Fuerteventura, Lanzarote y Gran Canaria, en las que se produce y consume la mayor parte del agua de mar desalada del archipiélago.

Según datos proporcionados por el ITC (Instituto Tecnológico de Canarias) a partir de auditorías energéticas realizadas en plantas desaladoras pertenecientes a Canarias, la implementación de un sistema de abastecimiento de energía eólica puede suponer entre un 30 y un 45% de ahorro de consumo específico (kWh/m³). Esta misma institución ha realizado varios proyectos de este tipo (siendo un precursor de ellos), entre los que se encuentran, por ejemplo:

- SODAMEE: en el que se implementa y ensaya un aerogenerador de 15 Kw conectado a una planta de OI, en modo aislado. La producción de esta EDAM era de 18 m³/día. Viendo la producción diaria y la potencia nominal del aerogenerador, se puede decir que se trata de un proyecto a muy pequeña escala. El objetivo era el de abastecer zonas con poco soporte tecnológico y una disponibilidad energética limitada, de ahí el uso del viento como fuente de energía.
- ISLHÁGUA: en el cual se han propuesto y proyectado varias EDAM alimentadas con energía eólica para localidades aisladas tanto en Cabo Verde como en las Islas Canarias.

En cuanto a proyectos reales, de mayor tamaño y ya implantados en el archipiélago canario, se puede tomar como ejemplo la EDAM instalada en el año 2010 en Fuerteventura. Ésta tenía una producción de unos 4000 m³/día, y se abastece con un sistema eólico con una potencia nominal de 1,7 MW. Cabe destacar que el abastecimiento energético tan solo es completo cuando el sistema eólico produce la máxima cantidad de energía eléctrica posible en su emplazamiento, es decir, durante los picos de producción.

En cuanto a proyectos futuros, según un artículo del día 9 de marzo de 2018 publicado en el periódico “EL DÍA”, el Gobierno de Canarias realizó una convocatoria para la proyección de futuros parques de energías renovables (eólica y fotovoltaica), siendo uno de los destinatarios objetivos de estos nuevos parques la desalación de agua de mar.

En cuanto a la isla en la que se situará nuestra EDAM, Gran Canaria, según un artículo del día 8 de enero de 2016 publicado en el periódico “eldiario.es”, el Cabildo de dicha isla muestra deseos de colocar una EDAM abastecida con energía renovables en el Puerto de Arinaga, justo donde se situará la instalación de este Trabajo de Fin de Grado. Sin embargo, aún no se ha realizado dicho proyecto del cual se habla en el artículo.

5. Normativa y referencias

5.1. Disposiciones legales y normativa aplicable

- Real Decreto 6/2015, de 30 de enero, por el que se aprueba el Reglamento que regula la instalación y explotación de los Parques Eólicos en las Islas Canarias.
- Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.
- Reglamento perteneciente a la asignatura “Trabajo de Fin de Grado”.
- Plan Hidrológico de Gran Canaria. Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria.
- Plan Energético de Canarias 2007 (PECAN). Consejería de Industria, Comercio y Nuevas Tecnologías.
- Ley de Espacios Naturales de Canarias.
- Plan Insular de Ordenación de Gran Canaria, de diciembre de 2003. Cabildo de Gran Canaria.
- UNE 157001:2002. Criterios generales para la elaboración de proyectos.
- Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.

5.2. Bibliografía

- Medina San Juan, José Antonio. *Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis inversa*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1999.
- Soriano, José Agüera. *Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas*. 5ª edición actualizada. Madrid: Ciencia 3 S.L., 2002.
- Santana Delgado, Carmelo. *Mejoras energéticas realizadas en las desaladoras de agua de mar del CIAGC. Ejemplos viables en el rediseño de procesos de desalación*. Gran Canaria: Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria.
- Veza, José Miguel. *Introducción a la desalación de aguas*. Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canarias, Servicio de Publicaciones, 2002. ‘
- Creus Solé, Antonio. *Aerogeneradores*. 1ª edición. Barcelona: Cano Pina, 2008.
- Gobierno de Canarias. *La cultura del agua en Gran Canaria*. Tenerife: Gobierno de Canarias, Consejería de Infraestructura, Transportes y Vivienda, 2008.

5.3. Programas de cálculo y herramientas empleadas

- Software de dimensionado de membranas “IMSDesign”, desarrollado por el fabricante Hydranautics Nitto Company.
- Microsoft Office Word 2016.
- Microsoft Office Excel 2016.

- Hoja de cálculo de Excel de dimensionado del recuperador de energía (intercambiador de presión), proporcionada por el fabricante Energy Recovery Inc.
- Aplicación online de selección de bombas, desarrollado por el fabricante Grundfos.
- Aplicación online de selección de bombas, desarrollado por el fabricante KSB.
- Aplicación online de selección de bombas, desarrollado por el fabricante Wilo.
- Aplicación online de selección de aerogeneradores, desarrollada por el Instituto Tecnológico de Canarias.

5.4. Otras referencias

- Hydranautics: <http://www.membranes.com>
- KSB: <http://www.ksb.com>
- Flowtite: <http://www.flowtite.com>
- Lowara: <http://www.lowara.com>
- Grundfos: <https://es.grundfos.com/>
- Wilo: <https://wilo.com/es/es/>
- Instituto Nacional de Estadística: <http://www.ine.es>
- Puertos del Estado: <http://www.puertos.es/es-es>
- Goolzoom: <http://www.goolzoom.com>
- Fundación Centro Canario del Agua: <http://www.fcca.es>
- Instituto Canario de Estadística: <http://www.gobiernodecanarias.org/istac>
- Instituto Tecnológico de Canarias: <http://www.web.itccanarias.org/web/index.jsp>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía: <http://www.idae.es>
- The Wind Power: <https://www.thewindpower.net/>
- Grafcan: <http://www.grafcan.es>
- iAgua: <http://www.iagua.es>
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente: <http://www.magrama.gob.es>
- Instituto Geográfico Nacional: www.ign.es
- Gobierno de Canarias: <http://www.gobiernodecanarias.org>
- Instituto Español de Oceanografía: <http://www.ieo.es>
- DOW Chemical Company: <http://www.dow.com>
- Energy Recovery: <http://www.energyrecovery.com>
- Aquasalud: <http://www.aquasalud.com>
- Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos: <http://www.asetub.es>
- Repositorio institucional de la Universidad de La Laguna: <http://www.riull.ull.es>
- Apuntes de las asignaturas “Instalaciones y Máquinas Hidráulicas” (curso 2016/17) e “Ingeniería Fluidomecánica” (curso 2015/16) impartidas en el Grado en Ingeniería Mecánica de la Universidad de La Laguna.

6. Definiciones y abreviaturas

En este apartado se definirán los conceptos más importantes para la comprensión de este trabajo y las abreviaturas empleadas en él, con el fin de evitar confusiones y equivocaciones a la hora de su lectura.

6.1. Definiciones

- Permeado o agua producto: es el agua desalada que se obtiene a la salida de los bastidores de membranas tras pasar por el proceso de osmosis inversa.
- Salmuera o rechazo de salmuera: se trata del agua que no consigue pasar a través de las membranas y que se caracteriza por un contenido muy alto en sales.
- Consumo específico: consumo energético de la planta desaladora por cada m³ de agua producto obtenida. Es el parámetro más importante en este tipo de instalaciones.
- Ppm: partes por millón.
- Conversión: porcentaje de la cantidad de agua desalada (agua producto) frente a la cantidad de agua que entra a la instalación desaladora (agua de alimentación).
- Mezcla volumétrica: mezcla formada por las corrientes de agua de alimentación y de rechazo de salmuera dentro del intercambiador de presión (el recuperador de energía).
- Flux: cantidad de agua que pasa por la unidad de superficie de las membranas de osmosis inversa. Depende de las características técnicas de dichas membranas.
- Potencial eólico: potencia máxima que puede adquirir el viento en función de su velocidad.
- Eficiencia: relación de la potencia ideal que puede producir un equipo frente a la real.

6.2. Abreviaturas

- EDAM: Estación desaladora de agua de mar.
- OI: Ósmosis inversa.
- MED: Destilación multiefecto.
- MSF: Destilación súbita multietapa.
- CV: Compresión de vapor.
- ED: Electrodiálisis.
- TDS: Sólidos Totales Disueltos.
- ITC: Instituto Tecnológico de Canarias.
- FCCA: Fundación Centro Canario del Agua.
- IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía.
- ISTAC: Instituto Canario de Estadística.
- RD: Real Decreto.
- INE: Instituto Nacional de Estadística.

7. Requisitos de diseño

A continuación, se hará una descripción de las bases y datos de partida establecidos por el cliente (el peticionario de este proyecto) y todos aquellos que se deriven de:

- Legislación, normativa y reglamentación aplicables.
- Estudios realizados con el destino de definir la solución adoptada.
- El emplazamiento, teniendo en cuenta su entorno ambiental y socio-económico.

7.1. Requisitos establecidos por el peticionario

Este estudio, un sistema de desalación alimentado con energías renovables, ha sido encomendado por el peticionario del proyecto, la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna. Dicha entidad establece que se tendrán que tener en cuenta las siguientes premisas durante el estudio:

- La tecnología con la que se desalará el agua de mar debe de ser la osmosis inversa.
- El recurso de energía renovable con la que se autoabastezca la planta desaladora debe de ser energía eólica.
- La producción de la planta debe de ser de capacidad pequeña o media, en comparación a las instalaciones desaladoras del mismo tipo ya existentes.
- La capacidad de producción se establecerá según las necesidades de abastecimiento que se tengan que cubrir, siempre teniendo en cuenta el punto anterior.
- Para decidir el emplazamiento de la planta desaladora los recursos hídricos y eólicos deben de estar disponibles en las cantidades necesarias en dicho emplazamiento.
- Al tratarse de una planta desaladora destinada al abastecimiento de consumo de agua potable, el agua producto deberá de cumplir los requisitos establecidos por la normativa vigente que afecte a la calidad del agua destinada a tal fin.

Estos aspectos se consideran como propios de la entidad que promueve este proyecto, y, por lo tanto, serán los pilares sobre los cuales se comenzará a construir el estudio presente.

7.2. Emplazamiento

Para este apartado, se han establecido las siguientes condiciones:

1. La planta desaladora tendrá que estar situada en un punto cercano al mar, para así evitar altos costes en el sistema de captación.
2. El sistema de energía eólica tendrá que estar situado en un punto con un alto potencial eólico, que sea cercano a la planta desaladora y que además esté alejado de edificaciones (para evitar turbulencias del viento).
3. Ambos sistemas estarán localizados en España, debido a los cambios que pueda haber en la normativa de otros países que tengan actuación sobre el ámbito en el que estamos trabajando.
4. Preferiblemente, las instalaciones se situarán en una zona dedicada a la actividad industrial, tal como un polígono industrial. El motivo de esta condición es el evitar la interferencia de las actividades de nuestras instalaciones con la vida diaria de las personas habitantes en el emplazamiento de la planta.
5. Es preferible evitar un emplazamiento con otras instalaciones desaladoras próximas, ya que se busca abastecer a una población sin acceso actual al abastecimiento con agua desalada.
6. Debe haber una previsión de necesidad futura de mayores cantidades de agua potable.
7. El suelo debe ser apto para construir unas instalaciones de este tipo. Si se cumple el punto 4, esta condición se cumplirá automáticamente.

Una vez establecidas estas condiciones, y al ser este proyecto desarrollado en una universidad perteneciente a las Islas Canarias (Universidad de La Laguna), se barajaron 3 islas de dicho archipiélago como posibles destinos de nuestras instalaciones: Fuerteventura, Lanzarote y Gran Canaria. Se escogieron estas opciones al ser, como ya se mencionó en el apartado 4.3.2. de esta Memoria, las islas que más dependencia tienen del agua desalada, por lo que, unido al crecimiento de la población, es importante la implantación de nuevas instalaciones para poder aumentar la producción. Finalmente, se escogió la isla de Gran Canaria. Las otras dos (Lanzarote y Fuerteventura), emplean el agua desalada en su práctica totalidad, por lo que no hay una necesidad real de una nueva EDAM a pesar del auge del turismo, ya que hay que tener en cuenta que la ampliación de las plantas desaladoras ya existentes es relativamente sencilla según las fuentes consultadas. Debido a ello, se rechazaron, y se escogió la isla de Gran Canaria para nuestro proyecto. Cabe destacar que en el apartado de Antecedentes de esta Memoria también se han expuesto varios motivos más para el emplazamiento de nuestra EDAM en Gran Canaria (escasez de recursos, uso extendido de la desalación, etc.).

Antes de continuar, cabe mencionar que en este apartado se seleccionarán los emplazamientos para la EDAM, los pozos de captación y los aerogeneradores (éstos de forma orientativa). Todas las tuberías y el depósito regulador se dimensionarán en el Anexo III de este proyecto. En cuanto a la localización exacta de los aerogeneradores, esta se definirá en el Anexo IV.

Una vez escogida la isla, hay que definir el emplazamiento exacto de nuestra EDAM. Para ello, consultamos la base de datos de desaladoras ya existentes en Gran Canaria, disponible en la página web de Aguas Gran Canaria. En la Figura 11, podemos observar que en la costa de Agüimes

no hay un gran número de desaladoras, mientras que este municipio es uno de los más poblados de la isla y con menor índice de lluvias pluviales y recursos hídricos disponibles.

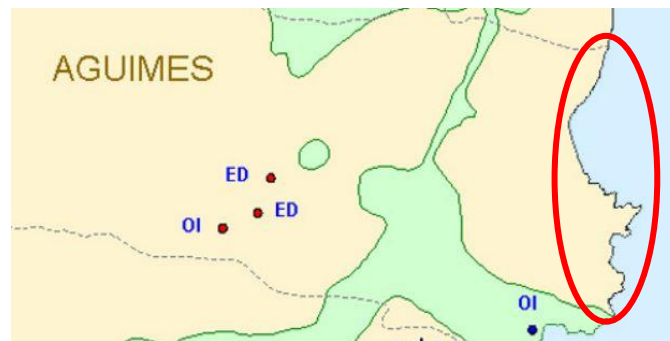


Figura 11: Instalaciones desaladoras activas en el municipio de Agüimes, G.C. (Fuente: Aguas Gran Canaria)

Basándonos en las condiciones establecidas en este apartado, y en los proyectos futuros expuestos en el apartado 4.5. y en la Justificación de esta Memoria, parece viable la selección del Polígono Industrial de Arinaga como el emplazamiento de nuestra EDAM. Se trata de suelo industrial, cercano al mar, sin desaladoras próximas y tiene cerca varios núcleos poblaciones para abastecer. Aún no sabemos si el recurso eólico de esta zona es lo suficientemente alto como para ser apto para nuestra EDAM. Para ello, necesitaremos datos del potencial eólico de la zona. Este lo extraemos a partir del atlas eólico del IDAE, reflejado en la Figura 12, que nos da la densidad de potencia media anual a los 80 metros de altura.

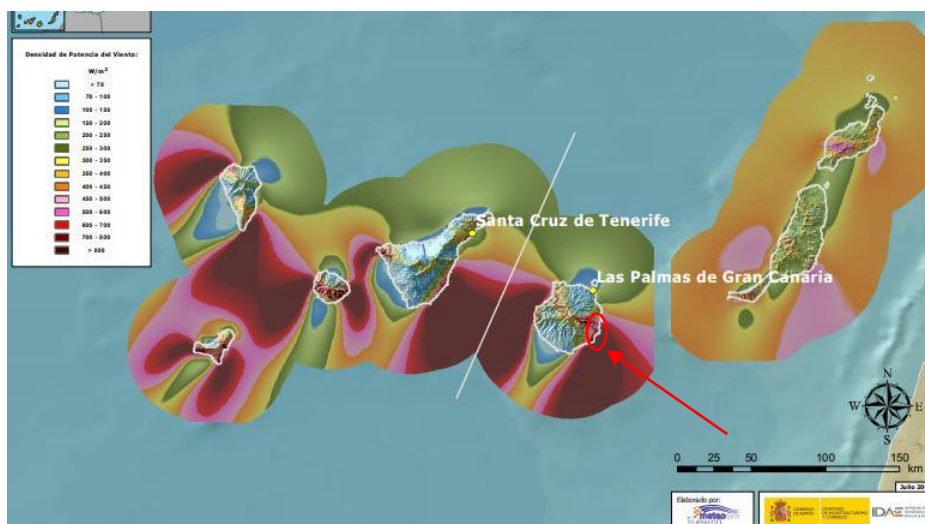


Figura 12: Densidad de potencia media del viento a 80 metros de altura en Canarias (Fuente: IDAE)

Como se puede observar en la Figura 12, las zonas costeras cercanas al Polígono Industrial de Arinaga tienen el máximo potencial eólico posible en el archipiélago canario. Esto quiere decir que nuestro emplazamiento será óptimo para el abastecimiento de la EDAM con energía eólica.

En el Anexo IV se hará un estudio y un cálculo más profundo del recurso eólico disponible en el que será el emplazamiento definitivo de nuestro proyecto, aún por decidir.

El siguiente paso serán el estudio de los núcleos poblacionales cercanos al Polígono Industrial de Arinaga, y cuantas personas habitan en ellos. Este estudio se realiza en profundidad en el apartado 7.3. de esta Memoria, en cuya Figura 22 se observa que habita un total de 19.748 personas en el año 2016 en las poblaciones de Cruce, Polígono y Playa de Arinaga (señaladas en la Figura 13), que serán aquellas que serán abastecidas por nuestra EDAM. Éste se considera un número suficiente de personas para el alcance de este proyecto, que recordemos que es de tamaño pequeño-medio. Además, en dicho apartado también se demuestra que el consumo de agua potable aumentará con el paso de los años, lo cual justifica aún más que esta localización es estratégica y totalmente viable para nuestro proyecto.



Figura 13: Núcleos poblacionales que abastecerá nuestra EDAM (Fuente: Google Maps)

Ahora tendremos que buscar una parcela libre dentro del polígono industrial para nuestra EDAM y que además sea apta para construcción. Para ello, haremos un estudio del suelo. Se realizará el mismo procedimiento para los aerogeneradores y los pozos de captación.

Para ello, emplearemos la herramienta online Grafcan. Encontramos una primera opción para la EDAM, dentro del polígono industrial, y para los pozos de captación, en la costa cercana al polígono. Ambas instalaciones deben estar cercanas una a otra para evitar costes excesivos, ya que a menor longitud de las tuberías de captación y de alimentación, menor trabajo tendrán que hacer las bombas de captación y menos energía eléctrica consumirán. En la Figura 14 se muestra la colocación inicial de las instalaciones mencionadas anteriormente.



Figura 14: Colocación inicial de las EDAM y del sistema de captación (Fuente: Grafcan)

Sin embargo, se decide cambiar la ubicación de los pozos reflejada en la Figura 14. El motivo para tal decisión es que, en dicha localización se hallan varias pendientes del terreno, lo cual podría dar lugar a problemas durante una hipotética construcción civil. Debido a ello, se decide colocar los pozos de captación justo debajo de la parcela seleccionada para la EDAM, que tiene menor pendiente. Así, se acortará la tubería de alimentación, pero aumentará la profundidad necesaria para los pozos de captación.

En la Figura 15 se muestra el perfil longitudinal para el emplazamiento de los pozos seleccionado en primer lugar, en donde se observa la notoria presencia de varias pendientes. Dicho perfil se ha obtenido mediante la herramienta online Goolzoom. En la Figura 16 se refleja el emplazamiento definitivo de la EDAM y de los pozos de captación. Por otro lado, en las Figuras 17 y 18 se muestran las características de las parcelas seleccionadas, como por ejemplo su superficie disponible.

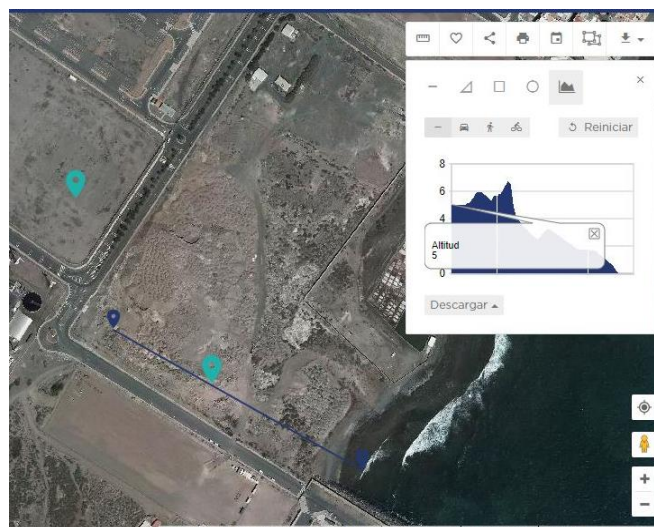


Figura 15: Perfil longitudinal del terreno en el emplazamiento inicial (Fuente: Goolzoom)



Figura 16: Emplazamientos definitivos para la EDAM y los pozos de captación (Fuente: Grafcan)

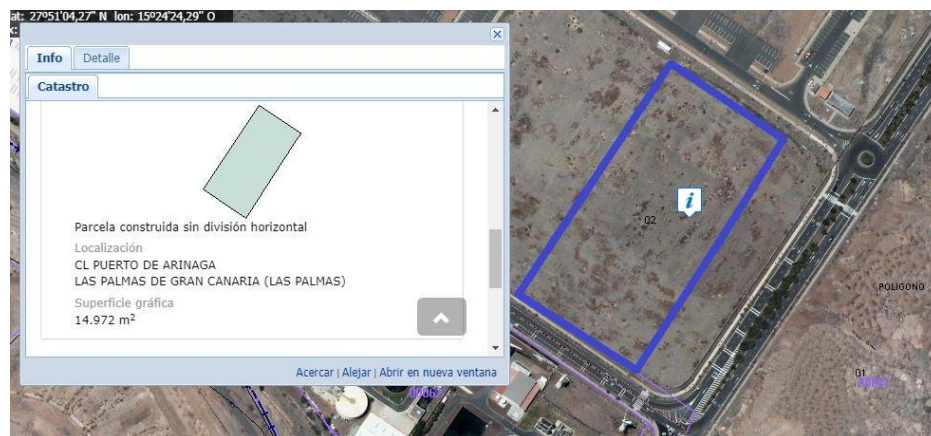


Figura 17: Características de la parcela seleccionada para la EDAM (Fuente: Grafcan)



Figura 18: Características de la parcela seleccionada para los pozos de captación (Fuente: Grafcan)

Una vez decididas las ubicaciones de la EDAM y de los pozos de captación, seleccionaremos un emplazamiento para el sistema eólico. Cabe destacar que en este apartado tan sólo se seleccionará una parcela para el aerogenerador, mientras que la localización exacta se decidirá en Anexo IV. Empleando, una vez más, la herramienta Grafcan, observamos que, justo en los terrenos contiguos al polígono y al lado de la EDAM, hay varios aerogeneradores ya instalados. Por otro lado, también hay proyectos para aerogeneradores futuros. Por lo tanto, consideraremos este terreno como apto para colocar nuestro sistema eólico. Dicha localización se refleja en la Figura 19.



Figura 19: Terreno en el que se colocará nuestro sistema eólico (Fuente: Grafcan)

Ya decididas en qué parcelas se situarán nuestras instalaciones, tenemos que verificar que éstas son aptas para dicho fin. Para ello, haremos un estudio de los espacios naturales protegidos en la zona (Figura 20) y de los usos del suelo (Figura 21). Como podemos observar, ninguna parcela pertenece a espacios naturales protegidos, y todas son de uso industrial, por lo que no habría problemas si este proyecto fuese ejecutable y se construyesen las instalaciones proyectadas.



Figura 20: Espacios naturales protegidos de la zona, en color azul (Fuente: Grafcan)



Figura 21: Usos del suelo de la zona, en color lila los de uso industrial (Fuente: Grafcan)

Ya decididas las ubicaciones de nuestras instalaciones, ahora pasaremos al dimensionamiento de la capacidad de producción de nuestra EDAM. Cabe mencionar que los datos empleados en dicho apartado en cuanto a número de habitantes y su variación anual, y el consumo de agua y su variación, también se han tenido en cuenta para este apartado presente, el de emplazamiento, como ya se ha mencionado anteriormente.

7.3. Capacidad de la planta

En principio, al tratarse de un estudio de una planta desaladora de tamaño pequeño-medio en comparación a las instalaciones de este tipo ya existentes, se estableció una capacidad de producción límite que estará en torno a los 2000-4000 metros cúbicos al día. Para determinar la capacidad definitiva de la planta, se estudiará el número de habitantes de las zonas a abastecer (Cruce, Polígono y Playa de Arinaga), todas dentro del municipio de Agüimes. El objetivo es que nuestra EDAM sea capaz de abastecer a los habitantes de dichas zonas por completo durante un periodo de 5 años (hasta el año 2023), para así poder dar descanso a los recursos hídricos locales actualmente explotados para dicho fin.

El primer paso en este apartado es la búsqueda de los números de habitantes en los núcleos que se desean abastecer, para lo cual se consultaron los datos del ISTAC (Instituto Canario de Estadística) y del INE (Instituto Nacional de Estadística). A partir de estos datos, se extrae que en el municipio de Agüimes, en el año 2017 habitaba un total de 30.882 personas. Posteriormente, se estimará la variación interanual que sufren estas poblaciones, para poder determinar su incremento en los próximos años.

En la Figura 22 se refleja el número de habitantes entre los años 2012 y 2016 (ambos inclusive), en las zonas que se abastecerán de agua potable proveniente de nuestra EDAM, que son, como ya se ha mencionado anteriormente, Cruce, Polígono y Playa de Arinaga. A partir de estos datos, podremos conocer cuál será el número aproximado de habitantes a abastecer dentro de 5 años, cuyo dato estableceremos como punto de partida para el cálculo de la capacidad de producción de agua potable necesaria.

En la Figura 23 se refleja la tasa de variación interanual del número de habitantes en el municipio de Agüimes. Ésta tiene una media del 0,63% en los últimos 5 años.

	2016	2015	2014	2013	2012	2011
	AMBOS SEXOS	AMBOS SEXOS	AMBOS SEXOS	AMBOS SEXOS	AMBOS SEXOS	AMBOS
PLAYA DE ARINAGA	9.495	9.254	9.177	9.160	9.033	
Playa de Arinaga	9.489	9.247	9.170	9.152	9.025	
CRUCE DE ARINAGA	10.242	10.004	9.934	9.876	9.770	
Cruce de Arinaga	10.167	9.933	9.867	9.813	9.708	
Poligono Industrial de Arinaga	11	9	8	4	4	
POLIGONO RESIDENCIAL DE	1.298	1.335	1.341	1.384	1.399	
Poligono Residencial de Arina	1.127	1.170	1.176	1.215	1.229	
Poligono Industrial de Arinaga	34	29	28	29	26	

© Gobierno de Canarias | OFEN DATA | Aviso Legal | Sugerencias y Reclamaciones

Figura 22: Número de habitantes entre los años 2012 y 2016 en las zonas de interés (Fuente: ISTAC)

	2017	2016	2015	2014	2013
	Tasas de variación interanual	Tasas de variación interanual	Tasas de variación interanual	Tasas de variación interanual	Tasas de variación interanual
Agüimes	0,5	1,5	0,2	0,1	1,0

Figura 23: Tasa de variación interanual del número de habitantes en el municipio de Agüimes (Fuente: ISTAC)

A partir de una hoja de cálculo de elaboración propia con el programa Microsoft Excel, se determinarán las poblaciones de las zonas estudiadas para el año 2023. Para ello, se necesitará la variación interanual en cada zona, la cual no se logró encontrar en las bases de datos del ISTAC y del INE. Para obtenerlas, calcularemos las variaciones entre 2012 y 2016 (ya que conocemos el número de habitantes en cada año), extraeremos una tasa de variación media de este periodo y la aplicaremos entre 2017 y 2023, obteniendo así una estimación aproximada del número de habitantes en 2023.

Dichos cálculos se reflejan en la Tabla 2. Como podemos observar, las tasas medias de variación interanual en las tres zonas estudiadas (Cruce un 1,19%, Polígono un 33,68% y Playa de Arinaga un 1,26%) son bastante mayores que la media del 0,63% del municipio de Agüimes. El

resultado final, que se puede observar resaltado en la esquina superior derecha de la Tabla 2, es de un total de 21.507 habitantes en el año 2023 en las zonas a abastecer. Dicho número será el que determine la capacidad de nuestra EDAM, junto al consumo de agua por habitante de las zonas a estudiar, cuya determinación será el siguiente paso de este apartado.

ZONA	Año	Población	Aumento	% variación	TOTAL 2023=	21507
PLAYA	2012	9033				
	2013	9160	127	1,41		
	2014	9177	17	0,19	% medio =	1,26
	2015	9254	77	0,84		
	2016	9495	241	2,60		
	2017	9615	120			
	2018	9736	121			
	2019	9858	123			
	2020	9982	124			
	2021	10108	126			
	2022	10235	127			
	2023	10364	129			
CRUCE	2012	9770				
	2013	9876	106	1,08		
	2014	9934	58	0,59	% medio =	1,19
	2015	10004	70	0,70		
	2016	10242	238	2,38		
	2017	10364	122			
	2018	10487	123			
	2019	10612	125			
	2020	10738	126			
	2021	10866	128			
	2022	10995	129			
	2023	11125	131			
POLÍGONO	2012	4				
	2013	4	0	0,00		
	2014	8	4	100,00	% medio =	33,68
	2015	9	1	12,50		
	2016	11	2	22,22		
	2017					
	2018					
	2019					
	2020					
	2021					
	2022					
	2023	18				

Tabla 2: Cálculo del número de habitantes en las zonas a abastecer en 2023 a partir de los datos conocidos (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos del ISTAC)

Para el consumo de agua, necesitamos el consumo medio de los habitantes de la isla de Gran Canaria. Al no encontrar ningún dato, se empleará el consumo medio de todo el archipiélago canario. Para ello, se consulta un comunicado de prensa del INE del 4 de octubre de 2016, que refleja los consumos medios de agua por habitante en España durante el año 2014 (en litros por día), que se pueden observar en la Figura 24. También se estima su tasa de variación anual.

Consumo medio de agua de los hogares por comunidad autónoma		
Unidad: litro/habitante/día		
	Año 2014	% variación anual
Andalucía	126	5,0
Aragón	130	0,8
Asturias, Principado de	134	9,8
Balears, Illes	124	-12,1
Canarias	144	0,7
Cantabria	152	5,6
Castilla y León	166	5,7

Figura 24: Consumo medio en la comunidad de Canarias en el año 2014, junto con su tasa de variación anual (Fuente: INE)

Ahora, calcularemos los datos para 2023 empleando una hoja de cálculo de Microsoft Excel de elaboración propia, obteniendo los resultados de la Tabla 3. Para ello, se han tenido en cuenta el dato de consumo para 2014 y la variación anual del 0,7% reflejados en la Figura 24.

Año	Consumo
2023	153
2022	152
2021	151
2020	150
2019	149
2018	148
2017	147
2016	146
2015	145
2014	144

Tabla 3: Cálculo del consumo de agua para Canarias para el año 2023 (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos del INE)

Así, sabiendo que para 2023 habrá un total de 21.507 habitantes que consumirán unos 153 litros de agua por día, podemos proceder al cálculo de la capacidad diaria de nuestra EDAM.

$$\text{Capacidad} = \text{Consumo} * n^{\circ} \text{ habitantes} = 0,153 \text{ m}^3/\text{día} * 21507 = 3290,571 \text{ m}^3/\text{día}$$

Así, para cubrir la hipotética demanda de agua para consumo humano en las zonas a abastecer, para el año 2023 necesitaremos una capacidad de aproximadamente 3300 m³/día en nuestra EDAM. Para abastecer en este mismo momento (2018) necesitaríamos una capacidad de

unos 3000 m³/día (0,148*20237). Aun así, hay que tener en cuenta que durante los meses calurosos se consumirá más agua, por lo que el disponer de la capacidad de 3300 m³/día nos asegura el abastecimiento durante estas épocas durante los primeros años. Cuanto más nos acerquemos al año 2023, sobrará cada vez menos de los 3300 m³ de agua durante las épocas de mucho calor.

Si a este hecho le añadimos un posible crecimiento de la población mayor del esperado, nos podríamos encontrar ante una situación en la que no sea posible abastecer por completo antes de cumplir el periodo mínimo de 5 años establecido en los requisitos para este proyecto.

Por lo tanto, se aumentará la capacidad de producción a los 3500 m³/día para asegurar un abastecimiento completo de los núcleos poblacionales de la zona de Arinaga hasta el año 2023.

7.4. Datos de partida

En este apartado se estudiarán los datos sobre los cuáles se basarán los cálculos desarrollados en este proyecto, junto a la capacidad y el emplazamiento calculados en los apartados anteriores. Para ello, analizaremos la temperatura y composición del agua de mar a captar, y los valores límite en la composición del agua producto que se distribuirá a las poblaciones, para ser posteriormente consumida por los habitantes de éstas.

7.4.1. Temperatura del agua de captación/alimentación

Es de gran importancia para el funcionamiento de las membranas, ya que afecta a la solubilidad de determinadas sales (cuyas precipitaciones son peligrosas para las membranas) y favorece la actividad biológica, que puede ensuciarlas. Además, la temperatura determina la viscosidad del agua y la dilatación de los equipos y membranas de la EDAM.

Para la temperatura media anual del agua de mar captada, se extraen los datos de una tabla generada por Puertos del Estado (Tabla 4), para las temperaturas medidas a lo largo del año 2017 por la Boya de Gran Canaria.

Ts: Temperatura Superficial Media del Agua/Surface Mean Temperature of Water ° C

Boya de Gran Canaria Año 2017				Boya de Gran Canaria Año 2017			
Mes/Month	Ts Min./Min. Ts	Día/Day	Hora/Hour	Mes/Month	Ts Max./Max. Ts	Día/Day	Hora/Hour
Enero/January	18.9	27	01	Enero/January	20.1	09	15
Febrero/February	18.5	28	06	Febrero/February	19.4	03	18
Marzo/March	18.4	25	09	Marzo/March	19.6	11	14
Abril/April	18.4	02	10	Abril/April	21.0	29	19
Mayo/May	19.8	01	02	Mayo/May	22.1	10	18
Junio/June	20.8	30	22	Junio/June	23.0	19	18
Julio/July	20.4	01	10	Julio/July	23.3	28	17
Agosto/August	21.8	20	09	Agosto/August	23.8	30	16
Septiembre/September	21.3	08	07	Septiembre/September	24.8	13	19
Octubre/October	22.7	31	21	Octubre/October	24.0	08	17
Noviembre/November	21.9	30	05	Noviembre/November	23.5	03	16
Diciembre/December	19.8	31	09	Diciembre/December	22.2	02	00

Tabla 4: Valores para la temperatura del agua de mar tomados a lo largo del año 2017 por la Boya de Gran Canaria (Fuente: Puertos del Estado)

Esta tabla contiene las temperaturas máximas y mínimas medidas por la Boya de Gran Canaria en 2017. Haciendo una media de todas las temperaturas, se obtiene una mínima anual de 20,2 °C y una máxima anual de 22,2 °C. Haciendo la media entre ambas, se obtiene una temperatura media anual de 21,2 °C, que, para mayor simplicidad de cálculo, se redondeará a los 21 °C.

7.4.2. Composición del agua de captación/alimentación

Dependiendo de la composición del agua que se tratará en el núcleo de desalación, varían determinados parámetros de la instalación, tales como la presión de entrada a las membranas, el tiempo necesario para lavarlas o sustituirlas, o, por ejemplo, el dimensionamiento de los pretratamientos necesarios. La composición del agua de alimentación determinará su salinidad, la cual se busca reducir con el proceso de desalación. Por otro lado, también es importante su índice de pH, que puede dar lugar a corrosión (pH bajo) o a incrustaciones de sales (pH alto).

Además, todos estos datos nos indican el rango de membranas que podremos emplear en nuestro núcleo de desalación y las limitaciones con las que tendremos que trabajar en cuanto al rechazo de sales. Para este proyecto, hemos empleado un análisis químico realizado por el laboratorio Labaqua, el cual hemos extraído del Trabajo de Fin de Grado “Estudio de un sistema de desalación y de producción de hidrógeno alimentado mediante energías renovables”, perteneciente a la Universidad de La Laguna. En dicho análisis se muestra la composición de una muestra de agua de mar tomada en la EDAM de Santa Cruz de Tenerife. Debido a su cercanía con el emplazamiento de nuestras instalaciones, el análisis se da como válido para este proyecto. Los valores están reflejados en la Tabla 5. También se añaden los valores físico-químicos de dicha agua de mar (conductividad, sólidos en suspensión y pH).

Elemento	Composición (mg/L)	Elemento	Composición (mg/L)
Calcio (Ca)	431	Boro (B)	5,23
Magnesio (Mg)	1470	Cobalto (Co)	0,002
Potasio (K)	451	Cobre (Cu)	0,002
Sílice (Si)	1,1	Cromo (Cr)	0,006

Sodio (Na)	11870	Estroncio (Sr)	10
Bromo (Br)	0,5	Hierro (Fe)	0,025
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	141,5	Manganeso (Mn)	0,003
Cloruros (Cl ⁻)	21280	Conductividad a	54767
Fluoruros (F ⁻)	0,862	25°C [μ S/cm]	
Nitratos (NO ₃ ⁻)	0,7	Sólidos en	4
Sulfatos (SO)	3148	suspensión [mg/L]	
Bario (Ba)	0,017	pH [adimensional]	8

Tabla 5: Valores para la composición del agua de mar en S/C de Tenerife (Fuente: Labaqua)

7.4.3. Valores límites en la composición del agua producto

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, la capacidad de producción de nuestra EDAM será de 3500 m³/día, y dicha agua se destinará al consumo humano. Debido a ello, el agua producto tendrá que cumplir con los valores límites en su composición físico-química que establece la normativa vigente para agua que se emplea para abastecimiento humano, específicamente el RD 140/2003. Dichos parámetros se reflejan en la Tabla 6.

pH	6,5 a 9,5	Fluoruro	1,5 mg/L
Amonio	0,5 mg/L	Nitrato	50 mg/L
Boro	1 mg/L	Sodio	200 mg/L
Cloruro	250 mg/L	Sulfato	250 mg/L

Tabla 6: Valores límite establecidos para agua de abastecimiento humano (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos del RD 140/2003)

8. Análisis de soluciones

Ahora, se hará un análisis de las alternativas que se han estudiado en torno a los aspectos más relevantes de este proyecto, llevando finalmente a la elección de una solución adecuada, siempre siendo ésta justificada. En el caso de no tener conocimientos previos respecto al proceso de desalación por osmosis inversa y sus instalaciones, es recomendable la lectura del Anexo I, en donde se desarrolla una breve introducción teórica de la OI, y se explican todos los elementos involucrados y las diferentes alternativas que se emplean a menudo en instalaciones de este tipo.

Por otro lado, todos los puntos que se tratarán a continuación han sido analizados profundamente en los Anexos de cálculos de este proyecto (II, III y IV). De ellos, se han extraído las soluciones de este apartado y los resultados del siguiente, el número 9. También cabe destacar que, para los puntos en los que se trata la gestión del exceso o déficit de energía eólica, y las soluciones pertinentes, es recomendable consultar el Anexo V.

8.1. Esquema general de todas las instalaciones

En la Figura 25 se refleja el esquema general de todas las instalaciones de este proyecto.

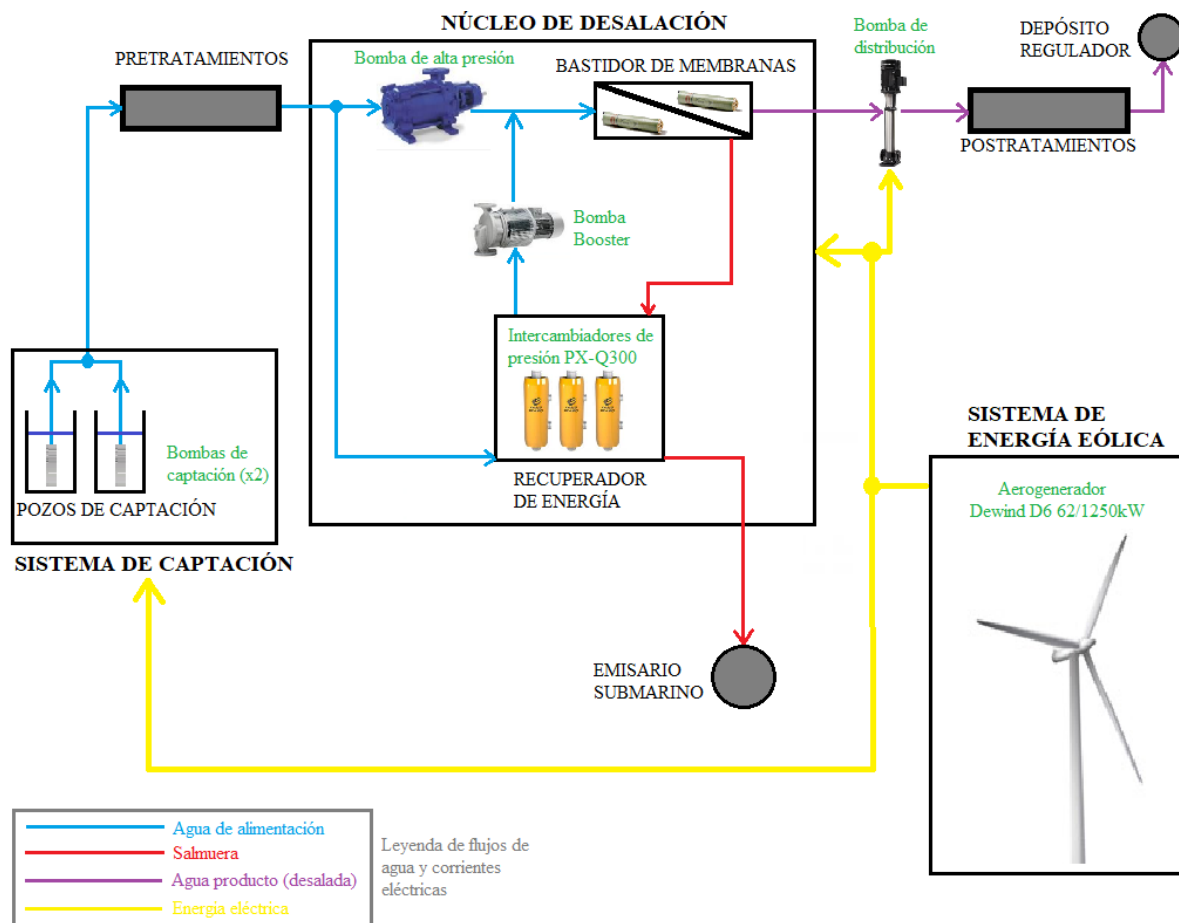


Figura 25: Esquema general de todas las instalaciones (Fuente: Elaboración propia)

8.2. Sistema de captación de agua de mar

El sistema de captación de nuestra EDAM se encargará de recoger agua de mar a partir de tomas, para alimentar a la planta con ella. Para poder transportar el agua desde el punto de captación hasta la entrada del núcleo de desalación, será necesario el uso de bombas.

8.2.1. Tipo de captación

Las tomas pueden dividirse en dos grupos principales: abiertas (o superficiales) y cerradas (mediante pozos). En la primera, el agua tendrá un contenido alto de sólidos en suspensión y con mayor variabilidad, y lo mismo para la cantidad de oxígeno disuelto y las actividades orgánicas y biológicas. La composición química y la temperatura del agua de captación también sufrirán una gran variabilidad. Este tipo de captación puede realizarse mediante escollera o torres sumergidas.

Por otro lado, la captación con toma cerrada mediante pozos presenta varias ventajas. El agua tiene una mayor limpieza (realizada de modo natural debido a la filtración del terreno), y sus características sufren de menor variabilidad. Debido a ello, los índices de colmatación (SDI) y de turbidez (NTU) serán bajos, implicando menor necesidad de pretratamientos. Las actividades orgánicas y biológicas también estarán limitadas. El inconveniente es que el agua de captación tendrá un alto contenido de minerales y metales, y de pesticidas al estar cercana la EDAM a una zona de uso agrícola, por lo que se deberán de aumentar los pretratamientos.

Teniendo todo esto en cuenta, se ha optado por la captación cerrada mediante pozos aislados para nuestro sistema, al ser la opción más beneficiosa para el agua de captación. Hay un alto interés en que tenga la mayor limpieza posible, al ser su destino el consumo humano.

8.2.2. Pozos de captación

Se colocará un total de tres pozos de captación, de los cuales dos trabajaran de forma continua mientras que el tercero actuará como pozo de reserva. Esta medida es útil para los casos en los que uno de los dos pozos principales deje de funcionar (mantenimiento, averías en la bomba, etc.), y se pueda seguir alimentando la misma cantidad de agua a la EDAM poniendo en funcionamiento el pozo de reserva hasta que se haya resuelto el problema. También se evitará la sobreexplotación de los pozos, alargando así su vida útil.

Se colocarán en forma de cruz, ya que es la disposición constructiva más simple para tres pozos, con una separación de 20 metros hacia el punto colector cada una, cuyo esquema se observa en la Figura 26. Teniendo en cuenta la bajamar máxima de la zona, la altura de los pozos sobre el nivel del mar, y las pérdidas de carga por filtración y por el cono de succión durante la aspiración de la bomba, los pozos tendrán una profundidad de 20 metros. Con ella se garantiza que las bombas de captación siempre tengan una columna de agua por encima de ellas, al ser sumergibles.

SWC6, todos ellos en la variante MAX, que presenta mejores prestaciones. Finalmente, se descarta el modelo SWC6 MAX, al tener unas prestaciones menores que los otros dos modelos.

Ahora, debemos de seleccionar un modelo final. Para ello, realizaremos los cálculos con cada uno de los dos restantes, y tomaremos una decisión final basándonos en la calidad del agua producto, en la cual tomaremos como límites el índice de Boro y de TDS (sólidos totales disueltos). Para esta selección, hemos supuesto que el bastidor de membranas consta de 1 etapa y de 6 membranas por tubo de presión, de los cuales se emplearán un total de 36. El programa también nos pide los datos del recuperador de energía, para los cuales introduciremos los de por defecto, al no haber definido aún dicha parte de la instalación, lo cual se realizará más adelante.

Una vez hecho el cálculo con cada modelo, que se puede consultar en el Anexo I, obtenemos que, en cuanto al índice de Boro, el modelo SWC5 MAX sobrepasa el límite de 1 mg/L establecido por la normativa aplicada, por lo que el empleo de este modelo implicaría un mayor coste de postratamiento para poder destinar el agua producto a consumo humano. **Debido a que el SWC4 MAX (Figura 27) no sobrepasa este límite, se seleccionará como el modelo de membrana para nuestra EDAM.** En cuanto al valor de TDS, no hay diferencias significativas entre los modelos y se encuentra por debajo del límite en ambos casos.



Figura 27: Membrana SWSC4 MAX, del fabricante Hydranautics (Fuente: www.membranes.com)

8.3.2. Especificaciones del bastidor de membranas

Seleccionaremos el número de etapas, el porcentaje de conversión, el número de membranas por tubo de presión y el número total de éstos.

Para el número de etapas, éste puede ser simple o doble. En principio, el último daría una mayor conversión y menor consumo específico. Sin embargo, hay que tomar en cuenta el efecto del recuperador de energía. Según la bibliografía consultada, tomando este elemento en cuenta, se igualan los consumos en ambos casos, ya que en los sistemas de doble etapa se transmite menos presión al caudal de alimentación. Además, los costes del recuperador de energía en la doble etapa son mayores. **Debido a ello, se decide escoger la simple etapa para nuestra EDAM.**

En cuanto al porcentaje de conversión, se decidirá entre un 45% (el más habitual en instalaciones de este tipo) y el 50% (también aceptable). Para el número de membranas por tubo de presión, escogeremos entre 6 ó 7. Para ambas opciones, IMSDesign nos recomienda el empleo de **36 tubos de presión en total**, por lo cual ya conocemos este dato también. Ahora, se realizará un cálculo, de igual forma que se hizo para la selección del modelo de membranas, con tres opciones: 6 membranas y 45% de conversión, 7 membranas y 45% de conversión, y 7 membranas

y 50% de conversión. Se volverá a estudiar la calidad del agua producto (Boro y TDS) con cada opción, y también será importante el consumo específico de cada una. Una vez hecho esto, se obtienen los resultados de la Tabla 7.

Nº de membranas	% de conversión	Boro (mg/L)	TDS (mg/L)	Consumo específico (kWh/m ³)
6	45	0,749	141,55	2,46
7	45	0,874	165,86	2,35
7	50	0,935	179,41	2,46

Tabla 7: Resumen para cada opción de membranas y % de conversión (Fuente: Elaboración propia)

En base a estos resultados, todas las opciones son válidas en cuanto a la calidad del agua producto ya que en ninguna se exceden los límites. Basándonos en el consumo específico, no se puede tomar una decisión definitiva aún, ya que todavía no se ha dimensionado el recuperador de energía, y los consumos podrían variar una vez hecho esto. Por ello, lo dimensionaremos para cada una de las tres opciones, y finalmente realizaremos de nuevo el cálculo del consumo específico para tomar la decisión final para la configuración del bastidor de membranas.

8.3.3. Recuperador de energía y selección final del bastidor de membranas

Para este elemento de la EDAM, **debemos escoger entre un intercambiador de presión y un sistema de turbinas Pelton. Emplearemos la primera opción**, al ser la más extendida en instalaciones desaladoras del mismo tipo y capacidad que la nuestra. Para su dimensionamiento, nos ayudaremos de una hoja de cálculo proporcionada por el fabricante que hemos seleccionado para esta aplicación, Energy Recovery. En dicha hoja, tendremos que introducir temperaturas, número de etapas, porcentajes de conversión, TDS de agua producto y de alimentación, caudal del agua producto y presiones en varios puntos del núcleo de desalación. Todos estos datos los extraeremos de los diagramas de flujo que nos genera IMSDesign para cada una de las tres opciones de configuración del bastidor que vamos a analizar. **Para el intercambiador de presión, escogeremos el modelo PX-Q300, del cual se emplearán un total de 3 unidades.** Dicho modelo está reflejado en la Figura 28.

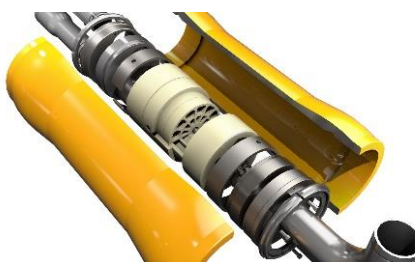


Figura 28: Interior del intercambiador de presión PX-Q300 (Fuente: Energy Recovery)

Al introducir estos datos en la hoja de cálculo, ésta nos devuelve el consumo específico. También nos da los datos del intercambiador de presión que tendremos que introducir en IMSDesign para el dimensionamiento final. En la Tabla 8 se pueden apreciar los consumos específicos obtenidos con la hoja de cálculo de Energy Recovery para cada opción estudiada.

Configuración	Consumo específico (kWh/m ³)
6 mem. 45%	2,74
7 mem. 45%	2,61
7 mem. 50%	2,76

Tabla 8: Consumos para cada configuración con el intercambiador de presión (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede observar, **la configuración de 7 membranas y 45% de conversión es la que menor consumo específico tiene (2,61 kWh/m³)**. Hay que tener en cuenta que estos consumos se obtuvieron suponiendo los rendimientos de las bombas de alta presión y Booster, que se dimensionarán más adelante. Por otro lado, según los resultados obtenidos con IMSDesign, la opción de 7 membranas y 45% de conversión consume el menor caudal de alimentación, por lo que se ahorrarán costes en las bombas de captación. **Así, escogemos la opción de 7 membranas con un 45% de conversión para nuestro bastidor de membranas, que será de simple etapa.**

Al recalcular el consumo de esta opción con IMSDesign, esta vez introduciendo los valores reales para el recuperador de energía, obtenemos un consumo específico de **2,35 kWh/m³**, algo menor que con la hoja de cálculo de Energy Recovery. Una vez dimensionadas las bombas de la EDAM, se definirá el consumo específico final.

8.3.4. Resumen de las características del núcleo de desalación

En la Tabla 9 se representa un resumen de las características del núcleo de desalación, teniendo en cuenta que los consumos específicos se han obtenido suponiendo los rendimientos de las bombas.

Tipo de sistema	Osmosis inversa
Capacidad [m ³ /día]	3500
Número de etapas (bastidor)	1
Número de tubos de presión	36
Número de membranas por tubo	7
Número total de membranas	252
Conversión	45%
Fabricante de membrana	Hydranautics
Modelo de membrana	SWC4 MAX
Fabricante del intercambiador de presión	Energy Recovery
Modelo de intercambiador de presión	PX-Q300 (3 unidades)

Consumo específico [kWh/m ³]	IMSDesign	ER Excel
		2,35

Tabla 9: Características del núcleo de desalación con rendimientos de bombas supuestos (Fuente: Elaboración propia)

8.3.5. Prueba con membranas híbridas

Se realizó una prueba con membranas híbridas, lo cual significa que se emplearán varios modelos de Hydranautics en un mismo tubo de presión, con el objetivo de estudiar la variación en el consumo específico y en la calidad del agua producto empleando esta configuración. Para ello, se estudiaron 3 variantes:

- Combinación 1: 6 membranas; tres SWC4 MAX y tres SWC5 MAX.
- Combinación 2: 6 membranas; dos SWC4 MAX y cuatro SWC5 MAX.
- Combinación 3: 7 membranas; cuatro SWC4 MAX y tres SWC5 MAX.

En la Tabla 10 se pueden observar los resultados obtenidos tras realizar el cálculo con IMSDesign.

Combinación	Boro (mg/L)	TDS (mg/L)	Consumo específico (kWh/m ³)
1	1,029	170,08	2,34
2	1,114	179,55	2,30
3	1,156	194,54	2,26

Tabla 10: Resultados para cada combinación de membranas híbridas estudiadas (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede observar, empleando el modelo SWC5MAX en nuestros tubos, el agua producto siempre excede el límite de 1 mg/L de Boro. Este parámetro es el más importante a tener en cuenta al producir agua para consumo humano. Por otro lado, el consumo específico desciende, pero no de forma notable respecto a la configuración que hemos seleccionado para el bastidor en el apartado anterior, que consumía 2,35 kWh/m³. Debido a este hecho, y a la obligación de disponer, con la opción híbrida, de dos modelos para recambios, se descarta esta opción ya que implicaría mayores costes. También aumentarían los costes de postratamiento, ya que ninguna opción híbrida proporciona agua por debajo del límite del Boro.

8.4. Tuberías principales (longitudes, cotas y diámetros)

Tendremos que dimensionar tres tuberías de captación (al haber tres pozos), una de alimentación, una de distribución y una de rechazo de salmuera. Para dimensionar las bombas del

sistema, necesitaremos las pérdidas de cargas en dichas tuberías. Éstas las calcularemos con las longitudes, las cotas y los diámetros de las tuberías. Primero definiremos los tramos, quedando automáticamente calculadas las longitudes y cotas de entrada y salida de las tuberías. Finalmente, dimensionaremos los diámetros mediante el criterio de Bonet, conociendo los caudales.

Cabe destacar que, para todas las tuberías que se dimensionarán en este proyecto (alimentación, distribución y rechazo de salmuera), se ha seleccionado como material el PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio), a partir de las recomendaciones de AseTUB.

8.4.1. Tuberías de captación

Para la tubería de captación, sabemos que la distancia entre el punto colector y cada pozo de captación es de 20 metros, y sus profundidades tienen el mismo valor. **Por lo tanto, cada tubería de captación tendrá una longitud de 40 metros.** Se puede observar su trayecto en la Figura 26.

Para la diferencia de cota entre el punto inicial y final de las tuberías, supondremos como horizontal el tramo entre el punto colector y la entrada de cada pozo. **Por lo tanto, la diferencia de cota total para cada tubería de captación será igual a la profundidad de los pozos, que vale 20 metros.** Para el diámetro, se emplea el criterio de Bonnet, el cual nos da como resultado un diámetro teórico de 241,5 mm, el cual se redondea al diámetro comercial de 250 mm de Flowtite.

8.4.2. Tubería de alimentación

El sistema de alimentación une el punto colector de las tuberías de captación con la entrada al bastidor de membranas, en donde se encuentra la bomba de alta presión (HPP). Esto se hará mediante la tubería de alimentación, en la cual también podremos encontrar los pretratamientos, tanto físicos como químicos, que se realizarán sobre el agua de mar captada.

Para la diferencia de cota, tomaremos la suposición de que el terreno por el cual viaja la tubería de alimentación no tiene pendiente, por lo que **no tendremos variaciones de cota entre la entrada y la salida.** En la Figura 29 podemos observar el trayecto que sigue dicha tubería, que va desde el punto colector de la captación hasta la entrada a la EDAM. En dicha figura también podemos apreciar que **la longitud de la tubería de alimentación será de 165 metros, la cual redondearemos a los 170 metros** para mayor seguridad en los cálculos.



Figura 29: Distancia en metros desde los pozos de captación hasta la EDAM (Fuente: Goolzoom)

Para el diámetro, empleando el criterio de Bonnet hemos obtenido un diámetro mínimo teórico de 318,7 mm. Así, **seleccionaremos el diámetro comercial de 350 mm de Flowtite para nuestra tubería de alimentación.**

8.4.3. Tubería de distribución

La tubería de distribución transportará el agua producto de la EDAM hacia un pozo regulador, que posteriormente distribuirá dicha agua a las poblaciones objetivo. Para este proyecto, supondremos la existencia de un depósito regulador, ya que no se ha logrado encontrar información respecto a uno ya existente en la zona. Tendrá que tener una mayor altura de cota que las poblaciones a abastecer para garantizar el trasvase por gravedad. Tras una larga búsqueda y comprobaciones de que las parcelas estudiadas son aptas para construcción, se ha seleccionado una parcela por encima de Cruce de Arinaga. Ésta pertenece a un suelo de cultivos abandonados, el cual está desaprovechado y se podría emplear de mejor manera.

El tramo aproximado para la tubería de distribución queda reflejado en la Figura 30, con una longitud de unos 5300 metros, la cual se aumenta a los **5500 metros de longitud**. Estudiando el perfil longitudinal con la herramienta Goolzoom, obtenemos una **diferencia de cota de 100 metros**. Finalmente, con el criterio de Bonnet, obtenemos un diámetro teórico de 232,7 mm, por lo que seleccionamos el **diámetro comercial de 250 mm de Flowtite** para nuestra tubería.



Figura 30: Longitud de la tubería de distribución desde la EDAM hasta el depósito regulador (Fuente: Goolzoom)

8.4.4. Tubería de rechazo de salmuera

La tubería de rechazo transportará la salmuera desde la salida de la EDAM hacia un emisario submarino, el cual se ha dimensionado en una isobata a 20 metros de profundidad y a unos 1930 metros de la costa (redondeado a 2000), estando así a unos 2375 metros de distancia hasta la EDAM (redondeado a 2500). El trayecto se puede apreciar en la Figura 31. Por otro lado, mediante la herramienta Goolzoom hemos obtenido que la EDAM se encuentra a 4 metros de altura sobre el nivel del mar, que unido a la profundidad del emisario, da un total de 24 metros de diferencia de cota para la tubería de rechazo, que aumentaremos a 25. **Así, la tubería de rechazo tendrá una longitud de 2500 metros y una diferencia de cota de 25 metros.** Mediante el criterio de Bonnet, obtenemos un diámetro teórico mínimo de 249,9 mm, lo cual nos hace escoger el diámetro comercial de 250 mm de Flowtite.

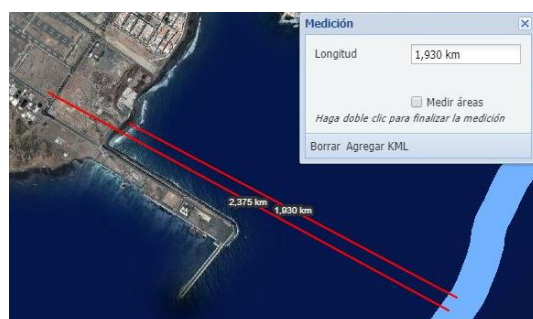


Figura 31: Distancia desde la EDAM hasta la isobata de -20 metros (Fuente: Grafcan)

8.4.5. Resumen de las tuberías principales de la EDAM

En la Tabla 11 se puede apreciar un resumen de las tuberías principales de nuestro proyecto. Cabe recordar que todas estarán fabricadas con PRFV.

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Diferencia de cota (m)
Captación (x3)	40	250	20
Alimentación	170	350	0
Distribución	5500	250	100
Rechazo	2500	250	25

Tabla 11: Resumen de las tuberías principales del sistema (Fuente: Elaboración propia)

8.5. Tratamientos sobre el agua

Para garantizar el funcionamiento correcto de nuestra EDAM, se tendrán que realizar varios pretratamientos, para garantizar que el agua de alimentación no sea perjudicial para las membranas y los equipos del núcleo de desalación; y postratamientos, para lograr un agua producto que sea apta para el consumo humano. Los pretratamientos se pueden dividir en físicos y químicos. Cabe destacar que no se hará un dimensionado específico de estos procesos, al no disponer de los estudios y análisis necesarios para ello, al tratarse de un proyecto no ejecutable.

8.5.1. Pretratamientos físicos

Al captarse el agua mediante pozos, no será necesario un pretratamiento físico muy intenso, ya que el agua de captación contendrá pocos sólidos disueltos y habrá ausencia de actividad biológica y orgánica. Según las fuentes consultadas, se aconseja el empleo de filtros de arena y de cartucho para garantizar que el agua de alimentación no dañe las membranas de poliamida. **Los filtros de arena tendrán una boquilla filtrante de 0,5 mm, mientras que los de cartucho tendrán un nivel de filtración mínimo de 5 micras, todo basado en los requisitos expuestos por Hydranautics para sus membranas de poliamida.**

Para las pérdidas de carga, tomaremos como válido el valor más desfavorable, de 1,961 bar. Éste lo redondearemos a los 2 bar de pérdidas de carga totales.

8.5.2. Pretratamientos químicos

El pretratamiento químico se realizará con el objetivo de evitar la precipitación de sales minerales u óxidos metálicos sobre las membranas. Para ello, se pueden aplicar las siguientes opciones:

- **Corrección del pH:** con una dosis de HCl (100%), que, según cálculos de IMSDesign, se aplicará como 8,92 mg por litro de agua tratada.
- **Dispersante:** para evitar la precipitación de CaF_2 y de BaSO_4 , al ser poco solubles.
- **Cloración:** para combatir la actividad biológica, llegando a la 1 ppm de Cl.
- **Decloración:** posterior a la cloración, mediante bisulfito sódico, al no ser las membranas de poliamida resistentes a elevados contenidos de Cl en el agua a desalar.

8.5.3. Postratamientos

Se realizarán postratamientos con el objetivo de obtener un agua producto apta para consumo humano. Para ello, según el RD 140/2003, el índice de pH deberá de estar comprendido entre 6,5 y 9,5. Según los cálculos realizados con IMSDesign, el pH del agua producto de nuestra EDAM tendrá un índice de pH de 5,4. Por otro lado, también será necesario el restablecimiento de los bajos valores de alcalinidad y calcio, para corregir el agua producto, que estará desequilibrada.

Para ello, se realizará el siguiente postratamiento principal sobre el agua producto, justo a la salida del bastidor de membranas, en la tubería de distribución: el empleo de productos químicos. Los más extendidos en instalaciones de este tipo son, según IMSDesign, el NaOH y el Na₂CO₃. Éstos productos estabilizarán el pH, pero también harán que el agua producto sea más corrosiva al tener un déficit de Calcio. **Por ello, se añadirá también un inhibidor de corrosión para proteger los equipos del sistema de distribución.**

Otros postratamientos que pueden emplearse son la mezcla con otras aguas, la descarbonatación o la desgasificación.

8.6. Bombas principales del sistema

Para dimensionar las bombas principales de nuestra EDAM, emplearemos un balance de energía para calcular la altura que deben proporcionar. Conociendo este dato, y el caudal que deben garantizar (el cual obtendremos a partir del diagrama de flujo de IMSDesign), mediante las curvas características de los fabricantes seleccionaremos los modelos específicos para cada aplicación, calculando el punto de operación de la bomba. En el balance de energía, necesitaremos introducir las pérdidas de carga en la tubería que será alimentada por la bomba en cuestión, la diferencia de cota de dicha tubería (z_2) y la altura de presión en dicho tramo. El balance de energía queda expresado en la Ecuación 1. También se tendrá en cuenta la cavitación, un fenómeno indeseable.

$$Hb = \frac{P_2 - P_1}{\rho * g} + z_2 + \sum Hr$$

Ecuación 1: Balance de energía que será empleado para el cálculo de la altura de las bombas

Para las pérdidas de carga en las tuberías, emplearemos la ecuación de Darcy-Weisbach para las pérdidas de carga principales, mientras que para las pérdidas en los accesorios emplearemos los coeficientes de pérdida correspondientes. Una vez sumados ambos términos, añadiremos un 20% sobre este total, que corresponderá a la estimación de las pérdidas de carga en elementos que no se han tenido en cuenta en los cálculos anteriores, tales como válvulas. En la Tabla 12 se expresan los resultados finales para las pérdidas de carga en nuestra EDAM.

Tuberías	$H_{r,acc}$ (m)	H_r (m)	$H_{r,acc} + H_r$ (m)	20%	H_r TOTAL (m)
Captación	0,119	0,111	0,230	0,046	0,276
Alimentación	0	0,326	0,326	0,065	0,391
Distribución	0,128	12,800	12,928	2,586	15,514
Rechazo	0	8,093	8,093	1,619	9,712

Tabla 12: Resultados finales para las pérdidas de carga en nuestra EDAM (Fuente: Elaboración propia)

En este apartado, se dimensionarán las bombas de captación (tres en total, una como bomba de reserva), de distribución (una que funcionará de manera continua mientras que la otra actuará de reserva), de rechazo, de alta presión y, por último, la bomba Booster.

8.6.1. Bombas de captación

Las bombas de captación deben de suministrar una altura de 61,44 metros y un caudal de 162 m³/h. Escogeremos entre modelos de los fabricantes Grundfos y Wilo. Las bombas deben de ser sumergibles. Estudiando diferentes curvas características de varios modelos, hemos seleccionado los que se reflejan en la Tabla 13.

Fabricante	Modelo de bomba	Rendimiento (%)	Consumo (kW)
Grundfos	SP 160-4-AA-200203B4	63,5	46,11
Wilo	K8.130	77,2	37,80

Tabla 13: Modelos seleccionados para las bombas de captación (Fuente: Elaboración propia)

Se escogerá el modelo **K8.130 de Wilo (Figura 32)**, al tener un mayor rendimiento y menor consumo de potencia. Además, su punto de operación es más cercano a nuestras necesidades que el de la bomba de Grundfos. Al ser una bomba sumergible, no dispone de tubería de aspiración, por lo que no hay riesgos de cavitación.

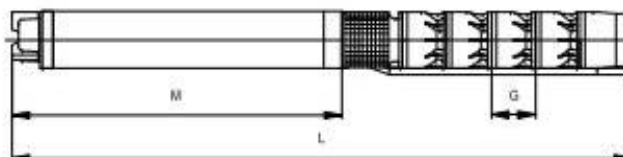


Figura 32: Imagen de la bomba sumergible Wilo K8.130 (Fuente: Wilo-Select 4)

8.6.2. Bombas de distribución

Se tendrá una bomba de distribución funcionando de manera continua mientras que otra actuará de reserva. Esta bomba tendrá que suministrar una altura de 115,51 metros y un caudal de 146 m³/h. Estudiaremos modelos, una vez más, de los fabricantes Grundfos y Wilo. A partir de las curvas características de varios modelos, hemos seleccionado los que se reflejan en la Tabla 14.

Fabricante	Modelo de bomba	Rendimiento (%)	Consumo (kW)
Grundfos	CR 150-6	71,90	58,17
Wilo	SiBoost Smart 4 Helix V 5206/2	77,12	56,80

Tabla 14: Modelos seleccionados para las bombas de distribución (Fuente: Elaboración propia)

Se escogerá el modelo **CR 150-6 de Grundfos (Figura 33)**. Dicha bomba tiene peor rendimiento que la de Wilo, pero, sin embargo, su punto de operación es idéntico al de nuestras necesidades, mientras que la bomba de Wilo opera en un punto muy alejado, sin proporcionar la

altura deseada. Así, seleccionando el modelo de Grundfos, no precisaremos de válvulas para regular caudal y presión, abaratando así la instalación.



Figura 33: Imagen de la bomba Grundfos CR 150-6 (Fuente: Grundfos Webcaps)

8.6.3. Bomba de rechazo

En un principio, no haría falta una bomba de rechazo para nuestra EDAM, ya que el trasvase de la salmuera se debería de realizar automáticamente mediante la acción de la gravedad. Para demostrar tal afirmación, será necesario que la altura a proporcionar por la bomba de rechazo sea menor que 0. Empleando el balance de energía estudiado con los valores correspondientes para el flujo y tubería de rechazo, obtenemos una altura negativa para la bomba, de -15,288 metros. **Así, no será necesaria la implantación de una bomba de rechazo en nuestra EDAM, ya que la diferencia de cota entre su salida y el emisario submarino es suficiente para realizar el trasvase de la salmuera por gravedad.**

8.6.4. Bomba de alta presión (HPP)

La bomba de alta presión de nuestra EDAM tendrá que ser capaz de proporcionar una altura de 639,14 metros y un caudal de 147 m³/h. En esta ocasión, escogeremos entre modelos del fabricante KSB, al no haber modelos en Wilo ni en Grundfos que cumplan con nuestros requisitos. Estudiando las curvas características de los modelos GA y CA de KSB, obtenemos como más adecuado el modelo CA 125-10.2. En cuanto a la cavitación, no habrá riesgo alguno según las curvas características y nuestros cálculos.

Así, para la bomba de alta presión se seleccionará el modelo CA 125-10.2 de KSB (Figura 34), con un rendimiento del 78,11% y un consumo de potencia de 372,05 kW.



Figura 34: Imagen de la bomba KSB CA 125-10.2 (Fuente: KSB Easysselect)

8.6.5. Bomba Booster

Para la bomba Booster, escogeremos entre modelos de los fabricantes Grundfos y Wilo. Dicha bomba debe de ser capaz de suministrar 14,27 metros y 178 m³/h. A partir de las curvas características proporcionadas por los fabricantes mencionados, hemos seleccionado los modelos que se reflejan en la Tabla 15.

Fabricante	Modelo de bomba	Rendimiento (%)	Consumo (kW)
Grundfos	NB 100-200/191 A-F2-A-E-BAQE	74,80	9,30
KSB	Etaline 150-150-200	79,37	8,76

Tabla 15: Modelos seleccionados para la bomba Booster (Fuente: Elaboración propia)

Entre ambas, optaremos por el modelo Etaline 150-150-200 de KSB (Figura 35), al tener un mayor rendimiento y menor consumo. En cuanto al punto de operación, ambos modelos funcionaban cercanos a nuestras necesidades. En cuanto a la cavitación, no hay riesgo, según la curva característica del modelo seleccionado y nuestros cálculos.



Figura 35: Imagen de la bomba Etaline 150-150-200 (Fuente: KSB Easysselect)

8.7. Resumen de las bombas y consumo específico final

Una vez obtenidos los consumos de las bombas principales del sistema, del núcleo de desalación y el consumo con el recuperador de energía incorporado, pasamos a calcular el consumo específico final de todas las instalaciones. Recordemos que se emplea la configuración de simple etapa, 7 membranas y 36 tubos de presión, con un 45% de conversión para el núcleo de desalación.

Primero, se han calculado los consumos específicos con la hoja de cálculo de Energy Recovery y con el software IMSDesign, introduciendo esta vez los rendimientos de bombas obtenidos en el apartado anterior. Hay que tener en cuenta que, en este caso, sólo se tienen en cuenta las bombas del núcleo de desalación, que son las de alta presión y la Booster **Así, con la hoja de cálculo obtenemos un consumo específico de 2,41 kWh/m³, mientras que con IMSDesign el consumo específico se queda en los 2,49 kWh/m³. Se han tenido en cuenta la bomba de alta presión y la bomba Booster.** Estos resultados serán útiles para comparación con el consumo obtenido sumando los consumos de las bombas, realizado a continuación.

Por otro lado, también hemos calculado el consumo específico de la EDAM empleando los consumos de todas las bombas, obtenidos en el apartado anterior. Dichos cálculos quedan reflejados en la Tabla 16.

Bomba	Modelo	Consumo (kW)	Consumo específico (kWh/m ³)
Alta presión (HPP)	KSB CA 125-10.2	372,05	2,55
Booster	KSB Etaline 150-150-200	8,76	0,06
Captación (x2)	Wilo K8.130	75,6	0,52
Distribución	Grundfos CR 150-6	58,17	0,40
TOTAL=		514,58	3,53

Tabla 16: Consumos específicos de cada bomba de la EDAM (Fuente: Elaboración propia)

Así, obtenemos un consumo específico final de 2,61 kWh/m³ para el núcleo de desalación (HPP + Booster), muy similar a los consumos obtenidos con IMSDesign y la hoja de cálculo de Energy Recovery.

Para la EDAM completa, el consumo específico final es de 3,53 kWh/m³. El consumo total de la planta en kW es de 514,58 kW. De modo indicativo, tomando como referencia un precio de 0,14 euros para el kWh (según Endesa Clientes), la EDAM tendría un coste anual de 625.975 euros, suponiendo una producción máxima para los 365 días del año. Este coste se suplirá con el sistema de abastecimiento eólico.

8.8. Dimensionamiento del sistema eólico

Para ello, se hará un análisis del recurso eólico disponible en el emplazamiento que se escogerá para el aerogenerador. Posteriormente, se seleccionará un modelo apto para dichas condiciones, que nos proporcione un abastecimiento energético suficiente para alimentar el consumo de la EDAM calculado en el apartado anterior.

8.8.1. Análisis del recurso eólico

Para conocer el recurso eólico que tendrá disponible nuestro aerogenerador, tendremos que decidir primero cuál será su emplazamiento. Para ello, escogeremos uno de los puntos reflejados en la Figura 19 de esta Memoria, perteneciente al apartado de Emplazamiento (7.2.). En dicha Figura, hay varios aerogeneradores, unos de color verde (ya instalados) y otros de color rojo (en proyecto o trámite).

Al no ser este un proyecto ejecutable y no disponer de los medios adecuados, tomaremos la suposición de que uno de los aerogeneradores que se encuentran en proyecto será el de nuestra EDAM. Escogeremos uno lo más alejado posible del polígono industrial, para evitar turbulencias debido a la cercanía de edificaciones, y lo más cercano posible al mar, al ser mayor el recurso eólico en dicha condición. El aerogenerador seleccionado se refleja en la Figura 36.



Figura 36: Aerogenerador seleccionado para nuestra EDAM (Fuente: Grafcan)

Tras conocer el emplazamiento exacto del aerogenerador, pasamos a generar la distribución de Weibull correspondiente, en la cual se reflejará la gráfica de distribución de velocidades. Ahora, pasaremos al mapa eólico ofrecido por el IDAE. En él, introduciremos las coordenadas UTM del emplazamiento seleccionado. Así, obtenemos los parámetros de frecuencia, velocidad, porcentaje de potencia y valores de las variables de Weibull C y K, todos ellos para cada dirección de soplo del viento. Dichos resultados están desarrollados en el Anexo IV. A partir de las frecuencias y velocidades, construiremos las rosas de los vientos, representadas en la Figura 37.

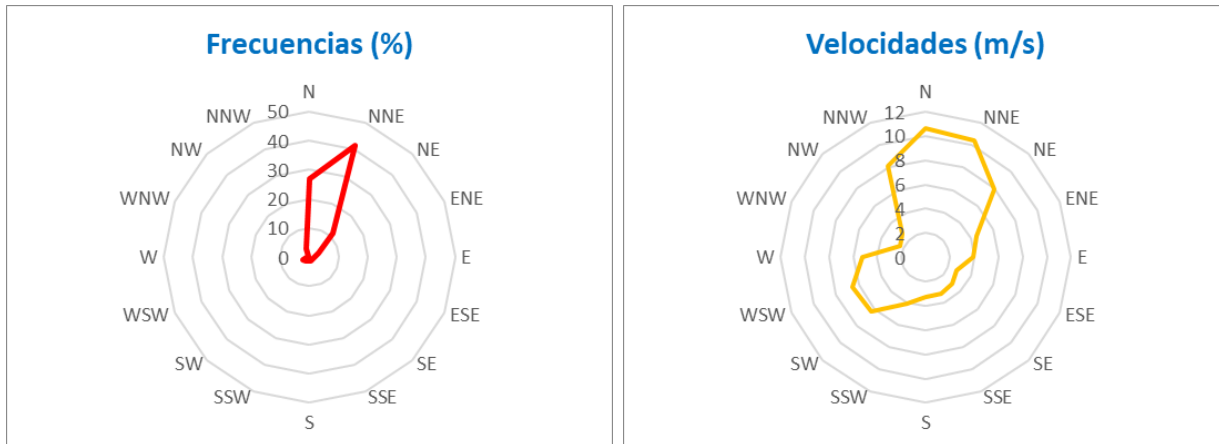


Figura 37: Rosa de los vientos de las frecuencias (%) y las velocidades (m/s) a 80 m en el más punto cercano al emplazamiento del aerogenerador (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de IDAE)

Realizando un promedio de las variables K y C de Weibull, y las ecuaciones expresadas en el Anexo IV, obtenemos la siguiente distribución (Figura 38). En ella podemos apreciar que **la velocidad del viento se situará normalmente entre los 2 y 7 m/s, pero sobre todo entre 4 y 5.**

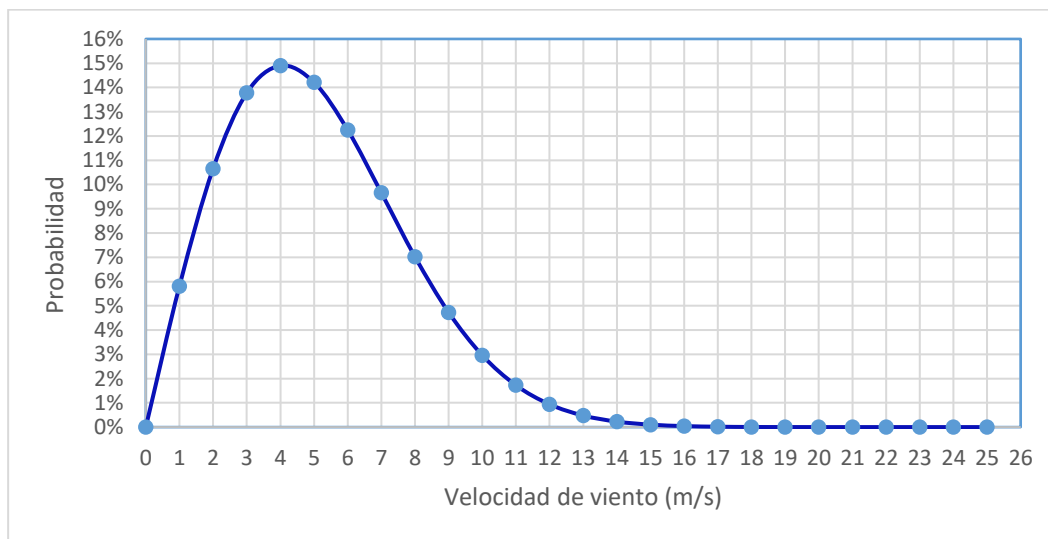


Figura 38: Gráfica de distribución de velocidades obtenida mediante Weibull (Fuente: Elaboración propia)

8.8.2. Selección del aerogenerador para la potencia prevista

Para la selección del aerogenerador, se empleará la herramienta online ofrecida por el ITC, que trabajará con el recurso eólico del emplazamiento seleccionado y las curvas de potencia de varios modelos de aerogeneradores. Para estos modelos, se ha hecho un estudio de mercado a partir de los datos ofrecidos por The Wind Power, y finalmente resultaron como disponibles los

reflejados en la Tabla 17. Cabe destacar que, según nuestros cálculos, nuestra EDAM tendrá un consumo energético anual de 4.058.618 kWh, con un consumo de potencia de 514,58 kW.

Fabricante	Modelo	Energía anual (kWh)
DEWIND	D4 46/600kW	2276718,9
DEWIND	D6 62/1250kW	4376492,8
DEWIND	D8 – 80m	7000538,6
ENERCON	E-44	2973308,8
ENERCON	E-48	3149602,9
ENERCON	E-82	8522381,9
ENERCON	E70 - 2300	7753973,6
GAMESA	EOLICA G80/2000kW	7572812,7
GAMESA	G87/2000 kW	8320117,1
GAMESA	G90	8561623,7
NORDEX	N90/2500 LS	9597220,4
VESTAS	V90/2000	8568626,3

Tabla 17: Lista de modelos de aerogeneradores disponibles (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de www.thewindpower.net y de la aplicación online del ITC)

Analizando todos estos modelos con la aplicación del ITC y obteniendo su producción de energía anual (Tabla 17), seleccionamos el modelo D6 62/1250kW de la empresa DeWind. Se han tenido en cuenta la energía anual producida, el exceso o déficit que este supone frente al consumo de la EDAM, y el factor de carga del aerogenerador. **Así, se abastecerá energéticamente a nuestra EDAM con un aerogenerador D6 62/1250kW de la empresa DeWind, con una producción energética anual de 4.376.492,8 kWh. De esta producción, quedará un exceso de 317.874,8 kWh (un 7,3% del total), el cual se tratará en el apartado de gestión de la energía eólica.** El modelo mencionado se puede observar en la Figura 39.



Figura 39: Aerogenerador D6 62/1250kW de DeWind (Fuente: www.en.wind-turbine-models.com)

8.9. Aprovechamiento de energía

Para no desperdiciar el exceso de energía eléctrica que producirá el aerogenerador seleccionado, se han propuesto, a modo indicativo, varias técnicas que se pueden emplear para el aprovechamiento de la energía generada. Además, también se propondrán otras técnicas para hacer frente a los periodos en los que el aerogenerador no genere la energía necesaria para el proceso de desalación. Por otro lado, también se han mencionado algunas formas de sacar algo de provecho de la salmuera antes de verterla al mar. Es recomendable consultar el Anexo V.

La técnica más destacada de todas las estudiadas para copar con el exceso de energía, es la **generación de hidrógeno**. Por un lado, se producirá hidrógeno a partir del exceso energético mediante un electrolizador, que separará electrolíticamente el hidrógeno del oxígeno en las moléculas del agua. Así, el hidrógeno se almacenará en un depósito adecuado. Posteriormente, en aquellos momentos en los que el aerogenerador presente un déficit de generación de energía frente a lo que consume la EDAM, se podrá extraer energía eléctrica del hidrógeno almacenado. Esto se realizará mediante pilas de combustión de hidrógeno, que transformarán la energía química de la reacción de hidrógeno con oxígeno en energía eléctrica, agua y calor.

También existen otras medidas que se podrían tener en cuenta, como son:

- **Vertido a la red eléctrica:** no es muy favorable, ya que está sujeto a la demanda que exista en el momento del vertido. Si no es suficiente, no será posible verter electricidad en la red. También hay que estudiar si el precio al que se nos compraría el kWh amortizaría el coste de las instalaciones destinadas al vertido de electricidad a la red.
- **Bombeo reversible:** se transforma la energía eléctrica en energía potencial del agua, al elevarla de un embalse a otro en una cota de altura superior, mediante una bomba. Una vez que se precise de energía eléctrica, se deja caer el agua al embalse de origen a través de una turbina, que generará energía eléctrica.
- **Compresión de aire:** mediante compresores. Una vez que se necesita energía eléctrica, se hace pasar el aire comprimido por un sistema de turbinas, que generarán energía eléctrica.
- **Desalinearse el aerogenerador:** es la medida más simple y que no requerirá de costes extra para ser llevada a cabo. Se trata de cambiar la orientación de la góndola y las palas del aerogenerador, de tal manera que el viento incida con menor fuerza y genere menos potencia.

Con la generación de hidrógeno, el bombeo reversible y la compresión de aire, se puede suplir el déficit de energía que se pueda dar en algunas ocasiones. Además de estas opciones, también se proponen otras dos más, que son: el consumo a partir de la red eléctrica (habría que pagar el kWh que consumamos a la distribuidora eléctrica) y la generación con un sistema fotovoltaico, como apoyo para el aerogenerador.

En cuanto a la **salmuera**, esta se puede reutilizar de varias formas antes de ser vertida al mar: ser empleada como medio de transmisión de calor en sistemas de refrigeración, deshacer nieve en carreteras heladas, o ser empleada en la fabricación de zumos concentrados mediante un proceso de osmosis entre la salmuera y el zumo, reduciendo así el contenido de sal de la salmuera.

9. Resultados

En este apartado se detallará la configuración final que se ha seleccionado para nuestra EDAM, que funcionará con el proceso de OI, que consumirá $3,53 \text{ kWh/m}^3$ y que será abastecido con un aerogenerador de 1250 kW de potencia nominal. La planta desaladora tendrá una capacidad de producción de $3500 \text{ m}^3/\text{día}$, los cuales se destinarán al abastecimiento de consumo humano. Las instalaciones están emplazadas en el Polígono Industrial de Arinaga y alrededores.

9.1. Ubicación de las instalaciones y poblaciones a abastecer

La EDAM estará situada en la parcela que se refleja en la Figura 40, perteneciente al Polígono Industrial de Arinaga, en la isla de Gran Canaria. Este lugar se ha seleccionado como idóneo ya que cumple todos los requisitos impuestos por el proyecto, tales como la alta disponibilidad de recurso eólico y la cercanía al mar. En la misma se observa también el emplazamiento de los pozos de captación, justo por debajo de dicha parcela, por fuera del polígono. El aerogenerador se situará en la parcela contigua al polígono, lo más cercana posible al mar, pero alejada de edificios. Por otro lado, el depósito regulador del sistema de distribución se situará por encima de Cruce de Arinaga. Cabe destacar que en la Figura 40 también se podrán apreciar los 3 núcleos poblacionales que serán abastecidos: Cruce, Polígono y Playa de Arinaga.



Figura 40: Ubicación seleccionada para las instalaciones de nuestro proyecto, junto a las poblaciones que se abastecerán (Fuente: Grafcan)

9.2. Finalidad de la EDAM

El agua producto proveniente del proceso de OI de nuestras instalaciones, un total de 3500 m³/día, será destinado a abastecer el consumo de agua potable de las poblaciones de Cruce, Polígono y Playa de Arinaga, señaladas en la Figura 40. Su composición cumplirá con los requisitos establecidos por el RD 140/2003 para aguas destinadas al consumo humano.

9.3. Sistemas de captación y alimentación

La captación de agua de mar se realizará mediante toma cerrada, específicamente con tres pozos de captación. Dos funcionarán de forma continua, mientras que el tercero actuará de pozo de reserva. Tendrán cada uno una profundidad de 20 metros, y se dispondrán en forma de cruz teniendo cada uno una distancia de 20 metros hacia el punto colector.

Se emplearán tres bombas de captación (de las cuales funcionarán dos de manera continua), una para cada pozo, específicamente el modelo Wilo K8.130, con un consumo de 37,8 kW cada una y un rendimiento del 77,2%. Se encargarán de trasvasar el agua desde los pozos de captación hasta la entrada al bastidor de membranas, a través de las tuberías de captación y alimentación.

Dichas tuberías, tres de captación y una de alimentación, serán de PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio). Las de captación (desde los pozos hasta el punto colector) tendrán un diámetro de 250 mm y una longitud de 40 metros, mientras que la de alimentación (desde el punto colector hasta la entrada al bastidor de membranas) será de diámetro 350 mm y longitud 170 metros. Ambos son diámetros comerciales del fabricante Flowtite.

9.4. Pretratamientos

Se realizarán varios pretratamientos en el tramo de alimentación para garantizar una mayor vida útil de las membranas y de los equipos de la EDAM.

- Pretratamiento físico: se emplearán filtros de arena con una boquilla filtrante de 0,5 mm, y filtros de cartucho con un nivel de filtración de 5 micras.
- Pretratamiento químico: se aplicarán correcciones del pH con dosis de HCl, dispersantes y procesos de cloración y de cloración, éste último con bisulfito sódico.

9.5. Núcleo de desalación

Se ha dimensionado teniendo en cuenta la calidad del agua producto y el menor consumo específico posible. Esta parte de la EDAM constará de las siguientes partes:

- **Bastidor de membranas:** se emplearán 7 membranas SWC4 MAX del fabricante Hydranautics por tubo de presión, con un total de 36 de éstos. El proceso será de simple etapa, con una conversión del 45%.
- **Bomba de alta presión (HPP):** se empleará el modelo CA 125-10.2 del fabricante KSB, con un consumo de 372,05 kW y un rendimiento del 78,11%.
- **Recuperador de energía:** se emplearán tres unidades del intercambiador de presión PX-Q300 del fabricante Energy Recovery. Para el bombeo, se empleará la bomba Booster Etaline 150-150-200 del fabricante KSB, con un consumo de 8,76 kW y un rendimiento del 79,37%.

9.6. Sistema de distribución

Para distribuir el agua producto a las poblaciones objetivo, se empleará la bomba CR 150-6 del fabricante Gundfos, con un consumo de 58,17 kW y un rendimiento del 71,9%. El agua producto fluirá a través de una tubería de PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio), para ser transportada desde la salida de la EDAM hacia el depósito regulador, situado en una parcela justo por encima de la población de Cruce de Arinaga. Se ha elegido este emplazamiento para garantizar el trasvase por gravedad a los núcleos poblacionales objetos de abastecimiento. La tubería de distribución tendrá un diámetro comercial de 250 mm, del fabricante Flowtite, y una longitud de 5500 metros, mientras que el depósito regulador tendrá un volumen de 500 m³.

9.7. Postratamientos

Serán necesarios para garantizar los requisitos impuestos por el RD 140/2003 para agua destinada al consumo humano, y se realizarán en el tramo de distribución de nuestras instalaciones. El principal postratamiento que se empleará será la aplicación de varios productos químicos, tales como el NaOH y el Na₂CO₃. Además, se añadirá también un inhibidor de corrosión. También se pueden añadir otros postratamientos, como la mezcla con otras aguas, la descarbonatación o la desgasificación.

9.8. Rechazo de salmuera

La salmuera se transportará hacia un emisario submarino situado a 20 metros de profundidad y a una distancia de 2 km de la costa cercana a la EDAM. La tubería de rechazo tendrá un diámetro comercial de 250 mm, del fabricante Flowtite, y una longitud de 2500 metros. También será de PRFV, al igual que todas las tuberías de nuestras instalaciones. Para el trasvase de salmuera, no hará falta sistema de bombeo, ya que el trasvase se garantizará por la acción de la gravedad.

9.9. Abastecimiento con energía eólica

Se abastecerá el consumo energético de la EDAM mediante un aerogenerador, para el cual se ha seleccionado el modelo D6 62/1250kW de la empresa DeWind. Dicho aerogenerador generará 4.376.492,8 kWh/año, de los cuales habrá un exceso del 7,3% tras suplir el consumo energético de 4.058.618 kWh/año de la EDAM, que tiene un consumo de potencia de 514,58 kW.

9.10. Aprovechamiento de energía

En principio, no se ha definido ningún sistema en concreto para el aprovechamiento de la energía eólica, pero sí se han propuesto varias técnicas que se podrían implantar en este proyecto y otros del mismo tipo destinadas a tal fin.

Para tratar con el exceso de energía que puede generar el aerogenerador, se han propuesto:

- La generación de hidrógeno, mediante electrolizadores y pilas de combustible.
- El vertido del exceso a la red eléctrica.
- El bombeo reversible.
- La compresión de aire.
- Desalinear el aerogenerador.

Para aquellos casos en los que el aerogenerador no genere la suficiente potencia, se puede emplear la energía almacenada con algunos de los métodos mencionados anteriormente, excepto el de desalineamiento del aerogenerador, en el cual no se almacena la energía, sino que se disipa. Aparte de éstos, también se puede optar por consumir energía eléctrica a partir de la red o emplear un sistema fotovoltaico que sirva de apoyo al sistema eólico.

Por otro lado, también se puede aprovechar de varias formas la salmuera antes de que ésta se vierta al mar. Un ejemplo podría ser la fabricación de zumos concentrados mediante un proceso de osmosis entre la salmuera y el zumo.

10. Conclusiones

Al igual que se comentó en el Objeto de este documento, este proyecto tenía el objetivo de dimensionar un sistema de desalación de agua de mar por osmosis inversa, cuyo consumo energético es abastecido con energía eólica. De este estudio se extraen conclusiones tanto en el ámbito académico como en el técnico, relacionado con las tecnologías mencionadas anteriormente.

Por un lado, en el ámbito académico, este proyecto ha significado un acercamiento entre la formación académica recibida durante el Grado en Ingeniería Mecánica y el mundo laboral relacionado con la profesión del ingeniero técnico. Se ha aplicado una gran cantidad de competencias y conocimientos adquiridos durante la formación, a pesar de no ser un proyecto ejecutable y sin la disposición de medios materiales ni tiempo que hubiesen permitido realizar un estudio más profundo. Destacan, entre todas las competencias y conocimientos desarrollados, aquellos que se imparten en las asignaturas de “Ingeniería Fluidomecánica”, “Instalaciones y Máquinas Hidráulicas” y “Oficina Técnica y Proyectos”.

Por otro lado, en cuanto a la parte técnica del proyecto, éste se ha realizado con el objetivo de afrontar los problemas de eficiencia energética y de impacto medioambiental que están presentes hoy en día a nivel mundial en cuanto a la obtención de agua potable. Los recursos hídricos de las Islas Canarias han sufrido un grave deterioro a lo largo de las décadas, tratando de suplir el consumo de agua de la población y del turismo, ambos en un crecimiento sin precedentes. Debido a ello, la tecnología de la desalación de agua de mar ha adquirido cierto protagonismo en el desarrollo económico de la región, hasta el punto de ser responsable de una gran parte del consumo energético total del archipiélago canario, normalmente a partir de combustibles fósiles que tienen un impacto negativo sobre el medio ambiente. Así, la combinación de la desalación por osmosis inversa con las energías renovables, en este caso la eólica, supone un avance hacia la sostenibilidad y la reducción de la dependencia hacia los combustibles fósiles.

Además del abastecimiento con energía eólica que recibirá esta planta desaladora de 3500 m³/día, con un consumo de 3,53 kWh para cada uno de esos metros cúbicos desalados, también destacan los sistemas de aprovechamiento de energía propuestos, como por ejemplo la producción de hidrógeno. La aplicación de este tipo de medidas aumentará la sostenibilidad de este tipo de instalaciones, aunque todavía se encuentran en vías de investigación y desarrollo.

Aparte de estos sistemas empleados para tener unas instalaciones más eficientes, también cabe destacar el continuo desarrollo que experimentará la tecnología de desalación en las próximas décadas. Éste se realizará buscando una producción de agua apta para consumo de una forma cada vez más eficiente, reduciendo así los consumos específicos de los equipos con la incorporación de nuevas tecnologías, y la mejora del proceso de osmosis inversa realizando modificaciones en las membranas.

Como conclusión, combinando las tecnologías de osmosis inversa y energía eólica, se logrará obtener agua potable para consumo humano sin suponer un nuevo punto de demanda energética para la red, ya que su funcionamiento se basa en el autoabastecimiento. Cabe destacar

que el viento y el agua de mar son recursos prácticamente ilimitados y que se encuentran en gran parte de todas las regiones del planeta, lo cual supone un abanico infinito de ventajas para proyectos de este tipo. El desarrollo de este tipo de sistemas a lo largo de las siguientes décadas y su optimización, en cuanto al consumo energético, tendrán un papel importante en la resolución de los problemas que afectan actualmente a la situación del medio ambiente y la escasez de recursos hídricos a nivel mundial, los cuales necesitan ser resueltos debido al crecimiento continuo de la población del planeta.

10.1. Conclusions

As commented in the Abstract of this document, this project has the main objective of sizing a seawater desalination system using inverse osmosis, whose energetic consumption will be supplied with wind energy. From this study, we can extract conclusions from both the academic and the technical perspectives, referring to the technologies previously mentioned.

On one side, in the academic environment, this project has signified a clear relation between the academic preparation received during the Mechanical Engineering Degree and the real world, in which the technical engineer develops him or herself. A huge quantity of competences and knowledge acquired during the degree have been applied, despite this not being an executable project and without the disposition of the amount of time and materials necessary for it to be a more profound study. Within all the knowledge and competences developed, the ones which stand out are those taught at the subjects of “Ingeniería Fluidomecánica”, “Instalaciones y Máquinas Hidráulicas” and “Oficina Técnica y Proyectos”.

On the other side, referring to the technical part of the project, it has been developed with the objective of facing the energetic efficiency and environment issues which are present nowadays on a global scale. The Canary Islands hydric resources have suffered a big impact during the last decades, trying to account for the water consumption of both the local habitants and tourism, which have experimented an increase without precedents. Due to this situation, the desalination technology of seawater has acquired a certain protagonism during the economical development of the region, up to the point of it being responsible for a considerable amount of the energetic consumption from the group of canarian islands. This consumption is usually supplied with fossil fuels, which have a negative impact on the environment. As so, the combination of desalination through inverse osmosis with renewable energies, in this case wind energy, involves a step forward towards environment sostenibility and the reduction of fossil fuels dependence.

Apart from the supply of wind energy our desalination plant of 3500 m³ per day will receive, with a 3,53 kWh energetic consumption for each of those desalinated water cubic meters, the proposed systems of energy reutilization stand out, such as hydrogen generation. The

application of these type of technologies will increase the sostenibility of these kind of installations, although they are still in the early stages of investigation and development.

It is also important to take into account the continuous development that the desalination technology will experiment during the next decades. This development will be done in search of a more efficient production of drinking water, by reducing the specific consumption of these systems with the incorporation of new technologies, and the improvement of the inverse osmosis process by making adjustments on the membranes.

As a conclusion, by combining the technologies of inverse osmosis and wind energy, it will be possible to obtain drinking water for human consumption without this involving more energy demand towards the electrical network, as its functioning will be based on self-supply. It is important to highlight that wind and seawater are both, in practical terms, infinite resources and present around the major part of our planets regions. This will mean they have an infinite number of advantages for this type of projects. The development of these systems and their optimization during the next decades, in terms of energetic consumption, will have an important role in the resolution of the problems which actually affect the environment and hydric resources around the world, which are needed to be solved as the planets population keeps growing continuously.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO I

**INTRODUCCIÓN TEÓRICA A LA
DESALACIÓN POR OSMOSIS INVERSA**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO
CON ENERGÍA EÓLICA PARA ABASTECIMIENTO HUMANO
EN GRAN CANARIA**

AUTOR: Marvin Jozef González Van leeuwe

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE - ANEXO I

1. Generalidades de la desalación de agua de mar.....	1
2. Funcionamiento de la osmosis inversa	3
2.1. Ecuaciones fundamentales empleadas en la osmosis inversa.....	4
3. Parámetros característicos de la osmosis inversa	7
3.1. Salinidad y conductividad	7
3.2. Composición química.....	8
3.3. Gases disueltos.....	9
3.4. Temperatura	9
3.5. pH	10
3.6. Alcalinidad	10
3.7. Dureza.....	10
4. Instalaciones desaladoras de osmosis inversa	11
4.1. Captación	11
4.1.1. Captación cerrada (pozos).....	11
4.1.2. Captación abierta.....	13
4.2. Pretratamiento.....	14
4.2.1. Pretratamiento físico	14
4.2.2. Pretratamiento químico	15
4.3. Postratamiento.....	16
4.4. Núcleo de desalación	17
4.4.1. Bastidor de membranas	17
4.4.2. Colocación de las membranas	20
4.4.3. Parámetros técnicos de las membranas	21

4.4.4. Recuperador de energía.....	21
4.5. Bombas	22
4.6. Depósito regulador	23
4.7. Otros elementos y equipos de las instalaciones desaladoras	23

Índice de figuras – Anexo I

Figura 1: Esquema del proceso de destilación multiefecto (MSD) (Fuente: www.desalinizaciondelagua.files.wordpress.com)	2
Figura 2: Esquema del proceso de osmosis directa (Fuente: www.aquasalud.com).....	3
Figura 3: Esquema del proceso de osmosis inversa (Fuente: www.aquasalud.com).....	4
Figura 4: Esquema de una captación cerrada mediante pozos, con una bomba sumergible (Fuente: www.civilgeeks.com)	12
Figura 5: Cántara de captación (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))	12
Figura 6: Cántara de captación con sondeos verticales (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))	13
Figura 7: Captación abierta mediante emisario submarino (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))	14
Figura 8: Interior de un tubo con filtros de cartuchos (Fuente: www.putschner.com)	15
Figura 9: Escala del pH (Fuente: www.experimentoscientificos.es)	16
Figura 10: Disposición de una membrana de fibra hueca (Fuente: www.acsmedioambiente.com)	17
Figura 11: Disposición de una membrana tubular (Fuente: www.acsmedioambiente.com)	18
Figura 12: Disposición de una membrana de arrollamiento en espiral (Fuente: www.acsmedioambiente.com)	18
Figura 13: Perspectiva de varios bastidores de membranas (Fuente: www.iagua.es).....	19
Figura 14: Corte transversal de un tubo de presión con 3 membranas de osmosis inversa (Fuente: www.lenntech.es).....	19
Figura 15: Intercambiador de presión incorporado al núcleo de desalación (Fuente: www.energyrecovery.com)	22
Figura 16: Bomba sumergible para la captación (Fuente: Grundfos Webcaps)	22

Índice de tablas – Anexo I

Tabla 1: Espectro de salinidades (TDS) para el agua (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000)).....	7
---	---

1. Generalidades de la desalación de agua de mar

En el desarrollo humano, el agua juega un gran papel, al depender de ella la agricultura, la industria y la misma supervivencia del ser humano. Históricamente, los países con mayores recursos hídricos siempre han sido aquellos que tienen también más recursos económicos. Actualmente, esta regla no se cumple, al existir tecnologías tales como la desalación de agua, lo cual da lugar a un desarrollo más veloz e igualitario.

La desalación de aguas es un recurso esencial, al pertenecer el 97% de la superficie de agua presente en la Tierra a aguas de mar o de océanos. Algunos ejemplos de aplicaciones de la desalación de aguas de mar o salobres son el abastecimiento humano o la producción de aguas de gran calidad para ser empleadas en las maquinarias de ciertas industrias.

Hay varios procesos distintos con los cuales se puede desalar el agua. Para nuestro estudio se ha escogido la osmosis inversa, pero, por motivos informativos, en este apartado se explicarán los procesos principales que se emplean actualmente. Estos son:

- Osmosis inversa (RO): es el método más empleado actualmente. Una membrana permite que pase el agua a mayor velocidad que la sal, separándolas. No hay un rechazo absoluto. A lo largo de este Anexo se explicará más a fondo este proceso, así como los equipos y parámetros característicos. En principio, la osmosis inversa no tiene limitaciones, pero el consumo específico depende mucho de la cantidad de sal en el agua. Su grado de separación en micras es menor de 0,04.
- Electrodialisis: es lo contrario de la osmosis inversa. Las membranas se caracterizan por poseer una estructura iónica que deja pasar la sal, mientras que el agua se queda atrás. Necesita menores tratamientos químicos que otros métodos, pero su coste de instalación es superior al de la osmosis inversa. Sin embargo, el agua producto es de peor calidad al tener un grado de separación en micras menor de 0,03.
- Destilación multiefecto (MED): se trata de un proceso de evaporación y condensación, en varias etapas, en condiciones de vacío. Funciona con el vapor proveniente de una planta energética, el cual se encargará de calentar el fluido a desalar para evaporarlo. Esto hará que se separe la sal del agua. Posteriormente, se condensará el vapor para así obtener un agua con muy bajos contenidos de sal. Produce un agua de calidad casi pura, pero tiene una eficiencia muy baja y precisa de extensiones amplias de terreno.

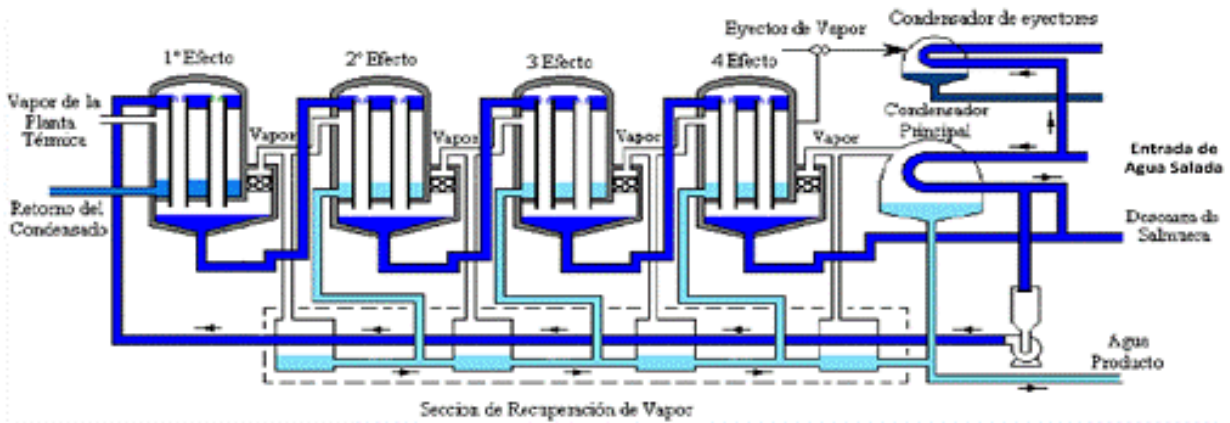


Figura 1: Esquema del proceso de destilación multiefecto (MSD) (Fuente: www.desalinizaciondelagua.files.wordpress.com)

- **Destilación súbita multietapa (MSF):** el agua de mar se satura y se mete en un tanque a baja presión para que evapore parte del agua. Así se consigue separar el agua de la sal. El consumo específico es muy elevado en comparación a otros procesos de desalación, pero es ideal para tratar agua de alta salinidad y contaminación y aun así obtener un agua producto de gran calidad, al contrario de otros métodos de desalación. Es ampliamente utilizado en Oriente Medio, donde los precios energéticos son relativamente bajos. Produce un agua de calidad casi pura, pero tiene una eficiencia muy baja y precisa de extensiones amplias de terreno.
- **Compresión de vapor (CV):** se evapora el agua de mar mediante el aumento de su temperatura con un compresor. Posteriormente, se vuelve a condensar en un intercambiador de calor, de donde se extrae el agua producto desalada. El agua de mar de alimentación se hace pasar por otro intercambiador de calor en el cual absorbe el calor del agua producto desalada, ahorrándose así un porcentaje significativo de energía calorífica.

Conocidos ya los métodos más empleados mundialmente para desalar agua en la actualidad, analicemos la escogida para nuestra EDAM: la osmosis inversa. Cabe mencionar otros tipos de procesos no tan conocidos o empleados, como la destilación solar, la congelación, la termocompresión de vapor o el intercambio iónico.

2. Funcionamiento de la osmosis inversa

Para poder entender este fenómeno, primero debemos comprender el funcionamiento de la osmosis directa, el cual se produce de forma espontánea y natural. Para que suceda, debe de haber dos fluidos de concentraciones diferentes en contacto, pero separados entre sí por una membrana semipermeable.

La membrana tendrá la función de dejar pasar un porcentaje del total de moléculas de disolvente, y no permitir que pasen las moléculas de soluto.

En nuestro caso, tendríamos agua de mar. A un lado de la membrana semipermeable se situaría el agua de mar con menos sal de ambos lados, es decir, la menos concentrada. Desde ella, el agua pasará al otro lado de la membrana, dejando atrás la sal, para intentar diluir el fluido de la izquierda, el más concentrado. Una vez que se genera una presión debido a que a la izquierda habrá más cantidad de fluido que a la derecha (mayor columna de agua), se detiene el paso de agua de un lado al otro. Esta presión es conocida como presión osmótica, que tendrá un papel muy importante en el proceso de osmosis inversa.

En la osmosis inversa, se aplicará presión sobre el lado en el que se encuentre el fluido más concentrado. Esta presión será igual o mayor que la presión osmótica del fluido. Esto tiene como resultado la circulación de agua en sentido inverso que en la osmosis directa. Es decir, el agua circularía hacia el lado en donde está el fluido menos concentrado (solución diluida), reduciendo su concentración de sal. El fenómeno de la osmosis inversa es ampliamente utilizada en varias aplicaciones como por ejemplo, la obtención de agua potable.

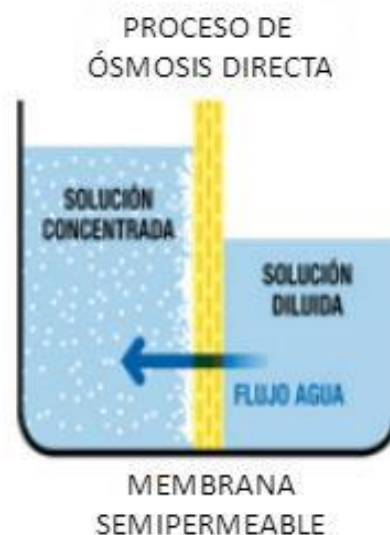


Figura 2: Esquema del proceso de osmosis directa (Fuente: www.aquasalud.com)

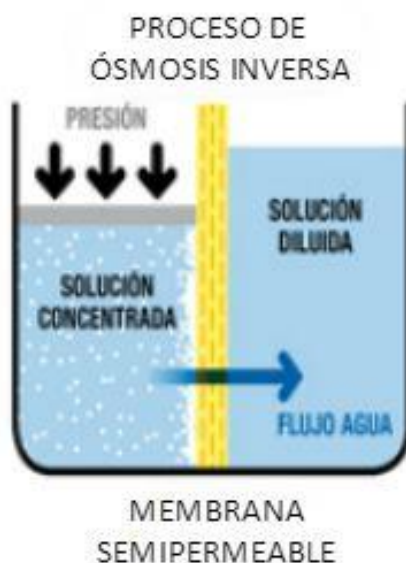


Figura 3: Esquema del proceso de osmosis inversa (Fuente: www.aquasalud.com)

La osmosis inversa se caracteriza por ser un proceso de difusión, realizada a través de la membrana semipermeable. Ésta deja pasar a las moléculas del agua sin problemas, mientras que las moléculas de las sales y otros sólidos disueltos en el agua no son capaces de atravesar la membrana, quedándose atrás.

En nuestra EDAM, el agua de mar entrará, una vez tratada correctamente, al bastidor de membranas. En ellas se realizará la osmosis inversa. El flujo de agua de mar se separará en dos. Uno será el agua producto o permeado, que será el flujo diluido y con una concentración de sales muy baja. Es el agua que ha logrado atravesar las membranas. Por otro lado, saldrá el rechazo o salmuera, que será el flujo concentrado. Contendrá las sales que no han logrado atravesar las membranas. Las cantidades de agua que salgan por un lado u otro dependerán del porcentaje de conversión que tenga el núcleo de desalación de la planta.

2.1. Ecuaciones fundamentales empleadas en la osmosis inversa

Para su comprensión, estableceremos los flujos de agua presentes en el proceso de osmosis inversa. Estos son el flujo de alimentación (el agua que se quiere desalar), expresa como Q_A . Se encuentra a un lado de la membrana. Al otro lado de la membrana de osmosis inversa, tendremos dos flujos. Uno será el flujo de agua producto (el agua que se ha conseguido desalar), que denotaremos como Q_P ; mientras que el otro flujo será el de agua de rechazo o salmuera (agua que contiene las sales rechazadas por la membrana de osmosis inversa), denotado como Q_R . Una relación que siempre se cumplirá es la siguiente:

$$Q_A = Q_R + Q_P$$

Ecuación 1: Flujos presentes en los procesos de desalación por osmosis inversa

Las concentraciones de cada flujo, denotadas por C , se relacionan de la siguiente manera:

$$C_A * Q_A = C_R * Q_R + C_P * Q_P$$

Ecuación 2: Relación de concentraciones y flujos en la osmosis inversa

Las dos ecuaciones más importantes en la osmosis inversa, son las del flujo de agua y la del transporte de sales.

$$F_A = A * (P_M - \Delta\Phi_M)$$

Ecuación 3: Ecuación del flujo de agua

Donde F_A es la cantidad de agua que atraviesa la membrana (lmh), A es el coeficiente de transporte de dicha membrana, P_M es la presión diferencial de la membrana y $\Delta\Phi_M$ es el diferencial de la presión osmótica en ambos lados de la membrana.

$$F_S = K_S * (C_A - C_P)$$

Ecuación 4: Transporte de sales

Donde F_S es la cantidad de sales que atraviesa la membrana (lmh), K_S es el coeficiente de transporte de sales de dicha membrana, C_A y C_P es la concentración de sales en el agua de alimentación y en el agua producto, respectivamente.

Otras ecuaciones importantes en la osmosis inversa y que nos proporcionan parámetros importantes en el diseño de la instalación, son las del rechazo de sales, paso de sales, recuperación, concentración del rechazo y concentración del producto.

$$RS(\%) = \left(1 - \frac{C_P}{C_A}\right) * 100$$

Ecuación 5: Ecuación del rechazo de sales

$$PS(\%) = \left(\frac{C_P}{C_A}\right) * 100$$

Ecuación 6: Ecuación del paso de sales

$$C_R(\%) = RS * (C_A / (1 - R))$$

Ecuación 7: Ecuación de la concentración del rechazo

$$C_p(\%) = ((1 - RS) * (C_A + C_R))/2$$

Ecuación 8: Ecuación de la concentración del producto

$$R(\%) = \left(\frac{F_P}{F_A}\right) * 100$$

Ecuación 6: Ecuación de la recuperación

3. Parámetros característicos de la osmosis inversa

Los parámetros más importantes en el agua a desalar son el índice de pH, la dureza, el anhídrico carbónico libre y la conductividad eléctrica (salinidad). En este apartado se analizarán éstos y algunos más que también tienen cierta importancia a la hora de diseñar una planta desaladora por osmosis inversa.

3.1. Salinidad y conductividad

La salinidad es el contenido de sales que tiene una porción de agua. Depende de la procedencia de la misma. Por ejemplo, el agua de mar, por lo general, contiene 40.000 ppm de sales, mientras que las aguas salobres pueden tener unas 4.000 ppm. Esto influye en gran medida sobre el diseño del proceso de desalación y sobre la aplicación que tendrá el agua producto.

Según la salinidad, el agua se clasifica en varios tipos, denominado “Espectro de Salinidades TDS”. La salinidad se expresa como residuo seco a 105 °C o TDS. Se suele medir en mg/L o en ppm (partes por millón).

Tipo de agua	Salinidad aproximada (ppm)
Salmuera	300.000
Agua de mar	30.000
Agua salobre	3.000
Agua potable	300
Agua industrial	30
Agua desionizada	3
Agua pura de calderas	0,3
Agua ultrapura	0,03

Tabla 1: Espectro de salinidades (TDS) para el agua (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))

En plantas de osmosis inversa se suelen tratar las aguas de mar y aguas salobres. Sin embargo, hay casos en los que se tratan también en los que se tratan agua potables o industriales.

En las Islas Canarias la salinidad del agua de mar es de unas 38.000 ppm.

Debido a la dificultad de medir la salinidad del agua de forma exacta, se suele optar por medir la conductividad que ésta tiene. La conductividad es la facilidad con la que el agua de muestra permite la conducción de corriente eléctrica. Cuantos más elementos disueltos tenga un agua, más conductora será, por lo general.

La conductividad del agua también depende en gran manera de su temperatura. Al aumentar una, aumenta también la otra. Normalmente, la conductividad se mide a 20 °C.

El aumento de la conductividad del agua hace que también aumente su poder de corrosión, el cual es un efecto indeseable a la hora de desalar agua ya que podría producir daños severos en las instalaciones y los equipos de osmosis inversa.

3.2. Composición química

La composición química tiene una gran influencia sobre la salinidad del agua, ya que indica la cantidad de los elementos causantes de conductividad que se encuentran en ella. También tiene gran importancia cuando la aplicación es el consumo humano (el caso de nuestra EDAM), ya que hay componentes en el agua que pueden resultar nocivos a partir de ciertas cantidades y que tendrán que ser eliminados si se quiere destinar el agua producto al abastecimiento de humanos.

Los elementos más importantes a tener en cuenta a la hora de desalar agua de mar o aguas salobres, son los siguientes:

- Cloro: es el elemento más abundante en agua de mar. Las concentraciones medias de Cl en agua de mar son de unos 20.000 mg/L. Para la mayor parte de usos, una concentración de Cl de unas 150 ppm suele ser adecuada, aunque para el consumo humano debe ser más bajo.
- Sodio: metal alcalino que se encuentra frecuentemente en la composición química de aguas de mar o salobres, debido a que siempre es soluble. Debido a ello, no precipitará sobre las membranas de osmosis inversa, lo cual es un aspecto positivo. En el agua de mar se encuentra en torno a los 10.000 mg/L. Se encuentra en el agua en forma de carbonato, bicarbonato o cloruro sódico.
- Magnesio y Calcio: responsables en gran medida de las incrustaciones que se producen cuando el agua experimenta cambios de pH, temperatura y presión. Forman parte de numerosas sales. Pueden precipitar sobre las membranas de los núcleos de desalación por osmosis inversa, lo cual es un fenómeno indeseable. El Sodio tiene límites establecidos para el consumo humano, mientras que el Calcio, en principio, no.
- Sulfatos: los más frecuentes son el sulfato sódico y el sulfato magnésico. En agua de mar sus concentraciones pueden llegar a unos 2.000 mg/L. Su presencia en aguas de consumo humano está regulada, ya que pueden provocar problemas intestinales. También pueden precipitar sobre las membranas de osmosis inversa.
- Carbonatos y bicarbonatos: también pueden precipitar sobre las membranas de osmosis inversa y pueden elevar el pH hasta 10. Un efecto conocido como “ion común” debe ser tenido en cuenta en estos procesos, ya que se trata del cambio de solubilidad de la sal.

- Nitratos: un alto índice de éstos indica la polución del agua a desalar, pudiendo ser la primera pista de la presencia de bacterias nocivas para el ser humano, sobre todo niños, en los cuales puede provocar cianosis (coloración azul de la piel y mucosas debido a una oxigenación de la sangre). Las concentraciones de nitratos deben ser menores de 45 ppm.
- Hierro: su concentración debe de ser, como mínimo y según qué aplicación, menor de 0,5 ppm. Se puede presentar como ion ferroso o ion férrico. Pueden dar lugar al crecimiento de algunas bacterias indeseables, como la crenothrix, que provocan un sabor desagradable al consumirse el agua en el que se encuentran.
- Manganeso: comportamiento químico similar al hierro. El mejor tratamiento para ambos es el empleo de bombas sumergibles en la captación para evitar su contacto con el aire, y, con ello, su oxidación.
- Sílice: colabora en las incrustaciones en algunas aguas. Su solubilidad está altamente relacionada con la temperatura del agua.
- Flúor: su rechazo por las membranas depende de la composición del agua misma. Tiene un alto riesgo de precipitación al ser poco soluble.

3.3. Gases disueltos

Hay ocasiones en las que pueden presentarse gases disueltos en el agua a desalar. Lo más comunes son oxígeno, dióxido de carbono, nitrógeno, anhídrido sulfuroso, sulfhídrico y amonio. El oxígeno disuelto es un buen indicador de la calidad sanitaria que tiene el agua en cuestión, ya que acelera la corrosión del hierro, acero, etc. También favorece la formación de bacterias que producen un desgaste de las membranas de osmosis inversa.

3.4. Temperatura

Varía mucho según la zona de captación del agua a desalar y del tipo al que pertenece ésta. La temperatura tiene gran influencia sobre el funcionamiento de las membranas de osmosis inversa.

La solubilidad de algunas sales presentes en el agua de mar puede aumentar con la temperatura, teniendo así más riesgos de precipitación sobre las membranas. La temperatura también influye sobre la viscosidad, parámetro importante para las membranas y bombas. Además, una temperatura alta equivale a una mayor facilidad de presencia de actividad biológica, muy perjudicial para las membranas de osmosis inversa.

3.5. pH

Viene determinado en gran parte por la cantidad de sales disueltas en el agua. Tiene una gran influencia sobre la precipitación de los carbonatos, ya que determina su solubilidad. Por otro lado, limita el empleo de membranas de celulosa, que precisan de un agua con pH 5. Además, la normativa actual establece que el agua para consumo humano debe de tener un índice de pH entre 6,5 y 9,5.

3.6. Alcalinidad

Determina en qué medida el agua es capaz de neutralizar un ácido.

3.7. Dureza

Puede ser carbonatada o no carbonatada (permanente). La primera es causada por los carbonatos, y desaparece al entrar el agua en ebullición. La segunda es causada por cloruros, nitratos y sulfatos de Mg o Ca.

4. Instalaciones desaladoras de osmosis inversa

En una planta desaladora de osmosis inversa se pueden diferenciar 6 fases principales:

- Captación y alimentación: se recoge y distribuye el agua de mar o salobre a desalar.
- Pretratamiento: se realizan pretratamientos físicos y químicos sobre el agua proveniente de la captación para evitar efectos indeseables sobre las membranas de osmosis inversa.
- Postratamiento: se realiza sobre el agua producto desalada, según la aplicación que tenga esta.
- Bastidor de membranas: es el núcleo de desalación. En él se obtienen el agua desalada y la salmuera. También se encuentran varias bombas y el recuperador de energía.
- Distribución: se lleva el agua producto ya tratada a un pozo regulador o a instalaciones de la empresa distribuidora.
- Rechazo: se devuelve la salmuera al mar.

Las bombas de toda la instalación se explicarán en un apartado aparte.

4.1. Captación

Se puede realizar de forma abierta o cerrada. La elección de una u otra tendrá una gran influencia sobre la calidad del agua de alimentación.

4.1.1. Captación cerrada (pozos)

Se realiza mediante pozos, con la ayuda de bombas de agua sumergibles. Suele ser la más favorable en cuanto a la calidad del agua, y es la que se debe de establecer siempre como el objetivo siempre que sea posible. Para que funcione bien, el terreno en el que se construya el pozo debe de tener una buena permeabilidad. La captación cerrada mediante pozos presenta varias ventajas en cuanto a la desalación, las cuales son:

- Ausencia de actividad biológica y orgánica.
- Bajo contenido de oxígeno (menor oxidación de los equipos de la EDAM) y baja contaminación.
- Temperaturas con muy pocas variaciones
- La filtración realizada por el terreno alrededor del pozo da lugar a una cierta limpieza del agua, que presentará bajos índices de SDI (colmatación) y de turbidez (NTU).

Por otro lado, la captación mediante pozos presenta ciertos inconvenientes. Se puede llegar a tener algunos elementos secundarios como hierro, aluminio, etc. en cantidades importantes, así como la presencia de pesticidas. Además, presenta una variación en la composición química a lo

largo del año, por lo que los análisis químicos realizados sobre el agua no serán del todo fiables pasado un tiempo.

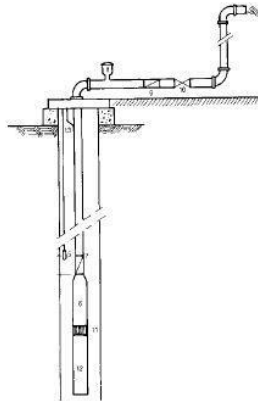


Figura 4: Esquema de una captación cerrada mediante pozos, con una bomba sumergible (Fuente: www.civilgeeks.com)

Las ventajas mencionadas anteriormente implicarán un mayor ahorro en los pretratamientos que se deben realizar sobre el agua de alimentación de la EDAM.

Los pozos aislados presentan cierta dificultad constructiva en zonas costeras, en donde se situará nuestra instalación desaladora. Otro inconveniente de los pozos es la colmatación que estos experimentan a lo largo del tiempo, implicando una menor calidad del agua de captación. Esto se puede solucionar aumentando el pretratamiento o construyendo pozos nuevos y anulando el pozo colmatado.

Se pueden emplear dos variaciones en las tomas cerradas de agua de mar. Estas son:

- **Cántara de captación:** se excava un depósito en el terreno por debajo de la cota de altura del agua de mar que se desea captar. Puede ser circular o rectangular. El agua se extrae mediante bombas horizontales. El caudal disponible es difícil de estimar, ya que la excavación del depósito se realiza en una zona inundada. También hay que tener en cuenta las influencias de las mareas, siendo la bajamar la que marcará el nivel inferior del depósito.

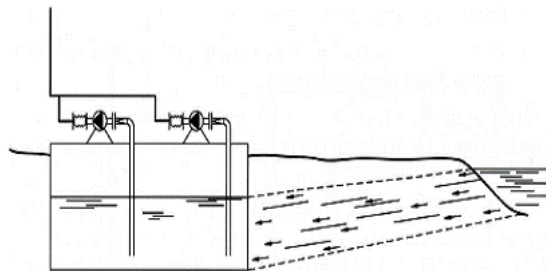


Figura 5: Cántara de captación (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))

- Cántara de captación con sondeos verticales: se emplea cuando la permeabilidad del terreno sea insuficiente para aportar el caudal de captación necesario a la EDAM. En estos casos se realizan perforaciones, denominadas sondeos verticales, en el suelo de la cántara de captación. Con ello, se incrementa el caudal de captación. Suele ocurrir en captaciones de agua de mar que se encuentran alejadas de la costa.

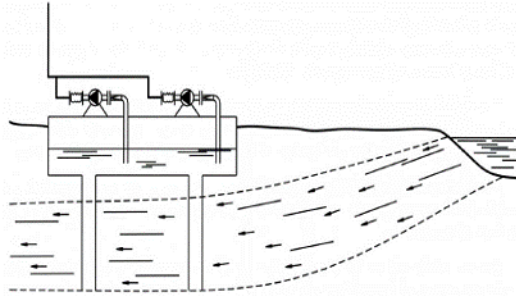


Figura 6: Cántara de captación con sondeos verticales (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))

4.1.2. Captación abierta

Se suele emplear en instalaciones desaladoras de altas producciones, debido a que este tipo de captación aporta mayores caudales. El agua proveniente de este tipo de captación presenta las características opuestas a las que provienen de captaciones cerradas, es decir:

- Alta actividad biológica y orgánica
- Mayor contaminación y oxígeno disuelto
- Altos contenidos de sólidos disueltos
- Variación elevada de temperaturas a lo largo del tiempo
- Composición química homogénea

Se emplean cuando la permeabilidad del terreno no es suficiente como para emplear la captación cerrada. Con ello, se aumentarán los pretratamientos necesarios sobre el agua de alimentación. Hay dos formas de realizar la toma de agua abierta:

- Toma en canal: de menor longitud, y es más superficial. Puede presentar algas y una alta turbidez. Se necesitan filtros a la entrada, formados por rejillas fijas o móviles. Éstas deben ser resistentes a la corrosión.
- Emisarios submarinos: la tubería de captación se caracteriza por ser de un material resistente a la corrosión. Se sumerge a una profundidad tal que el oleaje no afecte a la captación. El emisario se ancla en el fondo submarino, mediante dados de hormigón.

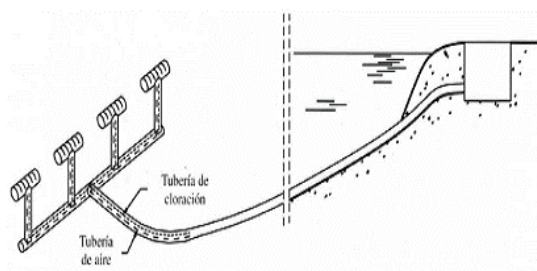


Figura 7: Captación abierta mediante emisario submarino (Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000))

4.2. Pretratamiento

Será necesario para garantizar que el agua de alimentación de la EDAM no sea dañina para las membranas que realizarán la desalación por osmosis inversa, tal que se maximicen su vida útil y su rendimiento. Dependerá en gran medida del tipo de captación empleada, ya que esta determinará la composición del agua obtenida. El pretratamiento puede ser físico o químico.

4.2.1. Pretratamiento físico

Se realizará con el objetivo de evitar un deterioro prematuro de las membranas. El pretratamiento físico eliminará los sólidos, la materia orgánica y las algas. Todos proceden de la erosión de terrenos, la descomposición de materia orgánica y la disolución de minerales en el agua.

El pretratamiento físico basará en procesos de filtración, la cual puede incluso mejorarse con técnicas como la decantación. Tras los filtros, se recurre a los cartuchos, que también realizarán una acción de filtración. Los cartuchos son prácticamente obligatorios ya que garantizan un agua acorde a las exigencias de los fabricantes de membranas.

La eliminación de sólidos y materia orgánica garantizará la ausencia de incrustación, precipitaciones y ataques químicos a las membranas, que podrán seguir funcionando a máximo rendimiento. Con el pretratamiento físico también se evitan atascamientos en el paso de agua por las membranas.

La filtración se puede realizar de varias maneras, siendo estas de las más empleadas:

- Filtración con filtros de arena: se logran filtrar partículas mayores de 20 micras. Cuando el caudal es elevado, se disponen horizontalmente, mientras que para caudales pequeños se colocan en vertical. Dispuestos en una tubería. Además de arena, se coloca antracita en el fondo del filtro.

- Filtración con filtros de cartuchos: se logran filtrar partículas de hasta 5 micras. Se trata de depósitos metálicos recubiertos interiormente. Con estos filtros se garantiza la protección total de las membranas de osmosis inversa y de la bomba de alta presión.



Figura 8: Interior de un tubo con filtros de cartuchos (Fuente: www.putschnerva.com)

- Filtración sobre precapa: es empleado en instalaciones desaladoras de pequeños tamaños. Se basa en un lecho filtrado aplicado sobre algún material poroso, y el agua pasará a través del lecho.
- Microfiltración: mediante membranas, filtrando hasta las 0,1 o 0,2 micras. La separación se realiza físicamente. Necesita de limpiezas periódicas.
- Ultrafiltración: se eliminan partículas relativamente muy pequeñas con la ayuda de membranas semipermeables. Son equipos de costes económicos elevados. Filtraciones hasta las 0,01 micras.

4.2.2. Pretratamiento químico

En cuanto al agua de captación, hay que tener en cuenta que normalmente tiene un nivel bajo de pH y un fuerte desequilibrio iónico, siendo ambos indeseables para las membranas. El pretratamiento químico será el encargado de solucionar estos problemas.

Además, el agua de captación también presentará cierta actividad química biológica, por lo cual habrá que desinfectarla. Esto se puede hacer mediante:

- Cloración: se emplean derivados clorados para combatir la actividad biológica del agua de captación y evitar que ataque a las membranas. Se llega a aproximadamente 1 ppm de Cl en el agua de captación.

También puede ser necesaria una post-cloración para evitar nuevas contaminaciones de productos biológicos en los depósitos de almacenamiento o en las tuberías. Se realiza mediante la adición de gas Cloro, hipoclorito sódico o hipoclorito cálcico.

4.4. Núcleo de desalación

Formado por el bastidor de membranas y el recuperador de energía, ambas con sus bombas. Aquí se separará la sal del agua. Las membranas empleadas en la osmosis inversa se caracterizan por rechazar sales en altos porcentajes y tener una alta resistencia a los productos químicos.

4.4.1. Bastidor de membranas

La membrana es una lámina delgada que por sí sola sería incapaz de soportar los esfuerzos mecánicos a la que la sometería el caudal de agua a desalar. Por ello, se disponen siempre en una estructura determinada para aguantar dichos esfuerzos, pero buscando siempre la menor ocupación de espacio posible. Así, las membranas se pueden disponer en las siguientes configuraciones:

- Membranas de tipo plano: el más sencillo. Un marco actúa como soporte de la lámina. Al ser la superficie pequeña, se colocan varias membranas de este tipo unas sobre otras, formando así una columna de membranas. Para evitar que las membranas se suelten, se unen unas con otras mediante pasadores. Su principal desventaja es la baja producción de agua desalada que tienen. Por otro lado, no suelen presentar problemas de obstrucción.
- Membranas de fibra hueca: se tiene un haz de varios tubos capilares (hasta millones) que son huecos interiormente, denominados fibra hueca. Estos tubos tienen el tamaño de un cabello humano. Las fibras se empaquetan en un tubo de PRFV para evitar la corrosión. La superficie total de este tipo de membranas es muy grande.

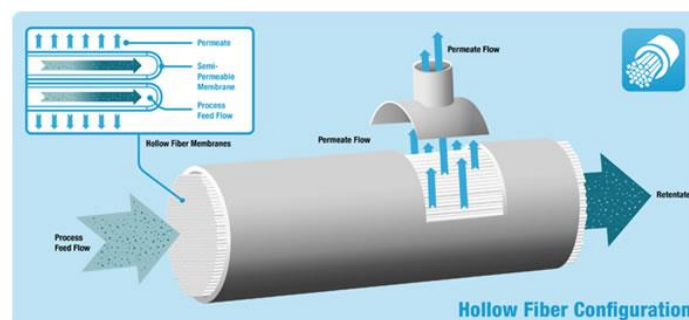


Figura 10: Disposición de una membrana de fibra hueca (Fuente: www.acsmedioambiente.com)

- **Membranas tubulares:** la lámina delgada que constituye la membrana se coloca en el interior de un tubo de PVC, que soportará todas las presiones. El tubo tendrá varios orificios que permitirán el paso del agua. El agua de alimentación circula por el interior de la membrana, y el agua desalada la atraviesa, y termina circulando por su exterior y saliendo del tubo de PVC.

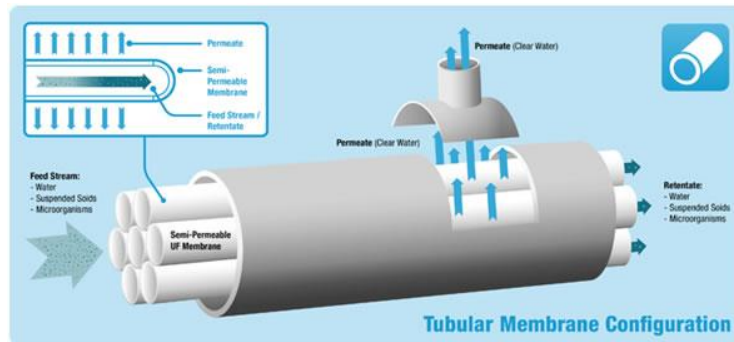


Figura 11: Disposición de una membrana tubular (Fuente: www.acsmedioambiente.com)

- **Membranas de arrollamiento en espiral:** se trata de varias láminas rectangulares que se enrollan alrededor de un eje cilíndrico. Este eje presenta varias perforaciones a través de las cuales circulará el agua desalada. Entre cada lámina habrá un separador impermeable y una malla. La malla determinará los canales por los cuales circula el agua de alimentación, garantizando un régimen turbulento. El separador impermeable tendrá la función de aislar el caudal que pasa por cada lámina, para así separarlo de la salmuera.

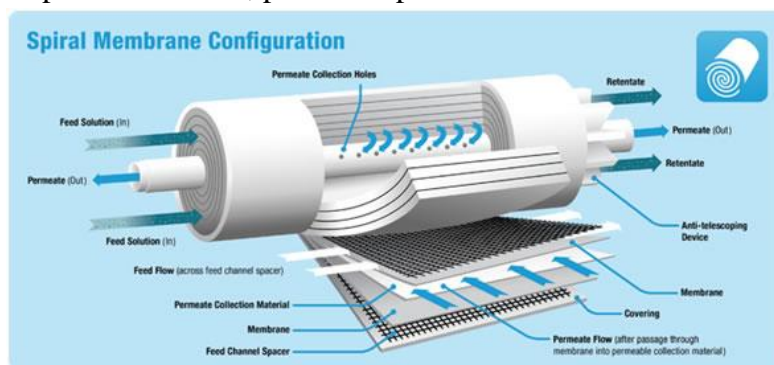


Figura 12: Disposición de una membrana de arrollamiento en espiral (Fuente: www.acsmedioambiente.com)

Según la bibliografía consultada, para la capacidad que tendrá nuestra instalación de desalación por osmosis inversa, las membranas más empleadas son las de fibra hueca y las de arrollamiento en espiral, con un claro dominio de las segundas. Para que puedan resistir a las presiones de funcionamiento debido al caudal de agua y a su filtración, se colocarán en una estructura metálica resistente denominada bastidor de membranas (o también denominado tren de permeado), que tendrá la función de mantener a las membranas inmóviles durante el proceso de

desalación. Sobre todo, será importante en los arranques, en los cuales se producirán golpes de ariete que son perjudiciales para las membranas.



Figura 13: Perspectiva de varios bastidores de membranas (Fuente: www.iagua.es)

La premisa de la colocación de las membranas siempre debe ser la de ocupar el menor espacio posible. Dentro del bastidor, los tubos de membranas se colocarán en serie o en paralelo para alcanzar las condiciones de operación y producción de agua desalada deseadas. El bastidor también soportará a los colectores de alimentación, distribución y rechazo. Como se puede observar en la Figura 13, a mayor capacidad de producción, mayor altura tendrá el bastidor, por lo que la planificación de la distribución de los tubos es sumamente importante para evitar problemas a la hora de realizar operaciones de mantenimiento o de manipulación.

En la parte superior del bastidor habrá llaves de purga que tendrán la función de eliminar cualquier traza de aire en los arranques de la EDAM. Además, bajo cada fila de tubos de presión habrá una canaleta para recoger posibles fugas de agua, que se enviarán a un drenaje.

Cabe destacar que cuando se emplean membranas de arrollamiento en espiral, se alojan normalmente, en serie, entre 6 ó 7 por tubo de presión, y se conectan entre ellas dentro del tubo. Actualmente, estos tubos de presión tienen las conexiones con la alimentación y la distribución en los laterales, lo cual facilita el montaje. En cuanto a las membranas de fibra hueca, solo habrá una por cada tubo. A cada tubo, en ambos casos, se le colocará un tubo muy fino para poder tomar muestras periódicas de agua.

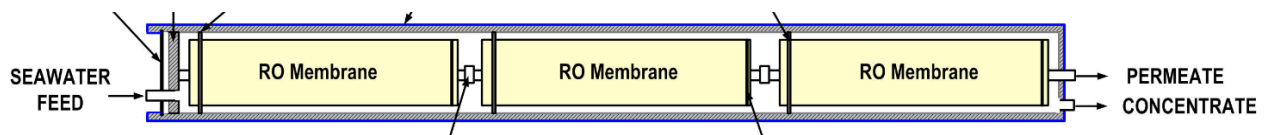


Figura 14: Corte transversal de un tubo de presión con 3 membranas de osmosis inversa (Fuente: www.lenntech.es)

Cuando hay más de un bastidor en la misma planta, debe haber una separación mínima entre ellos para asegurar la posibilidad de realizar mantenimientos e instalaciones. Entre bastidores con tubos de 6 membranas debe haber una separación mínima de 6 metros, y en los de 7

membranas, de 3 metros. Los fabricantes de membranas establecen la conversión de los tubos de 6 membranas en un 50% aproximado, empleado como referencia en el diseño.

4.4.2. Colocación de las membranas

Como ya se mencionó en el apartado anterior, las membranas se colocan en serie para que el rechazo de una membrana vuelva a ser desalada por la membrana siguiente, y normalmente se colocan entre 6 ó 7 membranas por tubo de presión. Para mejorar aún más la producción, se pueden colocar los módulos en paralelo. Esto se realiza empleando diferentes configuraciones de etapas y de pasos.

La etapa es una unidad de producción que es alimentada por una sola bomba de alta presión. Así, un conjunto de tubos de presión o membranas de fibra hueca en paralelo formarían lo que se conoce como etapa. Para elevar la eficiencia de la EDAM, al haber varias etapas el rechazo de una se introduce en la etapa siguiente. Así, cuantas más etapas, mayor será el porcentaje de conversión de la planta. Sin embargo, la calidad del agua empeora con el aumento de etapas al elevarse la salinidad del agua de alimentación.

Un paso es un grupo de tubos de presión o membranas de fibra hueca que necesita otra bomba al recoger agua de una etapa anterior para poder funcionar correctamente. Es decir, la presión del caudal de rechazo de la primera etapa se eleva antes de entrar a la siguiente etapa.

Así, se pueden realizar las siguientes configuraciones:

- Simple etapa: membranas o tubos de presión en paralelo, alimentados por una bomba. Es la configuración más ineficiente, pero la más empleada en instalaciones desaladoras de agua de mar debido a la permisividad de una baja conversión.
- Varias etapas (etapas de salmuera): es la más frecuente. Se coloca una serie de tubos en paralelo, y su rechazo se alimenta a una serie de tubos en paralelo posterior. Al disminuirse el caudal de rechazo a medida que pasan las etapas, en cada etapa se irá necesitando un menor número de tubos o membranas. Se logrará aumentar la conversión de la planta.
- Varias etapas (etapas de producto): cuando se necesita una alta calidad en el agua producto. Ésta se pasa, tras ser obtenida de una etapa, de nuevo por otra etapa para reducir aún más el contenido de sales. Se bombeará con una nueva bomba. Sin embargo, actualmente apenas se emplea esta configuración, al existir membranas de agua de mar con rechazos superiores al 99%, siendo necesario un solo paso para un agua producto de buena calidad.

4.4.3. Parámetros técnicos de las membranas

Son especialmente útiles a la hora de realizar el diseño de una EDAM. Se pueden variar realizando cambios en la temperatura, presión y pH del agua de alimentación. Dichos parámetros son los siguientes:

- Rechazo: condicionará la cantidad de agua producto que es posible obtener a partir de la membrana. Actualmente está por encima del 99% en membranas para agua de mar. Dependerá del porcentaje de sales que puede pasar a través de la membrana y a la vez del rechazo de sales que ésta ofrezca.
- Presión de funcionamiento: tendrá que ser superior a la presión osmótica diferencial, y además asegurar un caudal suficiente para el funcionamiento óptimo de la membrana. Suele haber una presión máxima de operación que no debe de sobrepasarse para evitar daños en las membranas.
- Temperatura del agua a desalar: las membranas de osmosis inversa suelen soportar hasta los 45 °C de temperatura.
- Conversión: porcentaje de agua que se logra desalar. Se puede variar según el diseño de la planta, pero siempre dentro de ciertos límites. La conversión estará limitada por la concentración de sales que se puede tener en la salmuera hasta que ésta precipite. Esto provocaría una obstrucción indeseable de las membranas, reduciéndose su eficiencia de forma irreversible.
- Factor de ensuciamiento: también conocido como “fouling factor”, es un índice menor de 1 que expresa el deterioro de la membrana anualmente debido a su uso, tanto en el caudal de agua producto como de rechazo. Con este índice se consigue un margen de seguridad a la hora de diseñar las membranas.

4.4.4. Recuperador de energía

Se emplean mucho en plantas desaladoras de agua de mar, ya que en ellas la recuperación suele ser bastante baja. Actualmente, se hace de dos maneras. Una es con el empleo de turbinas Pelton, que transforman la presión de la salmuera en energía cinética. La otra es mediante un intercambiador de presión, que transfiere directamente la presión de la salmuera al agua de alimentación.

Con ambos métodos, se consigue reducir el consumo energético de la bomba de alta presión a la entrada al bastidor de membranas. Se emplean más los intercambiadores de presión al resultar

más eficientes energéticamente, ya que no necesitan transformar la energía de presión en cinética, lo cual daría lugar a pérdidas de energía debido al rendimiento mecánico.

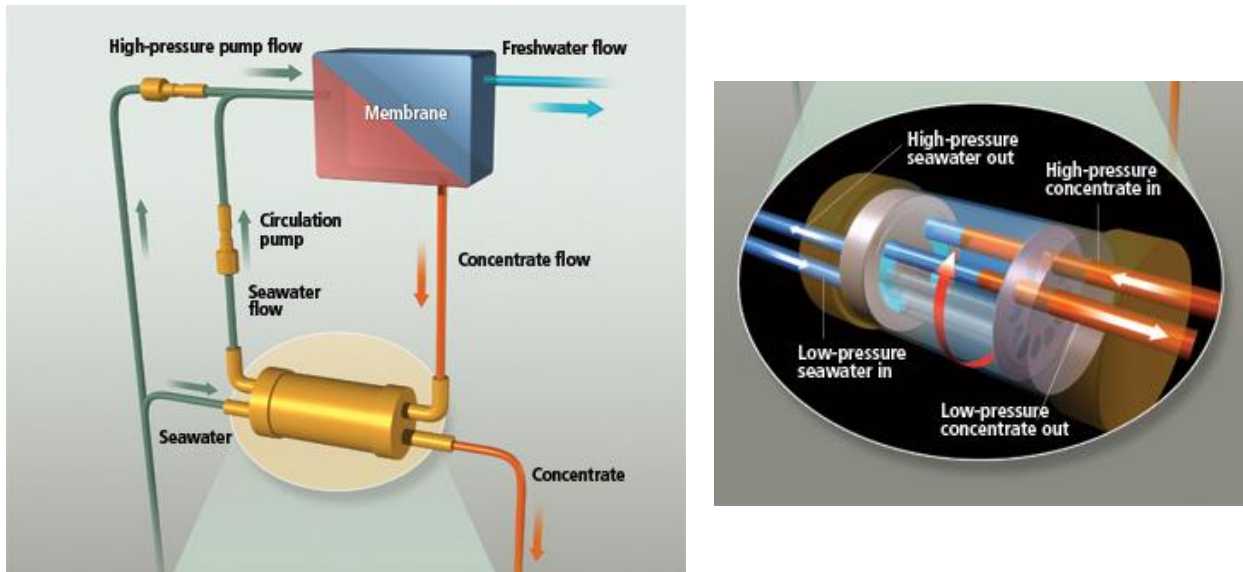


Figura 15: Intercambiador de presión incorporado al núcleo de desalación (Fuente: www.energyrecovery.com)

4.5. Bombas

Son la parte de la instalación que será la responsable del consumo energético, para poder impulsar el agua a desalar, el agua producto y el rechazo desde sus inicios hasta sus destinos. Serán todas centrífugas.

En nuestra EDAM, tendremos las siguientes:

- **Bombas de captación:** transportarán el agua desde los pozos de captación hasta el punto colector, a través de las tuberías de captación, y a partir de ahí hasta la entrada del núcleo de desalación, a través de la tubería de alimentación. Serán sumergibles. Necesitan de un equipo de vacío para realizar el cebado y evitar la cavitación.



Figura 16: Bomba sumergible para la captación (Fuente: [Grundfos Webcaps](http://Grundfos.com))

- **Bomba de distribución:** transportará el agua producto desde la salida del núcleo de desalación hasta los pozos reguladores, a través de la tubería de distribución.
- **Bomba de rechazo:** transportará la salmuera desde la salida del intercambiador de presión hasta el emisario submarino de rechazo, a través de la tubería de rechazo de salmuera. En principio, no es necesaria, ya que se diseñará la EDAM con el objetivo de que el rechazo llegue al mar mediante la acción de la gravedad. Se tendrá que demostrar con cálculos.
- **Bomba de alta presión:** elevará la presión del agua de entrada a las membranas hasta la necesaria para la operación correcta del núcleo de desalación.
- **Bomba Booster:** suplirá la diferencia de presión existente entre la presión de entrada al bastidor de membranas y la presión de la salmuera cuando sale del bastidor de membranas.

Para poder seleccionar modelos de bombas, tendremos que hallar sus caudales y sus alturas manométricas. El caudal se obtendrá con softwares de cálculo, mientras que la altura se conseguirá con la resolución de un balance de bomba.

También existen otras bombas, como las de lavado de filtros, pero debido al alcance limitado de este proyecto no se analizarán. Por ello, tampoco las explicaremos en este Anexo I.

4.6. Depósito regulador

Será importante ya que en este depósito se almacenará el agua desalada antes de su distribución a los puntos de consumo. Tendrá que estar situado en un punto superior al de todos los puntos de consumo para asegurar el trasvase por gravedad.

Su volumen se dimensionará en aproximadamente un 10% de la producción diaria de la instalación desaladora, para asegurar el abastecimiento durante paradas de mantenimiento o inesperadas.

4.7. Otros elementos y equipos de las instalaciones desaladoras

No los hemos tenido en cuenta para este estudio debido al limitado alcance que tiene, pero conviene nombrarlos. Un ejemplo serían las bombas de lavado de filtros que se mencionaron anteriormente. También hay válvulas (de control, de purga, anti-retorno, etc), instrumentos de medida y control, protecciones, manómetros, caudalímetros, equipos de dosificación, etc. que tampoco se han tenido en cuenta en este estudio. El consumo energético de todos estos elementos y equipos se tomará como suposición en los Anexos de cálculo del consumo de la EDAM (Anexos II y III).

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO II

**CÁLCULOS PARA EL
DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE
DESALACIÓN**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO
CON ENERGÍA EÓLICA PARA ABASTECIMIENTO HUMANO
EN GRAN CANARIA**

AUTOR: Marvin Jozef González Van leeuwe

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE - ANEXO II

1. Introducción	1
2. Dimensionamiento inicial del bastidor de membranas.....	2
2.1. Análisis del agua de mar y requisitos necesarios para su consumo	2
2.2. Elección de las membranas con IMSDesign.....	5
2.2.1. Tren de permeado	5
2.2.2. Preselección de los modelos de membranas.....	6
2.2.3. Cálculos y selección final del modelo de membranas.....	8
2.3. Especificación inicial del sistema de desalación.....	12
2.3.1. Selección del número de etapas.....	12
2.3.2. Selección de la conversión y número de membranas y de tubos de presión ..	12
3. Dimensionado del recuperador de energía	17
3.1. Obtención de parámetros con IMSDesign	18
3.2. Introducción de datos en la hoja de cálculo	21
3.3. Análisis de los resultados obtenidos.....	23
4. Prueba con bastidor de membranas híbridas.....	27

Índice de figuras – Anexo II

Figura 1: Imagen del software IMSDesign empleado para el dimensionamiento de membranas (Fuente: www.membranes.com)	2
Figura 2: Valores de la composición química del agua de mar a desalar introducidos en IMSDesign (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de un análisis químico de laboratorios Labaqua).....	3
Figura 3: Valores para la temperatura del agua de mar tomados a lo largo del año 2017 por la Boya de Gran Canaria (Fuente: Puertos del Estado).....	4
Figura 4: Introducción de los parámetros del tren de permeado (Fuente: IMSDesign).....	6
Figura 5: Tipos de membranas que ofrece el fabricante Hydranautics en su catálogo online (Fuente: www.membranes.com)	7
Figura 6: Tabla resumen de las características de las membranas recomendadas (Fuente: IMSDesign)	8
Figura 7: Valores estándar para el intercambiador de presión (Fuente: IMSDesign).....	9
Figura 8: Resultados de cálculo con el modelo SWC4 MAX (Fuente: IMSDesign)	9
Figura 9: Concentraciones del agua producto con el modelo SWC4 MAX (Fuente: IMSDesign)	9
Figura 10: Diagrama de flujo con el modelo SWC4 MAX (Fuente: IMSDesign)	10
Figura 11: Resultados de cálculo con el modelo SWC5 MAX (Fuente: IMSDesign)	10
Figura 12: Concentraciones del agua producto con el modelo SWC5 MAX (Fuente: IMSDesign)	10
Figura 13: Diagrama de flujo con el modelo SWC5 MAX (Fuente: IMSDesign)	11
Figura 14: Concentraciones en el agua producto con 6 membranas y un 45% de conversión (Fuente: IMSDesign).....	13
Figura 15: Consumos energéticos para 6 membranas y un 45% de conversión (Fuente: IMSDesign).....	14
Figura 16: Concentraciones en el agua producto con 7 membranas y un 45% de conversión (Fuente: IMSDesign).....	14
Figura 17: Consumos energéticos para 7 membranas y un 45% de conversión (Fuente: IMSDesign)	15
Figura 18: Concentraciones en el agua producto con 7 membranas y un 50% de conversión (Fuente: IMSDesign).....	15

Figura 19: Consumos energéticos para 7 membranas y un 50% de conversión (Fuente: IMSDesign)	16
Figura 20: Interfaz inicial de la hoja de cálculo del intercambiador de presión de ER (Fuente: www.energyrecovery.com)	17
Figura 21: Diagrama de flujo con 6 membranas y 45 % de conversión (Fuente: IMSDesign)	18
Figura 22: Diagrama de flujo con 7 membranas y 45 % de conversión (Fuente: IMSDesign)	19
Figura 23: Diagrama de flujo con 7 membranas y 50% de conversión (Fuente: IMSDesign)	20
Figura 24: Datos introducidos para 6 membranas y un 45% de conversión (Fuente: Excel ER) .	21
Figura 25: Datos introducidos para 7 membranas y un 45% de conversión (Fuente: Excel ER) .	22
Figura 26: Datos introducidos para 7 membranas y un 50% de conversión (Fuente: Excel ER) .	22
Figura 27: Resultados del intercambiador de presión para 6 membranas y 45% de conversión (Fuente: Excel ER)	23
Figura 28: Resultados del intercambiador de presión para 7 membranas y 45% de conversión (Fuente: Excel ER)	23
Figura 29: Resultados del intercambiador de presión para 7 membranas y 50% de conversión (Fuente: Excel ER)	24
Figura 30: Datos finales del intercambiador de presión introducidos (Fuente: IMSDesign).....	25
Figura 31: Resultados de consumo de 7 membranas y 45% de conversión en IMSDesign (Fuente: IMSDesign)	25
Figura 32: Concentraciones en el agua producto con la Combinación 1 (Fuente: IMSDesign) ...	27
Figura 33: Concentraciones en el agua producto con la Combinación 3 (Fuente: IMSDesign) ...	28
Figura 34: Concentraciones en el agua producto con la Combinación 2 (Fuente: IMSDesign) ...	28

Índice de tablas – Anexo II

Tabla 1: Valores límites establecidos para agua de abastecimiento humano (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos del RD 140/2003).....	4
Tabla 2: Tabla resumen del enfrentamiento entre SWC4 y SWC5 MAX (Fuente: Elaboración propia)	11
Tabla 3: Tabla resumen para cada opción de membranas y % de conversión (Fuente: Elaboración propia)	16
Tabla 4: Tabla resumen de los resultados obtenidos con las 3 configuraciones diferentes (Fuente: Elaboración propia).....	20
Tabla 5: Tabla resumen de los resultados obtenidos para cada configuración junto con el intercambiador de presión (Fuente: Elaboración propia).....	24
Tabla 6: Características finales del sistema con rendimientos de bombas supuestos (Fuente: Elaboración propia).....	25
Tabla 7: Características más importantes para cada combinación de membranas híbridas (Fuente: Elaboración propia).....	28

1. Introducción

En este Anexo se detallarán los procedimientos de cálculo empleados y los resultados obtenidos para el dimensionamiento del sistema de desalación de nuestra EDAM, que debe de producir 3500 m³/día. Estos resultados condujeron a las decisiones tomadas en el apartado “Análisis de Soluciones” de la Memoria de este presente estudio. El objetivo final de los Anexos II y III es la obtención del consumo energético específico y total de toda la planta desaladora.

Así, a continuación, se explicarán todos los cálculos conducentes al dimensionamiento de los siguientes sistemas y de su consumo energético:

1. Bastidor de membranas
2. Recuperador de energía (intercambiador de presión)

Hay que tener en cuenta que, en un principio, todos estos cálculos se harán con los valores estándar de rendimiento y consumo que atribuyen los softwares empleados a las bombas de la planta. En el Anexo III se realizará el dimensionado de estas, obteniéndose así los valores reales de sus rendimientos. Una vez conocidos, al final de ese mismo Anexo III se introducirán estos rendimientos en los programas informáticos, y se recalculará así el consumo del núcleo de desalación. En el Anexo IV se dimensionará el sistema eólico destinado a abastecer el consumo obtenido en el Anexo III.

Es decir, el resultado final de consumo energético de este Anexo II no será el definitivo, ya que para serlo harán falta los rendimientos reales de las bombas del sistema, dimensionadas en el Anexo III.

2. Dimensionamiento inicial del bastidor de membranas

Para ello, necesitaremos los valores de la composición química del agua de mar en la isla de Gran Canaria y su media de temperatura anual. Una vez obtenidos, los introduciremos en el software de dimensionamiento de membranas IMSDesign, de la empresa Hydranautics, la misma que se ha seleccionado como proveedor de membranas para nuestra planta desaladora. Para los resultados, escogeremos aquella opción que sea la más eficiente energéticamente.

Además, el agua producto deberá de cumplir los requisitos de valores mínimos establecidos por el RD 140/2003, el cual establece los valores límites de la composición química del agua destinada al consumo humano. En el caso de no conseguirse esto, se solucionará el problema mediante un postratamiento adecuado, el cual se dimensionará en el Anexo III. Sin embargo, a pesar de la viabilidad de esta solución, será conveniente que el agua producto se acerque lo máximo posible a los valores límite del RD 140/2003, ya que esto implicará de forma directa un sistema de postratamiento menor, contribuyendo así a la eficiencia tanto energética como económica de la planta. Hay que tener en cuenta que, aunque no se haya realizado un análisis de costes en este estudio, siempre será interesante tomarlos en cuenta de forma orientativa, como será nuestro caso.



Figura 1: Imagen del software IMSDesign empleado para el dimensionamiento de membranas (Fuente: www.membranes.com)

2.1. Análisis del agua de mar y requisitos necesarios para su consumo

Para la composición química del agua de mar se ha empleado el siguiente análisis químico realizado por el laboratorio Labaqua, extraído del Trabajo de Fin de Grado “Estudio de una planta de desalación alimentada mediante energía eólica”, perteneciente a la Universidad de La Laguna.

Ts: Temperatura Superficial Media del Agua/Surface Mean Temperature of Water. ° C

Boya de Gran Canaria Año 2017			
Mes/Month	Ts Min./Min. Ts	Día/Day	Hora/Hour
Enero/January	18.9	27	01
Febrero/February	18.5	28	06
Marzo/March	18.4	25	09
Abril/April	18.4	02	10
Mayo/May	19.8	01	02
Junio/June	20.8	30	22
Julio/July	20.4	01	10
Agosto/August	21.8	20	09
Septiembre/September	21.3	08	07
Octubre/October	22.7	31	21
Noviembre/November	21.9	30	05
Diciembre/December	19.8	31	09

Boya de Gran Canaria Año 2017			
Mes/Month	Ts Max./Max. Ts	Día/Day	Hora/Hour
Enero/January	20.1	09	15
Febrero/February	19.4	03	18
Marzo/March	19.6	11	14
Abril/April	21.0	29	19
Mayo/May	22.1	10	18
Junio/June	23.0	19	18
Julio/July	23.3	28	17
Agosto/August	23.8	30	16
Septiembre/September	24.8	13	19
Octubre/October	24.0	08	17
Noviembre/November	23.5	03	16
Diciembre/December	22.2	02	00

Generado por/Generated by Puertos del Estado Fecha/Date 17 Mar 2018

Figura 3: Valores para la temperatura del agua de mar tomados a lo largo del año 2017 por la Boya de Gran Canaria (Fuente: Puertos del Estado)

Como ya ha sido mencionado, debido a la aplicación del agua producto se deberá de cumplir el requisito de valores límites establecidos por el RD 140/2003 para el consumo humano, de los cuales los más importantes son los de la Tabla 1. Otro parámetro a tomar en cuenta, según fuentes consultadas, es el TDS (“Total de Sólidos Disueltos”), que debe ser menor de 500 mg/L.

pH	6,5 a 9,5	Fluoruro	1,5 mg/L
Amonio	0,5 mg/L	Nitrato	50 mg/L
Boro	1 mg/L	Sodio	200 mg/L
Cloruro	250 mg/L	Sulfato	250 mg/L

Tabla 1: Valores límites establecidos para agua de abastecimiento humano (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos del RD 140/2003)

2.2. Elección de las membranas con IMSDesign

Tras haber introducido los valores de la composición química del agua captada, su forma de captación, su temperatura y su pH, pasaremos a la pestaña “Diseño” del programa.

2.2.1. Tren de permeado

En esta parte del diseño, introducimos los siguientes datos:

- pH de alimentación: debe estar entre 6,5 y 7 para no dañar a las membranas. Teniendo un agua de captación con un pH de 8, lo reduciremos a 7 mediante un pretratamiento químico con ácido clorhídrico de concentración 100%, que se dimensionará en el Anexo III.
- Conversión: es el porcentaje de agua que será desalada (que se denomina agua producto). En este primer cálculo, estableceremos la conversión en el 45%, el cual es un valor aceptable para plantas desaladoras de este tipo según la bibliografía consultada. Más adelante, en cálculos posteriores iterativos, se podría modificar la conversión para estudiar cómo influye sobre el consumo energético del núcleo de desalación.
- Flujo de permeado: es la cantidad de agua que se desala. Serán 3500 m³/día, valor calculado en el apartado de la capacidad de la planta de la Memoria.
- Flujo promedio: es la cantidad de litros de agua que fluyen por metro cuadrado superficial de membrana por hora (lmh). Dependerá del modelo de membrana que seleccionemos, ya que cada una tendrá sus dimensiones particulares.
- Caudal de alimentación: agua de mar que necesitará ser captada. Depende del flujo de permeado y del porcentaje de conversión.
- Caudal de rechazo: cantidad de salmuera que producen las membranas durante el proceso de desalación. Depende del flujo de permeado y del porcentaje de conversión.
- Producto químico: el que será empleado en el pretratamiento para reducir el pH del agua de alimentación a 7. Se especifican también su concentración y su dosificación. Se puede escoger entre ácido sulfúrico y ácido clorhídrico.
- Edad de la membrana: se pone 3 años ya que es lo recomendado según la bibliografía consultada para realizar este tipo de cálculos.
- Disminución Flujo por año: en porcentaje, también según lo recomendado por la bibliografía, será 5.
- Factor de ensuciamiento: lo calcula el programa. Depende de la edad de la membrana y del porcentaje de disminución de flujo por año.

- Incremento de paso de sales por año: depende del material de las membranas. Para las de poliamida (de lo que están hechas las membranas de Hydranautics), se establecen valores entre el 5 y el 15% por año. Escogeremos un 7%, aproximadamente la media entre ambos valores.

Trenes		Paso 1	Paso 1
pH alimentación		7,00	Producto químico
Conversión	%	45,00	H2SO4
Flujo/tren de permeado,	m3/d	3500,0	Concentración de la solución,%
Flujo promedio	lmh	14,1	100
Caudal de alimentación,	m3/d	7777,8	Tasa de dosificación de productos químico
Caudal de rechazo	m3/d	4277,8	mg/l
			0,000
			Edad membrana
			años
			3,0
			Disminución Fluj por año
			5,00
			Factor de ensuciamiento
			0,857
			Incremento de paso de sales/año, %
			7,0

Figura 4: Introducción de los parámetros del tren de permeado (Fuente: IMSDesign)

2.2.2. Preselección de los modelos de membranas

Para ello, consultaremos el catálogo de membranas online en la web del fabricante elegido (Hydranautics). Hay cuatro opciones: SWC (Sea Water Composite), CPA (Composite Polyamide), ESPA (Energy Saving Polyamide) y LFC (Low Fouling Composite). Escogemos las SWC, ya que las otras tres opciones se emplean para otras aplicaciones (industria, agricultura, etc.) o no cumplen ciertos requisitos que necesitamos, como, por ejemplo, un alto rechazo de sales (muy importante al ser nuestra aplicación el abastecimiento de consumo humano).



SWC (Sea Water Composite)

As the world is facing freshwater scarcity, Hydranautics brings a range of SWC RO membranes to meet the demands of desalination industry. SWC membranes have improved the productivity and salt rejection for more than two decades while reducing their environmental impact. SWC membranes come in a range of innovative formulations depending on the level of seawater salinity required.

[Read More](#)



CPA (Composite Polyamide)

Ultrapure water is essential in several industrial applications. CPA RO membranes are regarded as the industry standard for all critical high purity applications – from pharmaceutical to power industry. CPA lines of spiral-wound RO membranes are available in a variety of sizes and deliver unmatched performance with the highest salt rejection rates.

[Read More](#)



ESPA (Energy Saving Polyamide)

Energy required to pressurize RO feed water is the largest contributor to the total energy consumption of the RO plant. As a result, chlorine tolerant membranes have helped the membrane technology become affordable and cost effective by reducing energy consumption required to operate RO system. ESPA membranes are the choice for applications demanding high-energy efficiency, with uncompromised productivity and salt rejection.

[Read More](#)



LFC (Low Fouling Composite)

LFC3-LD from the LD Technology™ innovative low fouling membranes combines the attributes of a neutrally charged surface with hydrophilicity to achieve the lowest organic and colloidal fouling in the most demanding feed water conditions. Combining the attributes of a neutral surface charge and hydrophilicity, LFC3-LD provides significant reduction in fouling rates increasing the membrane's efficiency by restoring nominal performance after cleaning.

[Read More](#)

Figura 5: Tipos de membranas que ofrece el fabricante Hydranautics en su catálogo online (Fuente: www.membranes.com)

Dentro de las SWC, hay tres tipos: la SWC4, la SWC5 y la SWC6. La SWC4 tiene un alto rechazo y produce bajos niveles de TDS. No necesita de mucha limpieza debido a la tecnología que emplea, ofreciendo una gran durabilidad y un desempeño consistente. Tiene una superficie activa aumentada. La SWC5 ofrece la mayor eficiencia energética al coste más bajo, y es empleada en las plantas desaladoras grandes. Funciona con presiones de operación bajas y no necesita ser limpiada frecuentemente, igual que la SWC4. Tienen las mismas características en cuanto a la superficie activa. La SWC6 tiene también una gran eficiencia energética, y es empleada cuando se deben desalar aguas de mar que tienen unas temperaturas relativamente bajas, lo cual requiere de una mayor presión de trabajo.

Podemos observar que la SWC5 y la SWC6 son atractivas debido a la eficiencia energética, y, sobretodo, la SWC5, ya que es empleada frecuentemente en plantas desaladoras. Por otro lado, la SWC4 ofrece bajo niveles de TDS, uno de los requisitos más importantes que establece el RD 140/2003 para que el agua producto pueda ser destinada a consumo humano.

En los tres tipos estudiaremos los subtipos MAX, ya que, según el fabricante, estas variantes ofrecen una mayor área superficial activa, lo cual dará lugar a una mayor eficiencia energética y a un mayor rechazo de sales. No hay que olvidar que, al fin y al cabo, estas dos condiciones son las que se buscan con este estudio. Consultando los catálogos de estos subtipos, que se pueden encontrar en la página web de Hydranautics, encontramos que:

- En cuanto al rechazo de sales, la SWC4 MAX y SWC5 MAX ofrecen un 99,8% (un mínimo de 99,7%), mientras que la SWC6 MAX tan sólo ofrece estas prestaciones con caudales altos.
- En cuanto al caudal de agua, desde la SWC6 hasta la SWC4 tienen menor caudal. Sin embargo, todos tienen la misma área superficial activa.

Hasta el momento, la membrana más atractiva parece ser la SWC5 MAX, ya que tiene el máximo rechazo de sales de las tres opciones y es la segunda que mayor caudal tiene.

El programa IMSDesign recomienda los modelos de membrana más adecuados para el sistema que se ha definido anteriormente, y proporciona un resumen de las características de las membranas que ha seleccionado, reflejado en la Figura 6. En ella, podemos observar que la SWC4 MAX y SWC5 MAX tienen igual rechazo, mientras que la SWC6 MAX tiene un 0,2% menos de rechazo. Este dato ya lo extrajimos de los catálogos. Por otro lado, también nos detalla la producción nominal (en la unidad GPD, galones de agua por día), que es menor en la SWC6 MAX. La mayor corresponde a la SWC5 MAX. Basándonos en el rechazo de sales y en la producción nominal, descartaremos el modelo SWC6 MAX, y haremos un estudio con IMSDesign de los modelos SWC4 MAX y SWC5 MAX.

Membranas recomendadas										
Modelo	Producción nominal (GPD)	Rechazo de sal, %	Tipo de elemento	Tamaño (in x in)	Área (Pies cuadrados)	spaciado (mil)	Presión de prueba (psii)	Presión de imentación (bar)	Permeate TDS (mg/l)	
SWC4 MAX	7200	99,80	SWRO Highest Rejection	8 X 40	440	28	800			
SWC4-LD	6500	99,80	SWRO High Rejection Low ...	8 X 40	400	34	800			
SWC5 MAX	9900	99,80	SWRO High Rejection	8 X 40	440	28	800			
SWC5-LD	9000	99,80	SWRO High Rejection Low ...	8 X 40	400	34	800			
SWC6 MAX	6600	99,60	SWRO Highest Flow	8 X 40	440	28	600			
SWC6-LD	6000	99,60	SWRO High Flow Low Dp	8 X 40	400	34	600			

Figura 6: Tabla resumen de las características de las membranas recomendadas (Fuente: IMSDesign)

2.2.3. Cálculos y selección final del modelo de membranas

Para estudiar las membranas, se optará por 1 etapa y un total de 6 membranas por tubo de presión. En cuanto al número de tubos de presión, IMSDesign nos calcula un total de 36 para esta configuración, basándose en el análisis de agua y en los parámetros del tren de permeado introducidos anteriormente. Hasta tiempos recientes, el uso de 6 membranas por tubo de presión era de lo más común en planta desaladoras de este tipo, debido a varios problemas que surgían al emplear un mayor número de membranas por tubo, entre ellos el aumento de costes económicos. Sin embargo, las tecnologías actuales han corregido muchos de los inconvenientes que suponía el uso de 7 membranas por tubo de presión, y, a día de hoy y según las fuentes consultadas, su empleo se está extendiendo en las nuevas plantas desaladoras que se están construyendo.

Sin embargo, para hacer la selección del modelo de membrana más idóneo, y para ir familiarizándonos con el programa y su funcionamiento, será conveniente empezar con 6 membranas por tubo de presión, que es además la cantidad de membranas estándar que recomienda IMSDesign.

Por otro lado, antes de que el programa proceda a calcular, nos pide también los datos del sistema de recuperación de energía. Como se ha especificado en la Memoria, se empleará el

intercambiador de presión por varios motivos. En este primer proceso de cálculo, se emplearán los valores estándar que nos propone IMSDesign para el sistema visibles en la Figura 7. Más adelante, una vez especificado el sistema de desalación, pasaremos a dimensionar el intercambiador de presión, y con los resultados se recalculará de nuevo todo el sistema en IMSDesign.

Cálculos ERD	
<input checked="" type="radio"/> Intercambiador de presión <input type="radio"/> Turbo	
Fuga	1,00 %
Mezcla volumétrica	6,00 %
H.P. diferencial	0,50 bar
Bomba booster	0,00 bar

Figura 7: Valores estándar para el intercambiador de presión (Fuente: IMSDesign)

Comencemos a analizar las membranas SWC4 MAX y SWC5 MAX. Nos interesan los resultados de cálculo, los diagramas de flujo y las concentraciones del agua producto.

Para el SWC4 MAX, obtenemos los siguientes resultados (Figuras 8, 9 y 10):

Resultados de Cálculo									(Flows are per vessel)
Arreglo	Tubo de presión	Alimentación (bar)	Conc (bar)	Alimentación (m3/h)	Conc (m3/h)	Flujo (lmh)	Flujo máximo (l/h)	Beta máximo	
1-1	36	68,2	67	9	4,95	16,5	26,7	1,05	

Figura 8: Resultados de cálculo con el modelo SWC4 MAX (Fuente: IMSDesign)

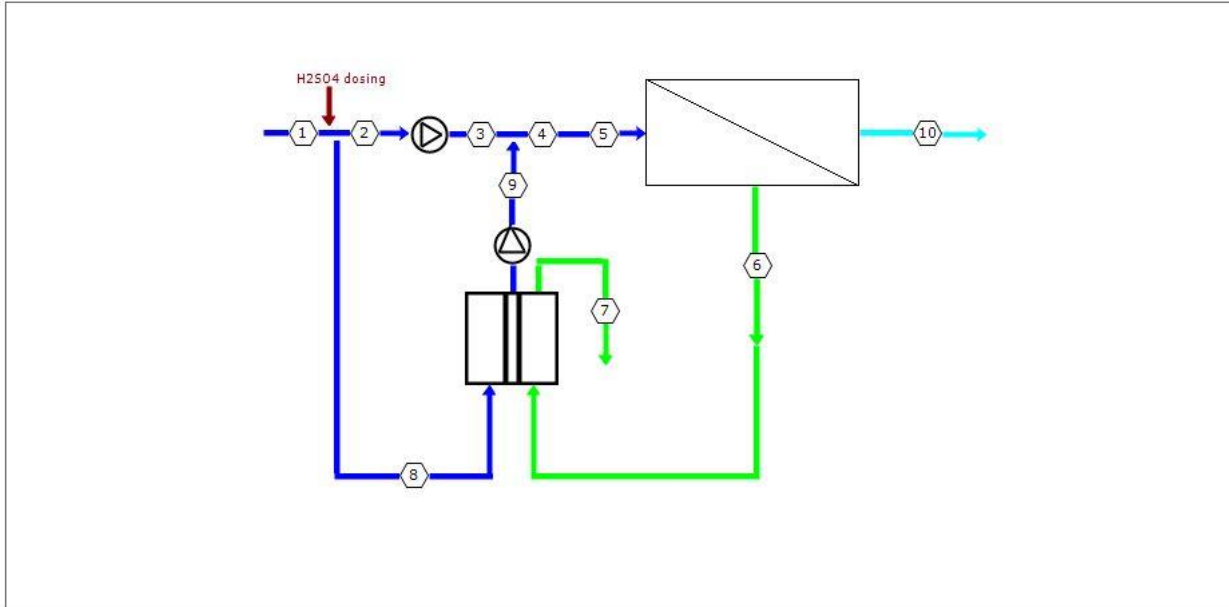
Concentración de permeado											
Ca	0,384	K	2,406	Sr	0,009	Cl	81,935	P04	0,000	CO2	7,766
Mg	1,309	NH4	0,000	HCO3	1,000	NO3	0,020	SiO2	0,003	CO3	0,000
Na	50,683	Ba	0,000	SO4	3,044	F	0,007	B	0,749	pH	5,3
Co	0,000	Cr	0,000	Fe	0,000	Br	0,003	TDS	141,55 mg/l		

Saturaciones del rechazo y parámetros							
CaSO4, %	53	SrSO4, %	77	Presión osmótica	52,1 bar	pH	7,3
BaSO4, %	148	SiO2, %	2	CCPP	96,70 mg/l	TDS	72432,8 mg/l
Ca3(PO4)2 SI	0,00	CaF2, %	151				

Figura 9: Concentraciones del agua producto con el modelo SWC4 MAX (Fuente: IMSDesign)

Nombre del proyecto : TFG GIM 2018 - Desaladora Temperatura : 21 °C Fecha : 24/03/2018
 Calculado por : Marvin J. González Van leeuwe Edad elemento, P1 : 3 años Versión 1.220.79 %

Intercambiador de presión



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Caudal (m3/h)	324	147	147	324	324	178	178	177	177	146
Presión (bar)	0	0	68,2	68,2	68,2	67,0	0	0	68,2	0
TDS (mg/l)	38824	38826	38826	39924	39924	72433	70414	38826	40842	142
pH	8,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,28	7,28	7,00	7,00	5,32
Econd (us/cm)	60106	60102	60102	61706	61706	108414	105546	60102	63043	306

Figura 10: Diagrama de flujo con el modelo SWC4 MAX (Fuente: IMSDesign)

Por otro lado, con el SWC5 MAX hemos obtenido estos resultados (Figuras 11, 12 y 13):

Resultados de Cálculo (Flows are per vessel)									
Arreglo	Tubo de presión	Alimentación (bar)	Conc (bar)	Alimentación (m3/h)	Conc (m3/h)	Flujo (lmh)	Flujo maximo	Beta maximo	
1-1	36	61,8	60,6	9	4,95	16,5	29,9	1,05	

Figura 11: Resultados de cálculo con el modelo SWC5 MAX (Fuente: IMSDesign)

Concentración de permeado

Ca	0,541	K	3,387	Sr	0,013	Cl	115,353	P04	0,000	CO2	7,766
Mg	1,844	NH4	0,000	HCO3	1,407	NO3	0,028	SiO2	0,005	CO3	0,000
Na	71,354	Ba	0,000	SO4	4,287	F	0,009	B	1,278	pH	5,5
Co	0,000	Cr	0,000	Fe	0,000	Br	0,004	TDS	199,51 mg/l		

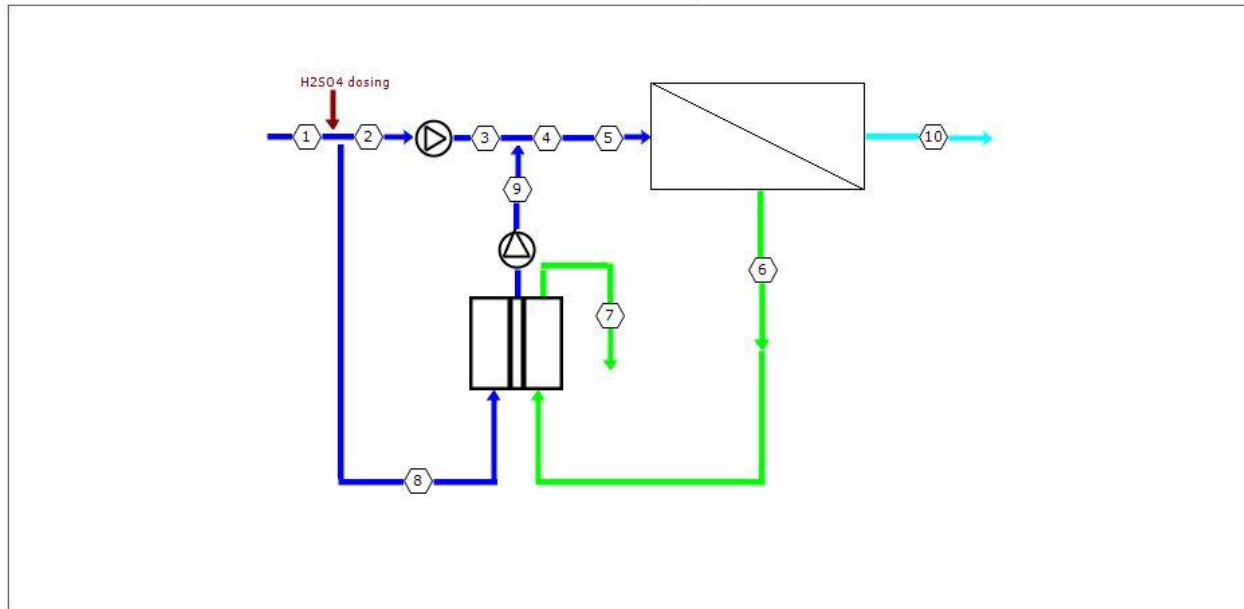
Saturaciones del rechazo y parámetros

CaSO4, %	53	SrSO4, %	77	Presión osmotica	52,0 bar	pH	7,3
BaSO4, %	148	SiO2, %	2	CCPP	96,51 mg/l	TDS	72394,0 mg/l
Ca3(PO4)2 SI	0,00	CaF2, %	151				

Figura 12: Concentraciones del agua producto con el modelo SWC5 MAX (Fuente: IMSDesign)

Nombre del proyecto : TFG GIM 2018 - Desaladora Temperatura : 21 °C Fecha : 24/03/2018
 Calculado por : Marvin J. González Van leeuwe Edad elemento, P1 : 3 años Versión 1.220.79 %

Intercambiador de presión



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Caudal (m ³ /h)	324	148	148	324	324	178	178	177	177	146
Presión (bar)	0	0	61,8	61,8	61,8	60,6	0	0	61,8	0
TDS (mg/l)	38824	38826	38826	39923	39923	72394	70378	38826	40840	200
pH	8,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,28	7,28	7,00	7,00	5,46
Econd (µs/cm)	60106	60102	60102	61704	61704	108361	105496	60102	63040	429

Figura 13: Diagrama de flujo con el modelo SWC5 MAX (Fuente: IMSDesign)

Modelo	Boro (mg/L)	TDS (mg/L)
SWC4 MAX	0,749	141,55
SWC5 MAX	1,278	199,51

Tabla 2: Tabla resumen del enfrentamiento entre SWC4 y SWC5 MAX (Fuente: Elaboración propia)

Para el agua destinada al consumo humano, según el RD 140/2003, los requisitos más restrictivos son el TDS y el Boro. Debe contener un TDS inferior a los 500 mg/L y un Boro inferior a 1 mg/L. Como podemos observar en la Tabla 2, en el SWC5 MAX obtenemos un índice de boro de 1,278 mg/l, excediendo así uno de los requisitos más importantes establecidos por la ley y dando lugar a un agua producto que puede ser muy nociva para la salud. Éste problema podría corregirse con un postratamiento, pero esta opción encarecerá el proceso de desalación, lo cual no ocurriría con el SWC4 MAX, que nos proporcionará un agua producto con 0,749 mg/L de Boro.

Así, como el agua producto será empleada para abastecimiento de consumo humano, escogeremos el modelo de membrana SWC4 MAX de Hydranautics para nuestro sistema de desalación a partir de las concentraciones de TDS y Boro que esta opción nos ofrece.

2.3. Especificación inicial del sistema de desalación

Tras elegir el modelo de membranas que emplearemos en nuestro sistema de desalación, toca especificar la cantidad de etapas, el porcentaje de conversión, el número de membranas y el número de tubos de presión.

Cabe destacar que el flujo promedio siempre es un parámetro muy importante a tomar en cuenta para evitar un desgaste prematuro de las membranas. Sin embargo, para este estudio no es necesario tener en cuenta su cálculo, ya que IMSDesign lo determinará automáticamente. Además, da un aviso cuando las elecciones tomadas en cuanto a número de membranas, número de tubos, modelo escogido, etc. hacen que el flujo promedio se exceda de valores aceptables para el modelo de membrana seleccionado.

2.3.1. Selección del número de etapas

Según las fuentes consultadas, en principio un sistema con doble etapa debería de dar siempre una mayor conversión y un menor consumo específico. Sin embargo, esto es sin tomar en cuenta el efecto de la recuperación de energía que se incorporará a nuestro núcleo de desalación. En las comparaciones realizadas en la bibliografía consultada entre sistemas de simple y de doble etapa, ambos con recuperación de energía incorporada, el consumo específico se iguala entre ambas opciones, e incluso llega a ser algo menor en el sistema de simple etapa.

¿Por qué ocurre esto? Ocurre porque la doble etapa tiene un menor potencial de recuperación de energía, ya que su caudal de concentrado y su respectiva presión son menores que en los sistemas de simple etapa. Esto hará que en el intercambiador de presión de la doble etapa se transmita menos presión al caudal de alimentación y, como consecuencia, se recupere menos energía.

Además, en la doble etapa, en vez de un simple intercambiador de presión, se tendrá que emplear un sistema de recuperación de energía I/fase Turbo, cuyos costes de implantación y mantenimiento son mayores según la bibliografía consultada.

Por todo ello, se optará por un sistema de simple etapa para el núcleo de desalación de nuestra EDAM.

2.3.2. Selección de la conversión y número de membranas y de tubos de presión

El objetivo de este sub-apartado es el de averiguar el porcentaje de conversión que más se adecúe a nuestro sistema de desalación y a los objetivos que perseguimos en este estudio, en combinación con el número de membranas y de tubos de presión que mejores resultados nos ofrezcan.

Según las fuentes consultadas, lo más común es tener un 45% de conversión en instalaciones desaladoras de agua de mar de una etapa. Cabe destacar que cuanto mayor sea la conversión de agua captada, más se aprovechará ésta, pero, por otro lado, este incremento supondrá un mayor uso de las membranas, las cuales correrán el riesgo de obstrucción. Este fenómeno obligará a la parada no programada de la producción de agua desalada, lo cual puede tener una gran influencia negativa sobre los costes de producción. Por ello, escogeremos entre un 45 y un 50% de conversión según los resultados que obtengamos.

En cuanto al número de membranas, escogeremos entre 6 y 7 membranas, que es lo más común en las plantas desaladoras actuales. Al introducir ambos en IMSDesign, nos recomienda 36 tubos de presión para ambos, por lo que ya tenemos definidos el número de tubos de presión. El emplear el mismo número de tubos de presión con diferente número de membranas influirá sobre la producción nominal de agua producto, lo cual hará que varíe el consumo específico.

Para decidirnos entre todas las opciones propuestas, nos fijaremos, al igual que en el apartado de selección del modelo de membranas, en las concentraciones del agua producto obtenida. También estudiaremos los consumos específicos obtenidos, que estarán disponibles en la pestaña “Resultados” de IMSDesign. Cabe destacar que, para obtener estos consumos, el programa supone los rendimientos y consumos de potencia de las bombas. Estos valores se calcularán en el Anexo III de este estudio. Obtenemos los siguientes resultados:

➤ 6 membranas, 45% de conversión (Figuras 14 y 15):

Concentración de permeado											
Ca	0,384	K	2,406	Sr	0,009	Cl	81,935	P04	0,000	CO2	7,766
Mg	1,309	NH4	0,000	HCO3	1,000	NO3	0,020	SiO2	0,003	CO3	0,000
Na	50,683	Ba	0,000	SO4	3,044	F	0,007	B	0,749	pH	5,3
Co	0,000	Cr	0,000	Fe	0,000	Br	0,003	TDS	141,55	mg/l	

Saturaciones del rechazo y parámetros							
CaSO4, %	53	SrSO4, %	77	Presión osmótica	52,1 bar	pH	7,3
BaSO4, %	148	SiO2, %	2	CCPP	96,70 mg/l	TDS	72432,8 mg/l
Ca3(PO4)2 SI	0,00	CaF2, %	151				

Figura 14: Concentraciones en el agua producto con 6 membranas y un 45% de conversión (Fuente: IMSDesign)

Cálculo de potencia			
		Paso1	ERD Impulsar
Bomba / incremento de presión	bar	68,2	1,7
Caudal de producto	m3/d	3500,0	
Caudal bomba	m3/d	3540,4	4237,5
Rendimiento bomba	%	97,0	87,0
Rendimiento motor	%	95,0	95,0
Eficiencia variador frecuencia	%	97,0	97,0
Potencia/etapa/paso	kw	347,9	10,7
	BHP	466,3	14,3
Potencia total de bombeo	kw	358,6	
Potencia específica de bombeo	kwh/m3	2,46	

Figura 15: Consumos energéticos para 6 membranas y un 45% de conversión (Fuente: IMSDesign)

➤ 7 membranas, 45% de conversión (Figuras 16 y 17):

Concentración de permeado											
Ca	0,450	K	2,820	Sr	0,010	Cl	96,009	P04	0,000	CO2	7,766
Mg	1,534	NH4	0,000	HCO3	1,172	NO3	0,023	SiO2	0,004	CO3	0,000
Na	59,389	Ba	0,000	SO4	3,567	F	0,008	B	0,874	pH	5,4
Co	0,000	Cr	0,000	Fe	0,000	Br	0,003			TDS	165,86 mg/l

Saturaciones del rechazo y parámetros							
CaSO4, %	53	SrSO4, %	77	Presión osmótica	52,0 bar	pH	7,3
BaSO4, %	148	SiO2, %	2	CCPP	96,62 mg/l	TDS	72418,1 mg/l
Ca3(P04)2 SI	0,00	CaF2, %	151				

Figura 16: Concentraciones en el agua producto con 7 membranas y un 45% de conversión (Fuente: IMSDesign)

Cálculo de potencia			
		Paso1	ERD Impulsar
Bomba / incremento de presión	bar	64,9	1,9
Caudal de producto	m ³ /d	3500,0	
Caudal bomba	m ³ /d	3540,7	4237,1
Rendimiento bomba	%	87,0	87,0
Rendimiento motor	%	95,0	95,0
Eficiencia variador frecuencia	%	97,0	97,0
Potencia/etapa/paso	kw	331,1	11,8
	BHP	443,8	15,8
Potencia total de bombeo	kw	342,9	
Potencia específica de bombeo	kwh/m³	2,35	

Figura 17: Consumos energéticos para 7 membranas y un 45% de conversión (Fuente: IMSDesign)

Como podemos ver, para el caso de las 6 membranas, obtenemos 0,749 mg/L de Boro, 141,55 mg/L de TDS (Figura 14) y un consumo específico de 2,46 kWh/m³ (Figura 15). Para el de 7 membranas, obtenemos 0,874 mg/L de Boro, 165,86 mg/L de TDS (Figura 16) y un consumo específico de 2,35 kWh/m³ (Figura 17). Ambos con una conversión del 45%. El consumo específico es el aspecto más importante de este estudio. Por ello, iteramos con la conversión de la opción de 7 membranas hasta obtener un consumo específico igual al de 6, pero que convertirá un mayor porcentaje de agua. Esto lo lograremos aumentando el porcentaje de conversión, ya que las bombas tendrán que consumir más potencia. Como podremos observar en la Figura 19, el consumo energético con 7 membranas se igualará al de 6 membranas con un 50% de conversión.

➤ 7 membranas, 50% de conversión (Figuras 18 y 19):

Concentración de permeado											
Ca	0,487	K	3,050	Sr	0,011	Cl	103,860	P04	0,000	CO2	7,766
Mg	1,660	NH4	0,000	HCO3	1,267	NO3	0,025	SiO2	0,004	CO3	0,000
Na	64,244	Ba	0,000	S04	3,859	F	0,008	B	0,935	pH	5,4
Co	0,000	Cr	0,000	Fe	0,000	Br	0,003			TDS	179,41 mg/l
Saturaciones del rechazo y parámetros											
CaSO4, %	60	SrSO4, %	87	Presión osmótica	57,4 bar	pH	7,4				
BaSO4, %	166	SiO2, %	2	CCPP	116,57 mg/l	TDS	79873,4 mg/l				
Ca3(PO4)2 SI	0,00	CaF2, %	233								

Figura 18: Concentraciones en el agua producto con 7 membranas y un 50% de conversión (Fuente: IMSDesign)

Cálculo de potencia		Paso1	ERD Impulsar
Bomba / incremento de presión	bar	68,9	1,6
Caudal de producto	m ³ /d	3500,0	
Caudal bomba	m ³ /d	3533,3	3466,7
Rendimiento bomba	%	87,0	87,0
Rendimiento motor	%	95,0	95,0
Eficiencia variador frecuencia	%	97,0	97,0
Potencia/etapa/paso	kw	350,8	8,2
	BHP	470,2	11,0
Potencia total de bombeo	kw	359,0	
Potencia específica de bombeo	kwh/m ³	2,46	

Figura 19: Consumos energéticos para 7 membranas y un 50% de conversión (Fuente: IMSDesign)

Como podemos observar, la opción de 7 membranas con un 50% de conversión nos da 0,935 mg/L de Boro, 179,41 mg/L de TDS (Figura 18) y un consumo específico de 2,46 kWh/m³ (Figura 19), al igual que en la opción de 6 membranas con una conversión del 45%.

Nº de membranas	% de conversión	Boro (mg/L)	TDS (mg/L)	Consumo específico (kWh/m ³)
6	45	0,749	141,55	2,46
7	45	0,874	165,86	2,35
7	50	0,935	179,41	2,46

Tabla 3: Tabla resumen para cada opción de membranas y % de conversión (Fuente: Elaboración propia)

A partir de la Tabla 3, en cuanto a las concentraciones en el agua producto, las tres opciones son válidas, ya que ninguna excede de 1 mg/L de Boro, y en cuanto al TDS las tres tienen valores muy parecidos. Por lo tanto, tomaremos la decisión basándonos en el consumo específico y en el porcentaje de conversión. En un principio, parece ser más favorable la opción de 7 membranas con una conversión del 50%, porque se consume la misma energía que con la opción de 6 membranas con el 45% de conversión, mientras que se produce un 5% más de agua.

Hay que tener en cuenta, como se ha mencionado anteriormente, que estos cálculos se han realizado empleando los valores estándar para el recuperador de energía que nos proporciona el programa informático. En el siguiente apartado dimensionaremos el intercambiador de presión para las tres opciones que se han estudiado hasta ahora y, una vez dimensionado, emplearemos los resultados para recalcular con IMSDesign, lo cual nos llevará a la decisión final para la elección de nuestro sistema de desalación.

3. Dimensionado del recuperador de energía

Para el recuperador de energía, y como ya se ha comentado en la Memoria de este estudio, se empleará el intercambiador de presión, ya que es la opción que se utiliza en los sistemas de desalación de simple etapa, como es el nuestro.

Realizaremos los cálculos con la ayuda de una hoja Excel del fabricante Energy Recovery (cuya interfaz se refleja en la Figura 20), empresa puntera en el desarrollo de sistemas de recuperación de energía. La hoja de cálculo estará disponible para descarga en su página web.

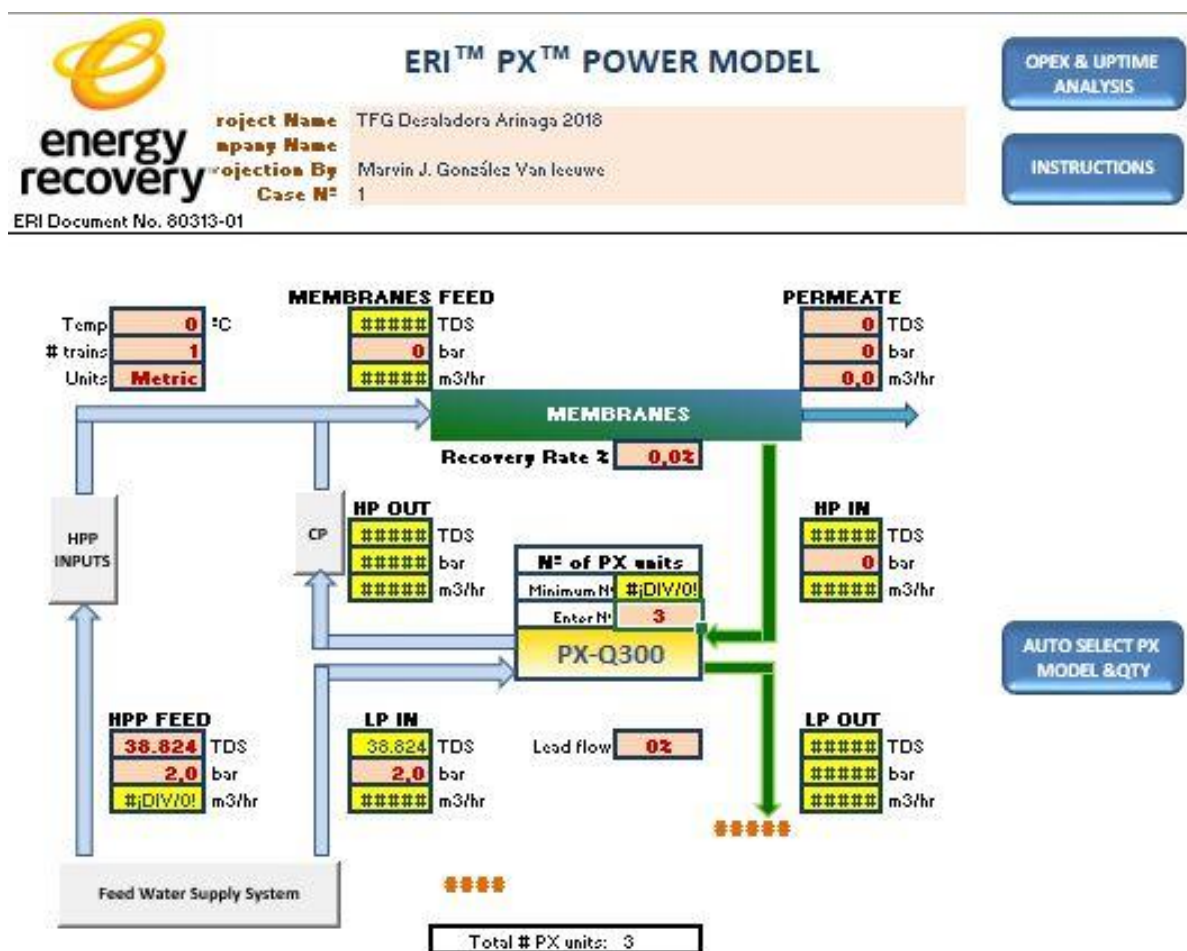


Figura 20: Interfaz inicial de la hoja de cálculo del intercambiador de presión de ER (Fuente: www.energyrecovery.com)

Hay dos colores de casillas de datos, unas sombreadas en amarillo y las otras en rojo. De las primeras se encarga la hoja de cálculo de determinarlos, y estos cálculos dependerán de los datos de entrada que demos, los cuales introduciremos en las casillas en rojo. Como podemos observar, necesitaremos la temperatura, el número de etapas, el porcentaje de conversión, el TDS

del agua producto y de alimentación, el caudal del agua producto y las presiones en varios puntos del sistema. Algunos datos ya los conocemos:

- 21°C como temperatura del agua de alimentación.
- 38.824 mg/L de TDS para el agua de alimentación. Para el agua producto varía según la opción.
- 3500 m³/día para el caudal de agua producto, que pasan a ser 145,83 m³/h de agua producto, lo cual reestablecerá automáticamente los caudales en las demás etapas. Para la hoja de cálculo los redondearemos a 146, valor con el que lo toma el IMSDesign.
- Conversión del 45% para 6 membranas y del 45 y 50% para 7 membranas, y 1 etapa en todos.
- El agua de entrada tendrá siempre una presión de 2 bar para evitar la cavitación en la bomba de alta presión (HPP). El agua producto siempre sale despresurizada (0 bar).

3.1. Obtención de parámetros con IMSDesign

Por otro lado, las presiones y caudales que aún no conocemos dependerán del número de membranas y el porcentaje de conversión, por lo que irán variando entre las tres opciones que hemos considerado. Estos valores los obtendremos de manera sencilla a partir de los diagramas de flujo que proporciona IMSDesign.

➤ 6 membranas, 45% de conversión (Figura 21):

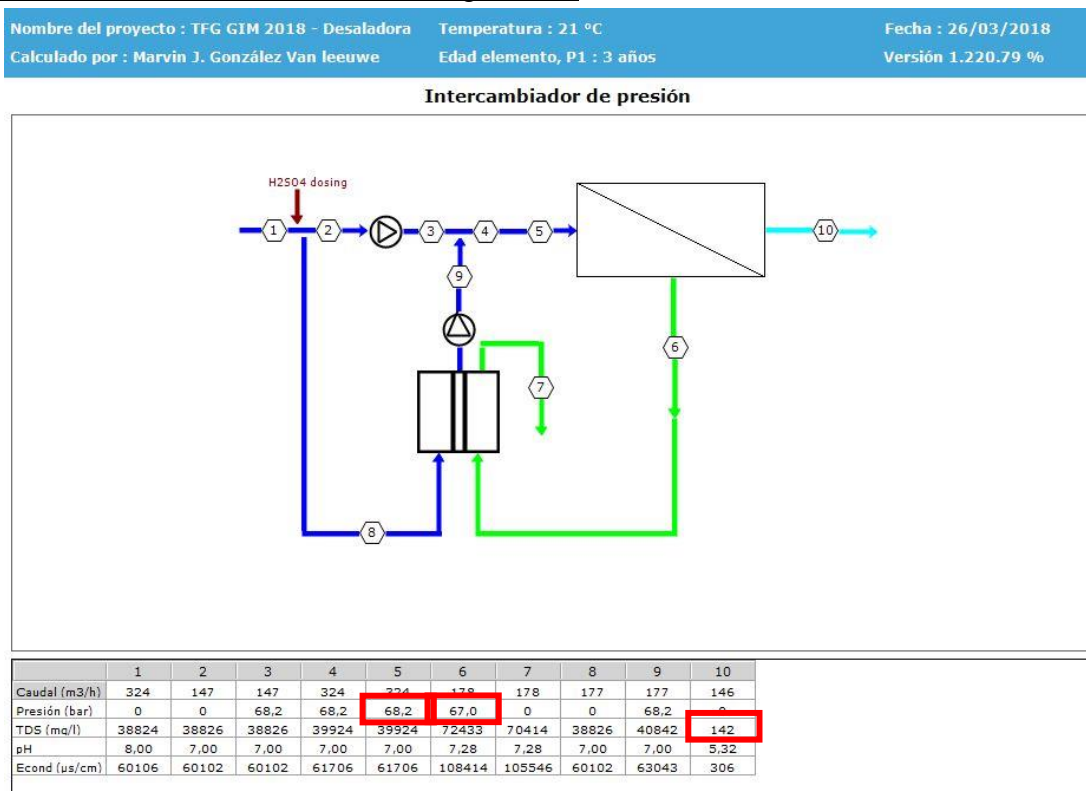


Figura 21: Diagrama de flujo con 6 membranas y 45 % de conversión (Fuente: IMSDesign)

Tenemos: 68,2 bar para la presión de entrada al bastidor de membranas, 142 mg/L de TDS para el agua producto y 67 bar para la presión del rechazo a la entrada del intercambiador de presión.

➤ 7 membranas, 45% de conversión (Figura 22):

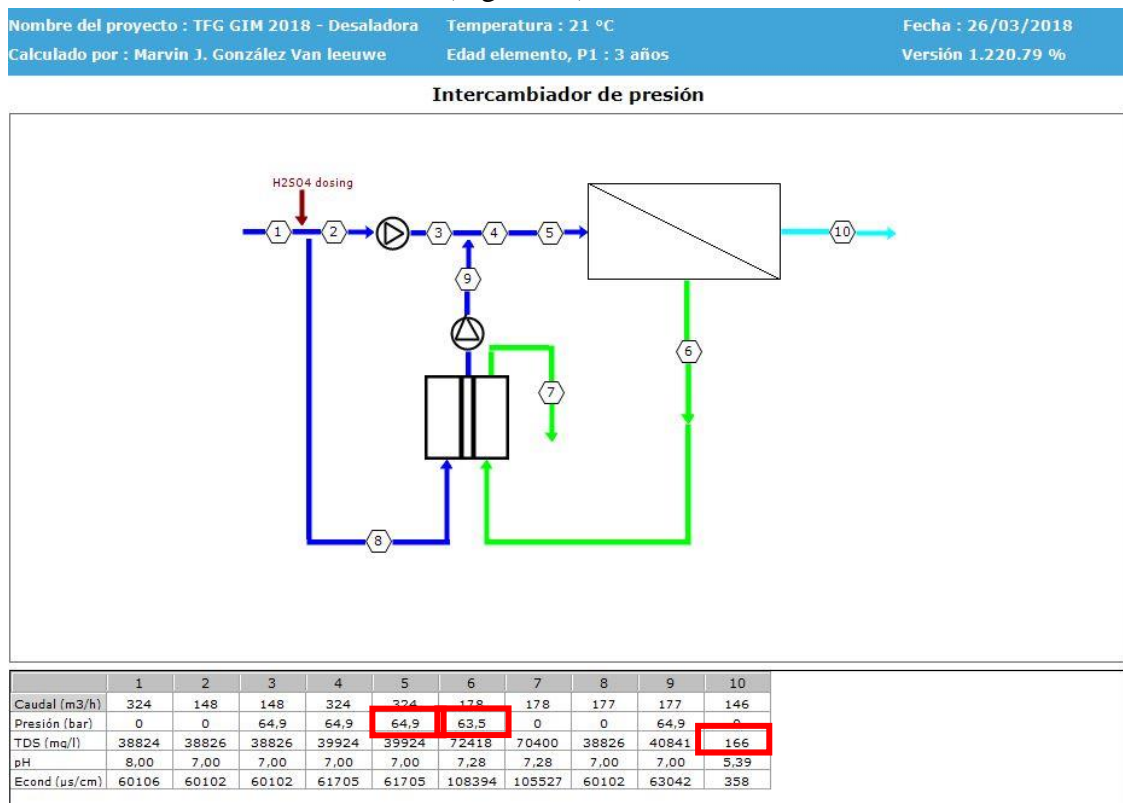


Figura 22: Diagrama de flujo con 7 membranas y 45 % de conversión (Fuente: IMSDesign)

Tenemos: 64,9 bar para la presión de entrada al bastidor de membranas, 166 mg/L de TDS para el agua producto y 63,5 bar para la presión del rechazo a la entrada del intercambiador de presión.

➤ 7 membranas, 50% de conversión (Figura 23):

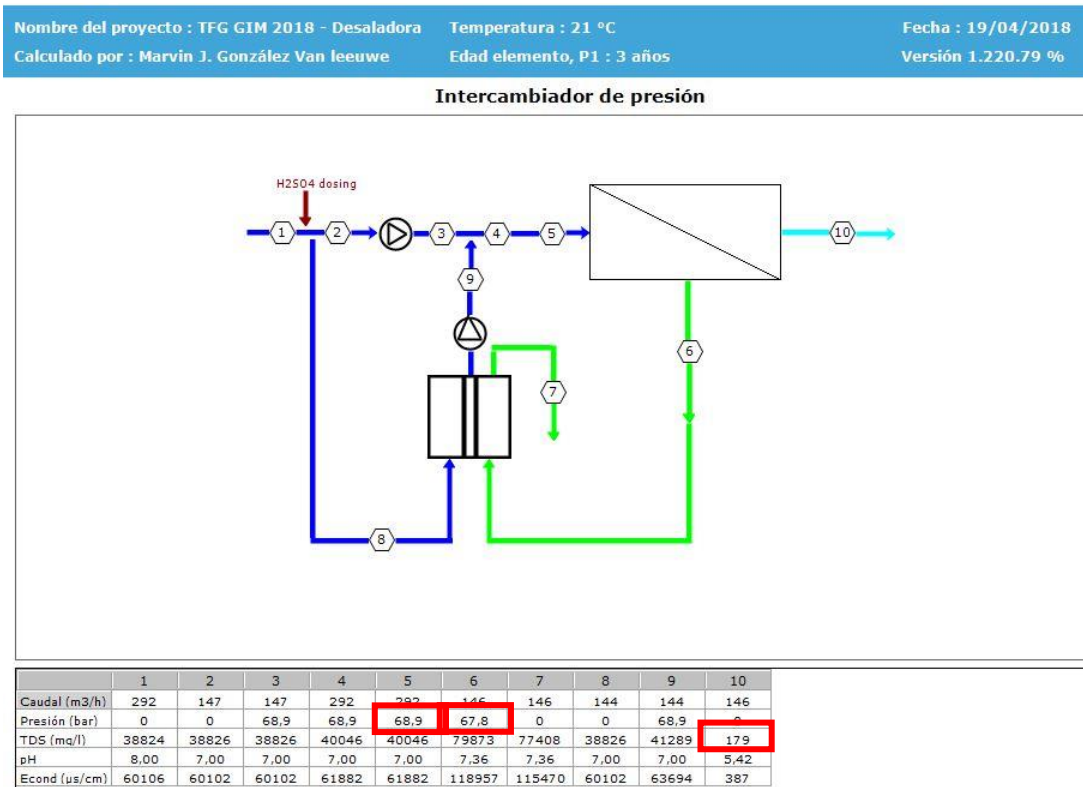


Figura 23: Diagrama de flujo con 7 membranas y 50% de conversión (Fuente: IMSDesign)

Tenemos: 68,9 bar para la presión de entrada al bastidor de membranas, 179 mg/L de TDS para el agua producto y 67,8 bar para la presión del rechazo a la entrada del intercambiador de presión. En la Tabla 4 se resumen los resultados obtenidos.

Configuración	Presión de entrada (bar)	TDS en agua producto (mg/L)	Presión de entrada al intercambiador (bar)
6 mem. 45%	68,2	142	67
7 mem. 45%	64,9	166	63,5
7 mem. 50%	68,9	179	67,8

Tabla 4: Tabla resumen de los resultados obtenidos con las 3 configuraciones diferentes (Fuente: Elaboración propia)

3.2. Introducción de datos en la hoja de cálculo

Una vez que tenemos estos datos, los introduciremos en la hoja de cálculo y obtendremos los resultados en un cuadro amarillo en la parte inferior. Cabe destacar que hemos optado por el modelo PX-Q300 al ser ampliamente utilizado en instalaciones de este tipo (según las fuentes consultadas y según el propio fabricante, Energy Recovery). La hoja de cálculo, una vez introducidos todos los parámetros, nos recomendará la cantidad mínima de unidades necesarias del modelo para el correcto funcionamiento del sistema de recuperación de energía.

En las siguientes figuras vemos los datos introducidos en la hoja de cálculo:

- 6 membranas, 45% de conversión (Figura 24):

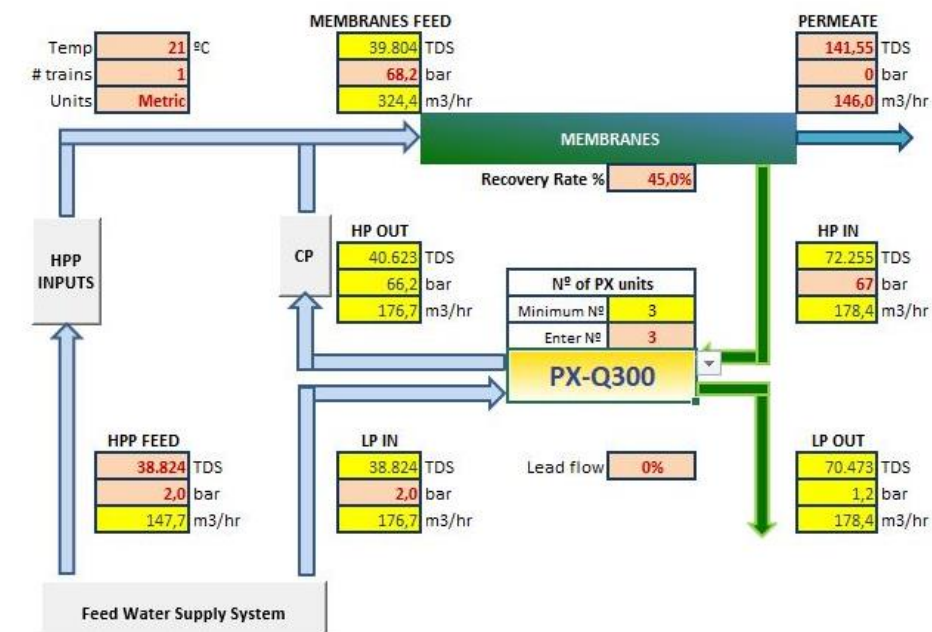


Figura 24: Datos introducidos para 6 membranas y un 45% de conversión (Fuente: Excel ER)

➤ 7 membranas, 45% de conversión (Figura 25):

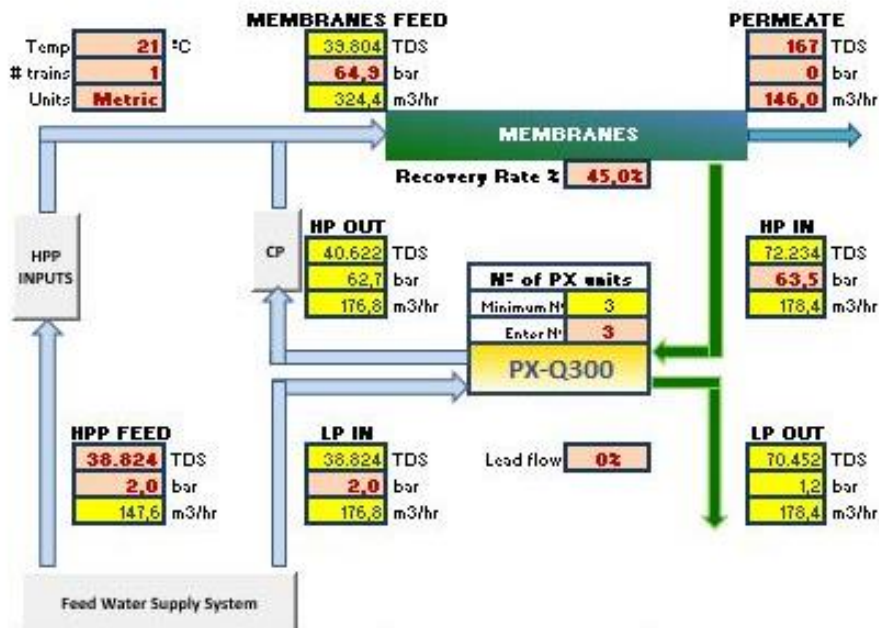


Figura 25: Datos introducidos para 7 membranas y un 45% de conversión (Fuente: Excel ER)

➤ 7 membranas, 50% de conversión (Figura 26):

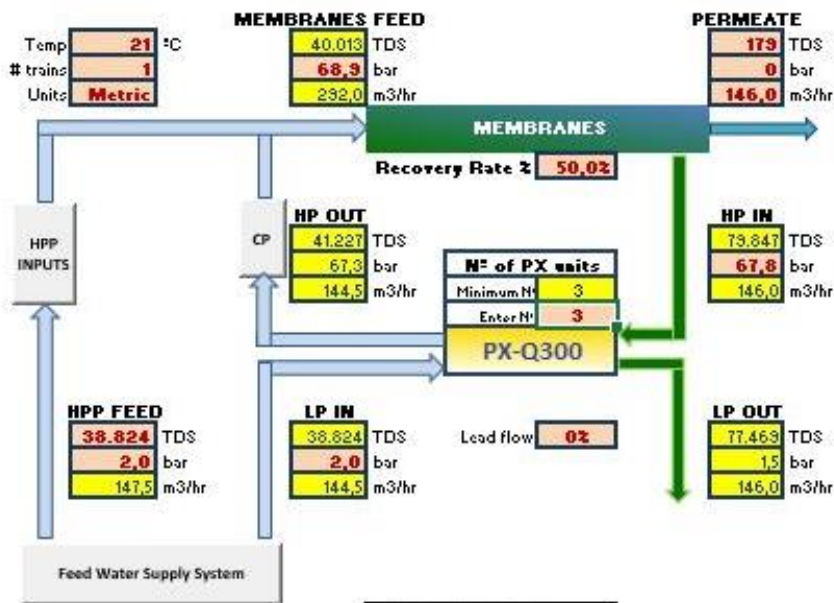


Figura 26: Datos introducidos para 7 membranas y un 50% de conversión (Fuente: Excel ER)

3.3. Análisis de los resultados obtenidos

Una vez introducidos los datos, la hoja de cálculo nos proporcionará varios parámetros importantes del intercambiador de presión. A nosotros nos interesan aquellos que se tienen que introducir en IMSDesign, que son el porcentaje de fuga, la mezcla volumétrica y la diferencia de presiones entre la entrada y la salida de la alta presión del intercambiador.

En las siguientes figuras podremos observar los resultados obtenidos para cada opción estudiada:

- 6 membranas, 45% de conversión (Figura 27):

PX Technology Performance	
PX unitary flow	59,5 m3/hr
Salinity Increase at membranes	2,5%
Volumetric mixing VM	5,4%
Lubrication flow (LF) per PX array	1,7 m3/hr
LF as % of concentrate flow	1,0%
HP DP	0,8 bar
LP DP	0,8 bar
RO Specific Energy **	2,74 kWh/m3
Efficiency	96,86%

** Does not Include Feedwater Supply Pump Energy consumption

Figura 27: Resultados del intercambiador de presión para 6 membranas y 45% de conversión (Fuente: Excel ER)

- 7 membranas, 45% de conversión (Figura 28):

PX Technology Performance	
PX unitary flow	59,5 m3/hr
Salinity Increase at membranes	2,5%
Volumetric mixing VM	5,4%
Lubrication flow (LF) per PX array	1,6 m3/hr
LF as % of concentrate flow	0,9%
HP DP	0,8 bar
LP DP	0,8 bar
RO Specific Energy **	2,61 kWh/m3
Efficiency	96,77%

** Does not Include Feedwater Supply Pump Energy consumption

Figura 28: Resultados del intercambiador de presión para 7 membranas y 45% de conversión (Fuente: Excel ER)

- 7 membranas, 50% de conversión (Figura 29):

PX Technology Performance	
PX unitary flow	59,5 m ³ /hr
Salinity Increase at membranes	2,5%
Volumetric mixing VM	5,4%
Lubrication flow (LF) per PX array	1,7 m ³ /hr
LF as % of concentrate flow	1,0%
HP DP	0,8 bar
LP DP	0,8 bar
RO Specific Energy**	2,76 kWh/m³
Efficiency	96,88%

** Does not Include Feedwater Supply Pump Energy consumption

Figura 29: Resultados del intercambiador de presión para 7 membranas y 50% de conversión (Fuente: Excel ER)

Configuración	Consumo específico (kWh/m ³)
6 mem. 45%	2,74
7 mem. 45%	2,61
7 mem. 50%	2,76

Tabla 5: Tabla resumen de los resultados obtenidos para cada configuración junto con el intercambiador de presión (Fuente: Elaboración propia)

Como podemos ver en la Tabla 5, la opción de 7 membranas y un 45% de conversión es la que menor consumo energético tiene, un total de 2,61 kWh/m³. Sin embargo, tenemos que tener en cuenta que este consumo se ha obtenido suponiendo los rendimientos y consumos de potencia de las bombas del núcleo de desalación, que serían la bomba de alta presión (HPP) y la bomba Booster. Otro punto a favor de las 7 membranas es que se consumirá menor caudal de alimentación (292 m³/h frente a 324 m³/h), lo cual dará lugar a que las bombas que impulsan el agua por los tramos de tuberías consuman menos.

Por otro lado, el 45% de conversión es aceptable para este tipo de instalaciones desaladoras, por lo que no hay necesidad de aumentar la conversión si esto supone un aumento del consumo específico.

Por ello, optaremos por la opción de 7 membranas y un 45% de conversión. Para tener otra fuente de la que extraer resultados, introduciremos los resultados del intercambiador de presión para esta opción en IMSDesign, y veremos qué consumos nos da este programa. Hay que tener en cuenta que aquí también se dan por supuestos los rendimientos de las bombas del núcleo de desalación. Como podemos ver en las Figuras 30 y 31, IMSDesign nos da un consumo de 2,35 kWh/m³, algo menor que la hoja de cálculo de Energy Recovery.

Cálculos ERD	
<input checked="" type="radio"/> Intercambiador de presión <input type="radio"/> Turbo	
Fuga	0,90 %
Mezcla volumétrica	5,40 %
H.P. diferencial	0,80 bar
Bomba booster	2,23 bar

Figura 30: Datos finales del intercambiador de presión introducidos (Fuente: IMSDesign)

Cálculo de potencia		Paso1	ERD Impulsar
Bomba / incremento de presión	bar	64,7	2,2
Caudal de producto	m ³ /d	3500,0	
Caudal bomba	m ³ /d	3536,5	4241,3
Rendimiento bomba	%	87,0	87,0
Rendimiento motor	%	95,0	95,0
Eficiencia variador frecuencia	%	97,0	97,0
Potencia/etapa/paso	kw	329,7	13,7
	BHP	441,9	18,3
Potencia total de bombeo	kw	343,3	
Potencia específica de bombeo	kwh/m ³	2,35	

Figura 31: Resultados de consumo de 7 membranas y 45% de conversión en IMSDesign (Fuente: IMSDesign)

Hasta el momento, con rendimientos de bombas supuestos, las características de nuestro sistema de desalación son las que se indican en la Tabla 6.

Tipo de sistema	Osmosis inversa	
Capacidad [m³/día]	3500	
Número de etapas (bastidor)	1	
Número de tubos de presión	36	
Número de membranas por tubo	7	
Número total de membranas	252	
Conversión	45%	
Fabricante de membrana	Hydranautics	
Modelo de membrana	SWC4 MAX	
Fabricante del intercambiador de presión	Energy Recovery	
Modelo de intercambiador de presión	PX-Q300	
Consumo específico [kWh/m³]	IMSDesign	ER Excel
	2,35	2,61

Tabla 6: Características finales del sistema con rendimientos de bombas supuestos (Fuente: Elaboración propia)

Los rendimientos reales y consumos de las bombas se calcularán en el Anexo III. Una vez hecho esto, en el apartado final de ese mismo Anexo se recalculará el consumo específico de la planta con esos resultados, quedando así finalizado el cálculo del consumo energético. En el Anexo IV se dimensionará el sistema eólico en base a los valores obtenidos.

4. Prueba con bastidor de membranas híbridas

En este último apartado del Anexo II se detallará una prueba que se realizó con distintas configuraciones de membranas híbridas en el bastidor. Es decir, en un mismo tubo de presión se emplearon modelos diferentes de membranas de Hydranautics a la vez. Realizando esta prueba, podremos estudiar si la opción de membranas híbridas sería mejor para el sistema, y habría que desechar la decisión inicial de colocar un solo modelo (SWC4 MAX) en todo el bastidor.

Para ello, se seleccionaron los modelos SWC4 MAX y SWC5 MAX, ya que la serie 6 había sido descartada desde un inicio debido a su menor rechazo de sales y producción nominal. Se combinarán las series 4 y 5 de varias maneras. Además, se realizará la prueba con el sistema de desalación que más favorable salió en los cálculos de este presente Anexo, que sería la opción de 1 etapa, 6 ó 7 membranas y un 45% de conversión. Los valores del intercambiador de presión obtenidos para este sistema y el análisis químico del agua empleado también se mantendrán.

Las SWC4 MAX se colocarán las primeras en la serie de 7 membranas, ya que las primeras membranas del tubo de presión son las que más agua convierten y, por tanto, las más importantes del proceso. Además, este modelo nos dio las mejores concentraciones para agua potable, lo cual hace que sea muy idónea su colocación al inicio de los tubos de presión donde, como ya se ha mencionado, se convierte la mayor parte del agua producto que finalmente se obtiene. En las membranas posteriores colocaremos las SWC5MAX.

Para esta prueba, hemos empleado un total de tres combinaciones posibles:

- Combinación 1: 6 membranas; tres SWC4 MAX y tres SWC5 MAX.
- Combinación 2: 6 membranas; dos SWC4 MAX y cuatro SWC5 MAX.
- Combinación 3: 7 membranas; cuatro SWC4 MAX y tres SWC5 MAX.

En las siguientes Figuras (32, 33 y 34), podremos observar las concentraciones en el agua producto para cada combinación empleada:

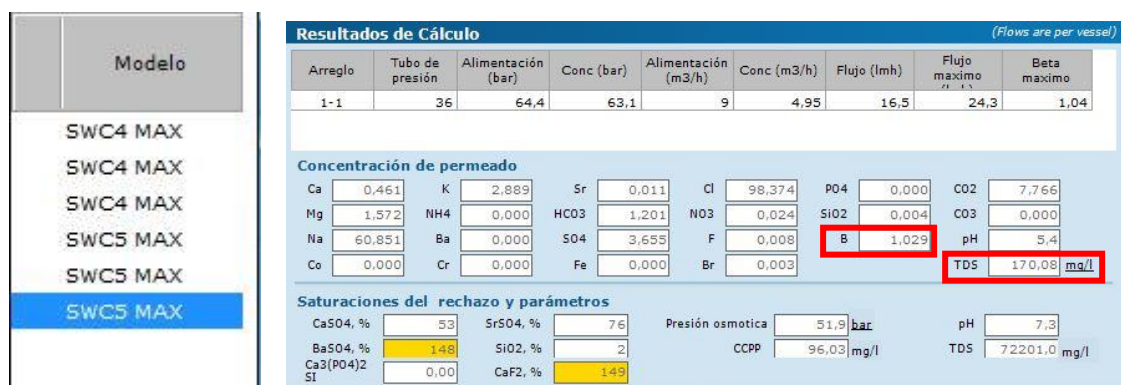


Figura 32: Concentraciones en el agua producto con la Combinación 1 (Fuente: IMSDesign)

Modelo	Resultados de Cálculo <small>(Flows are per vessel)</small>								
	Arreglo	Tubo de presión	Alimentación (bar)	Conc (bar)	Alimentación (m3/h)	Conc (m3/h)	Flujo (lmh)	Flujo máximo	Beta máximo
SWC4 MAX	1-1	36	63,4	62,1	9	4,95	16,5	23,6	1,05
SWC4 MAX									
SWC5 MAX									
SWC5 MAX									
SWC5 MAX									

Concentración de permeado											
Ca	0,486	K	3,049	Sr	0,011	Cl	103,833	P04	0,000	C02	7,766
Mg	1,659	NH4	0,000	HCO3	1,267	NO3	0,025	SiO2	0,004	C03	0,000
Na	64,228	Ba	0,000	SO4	3,858	F	0,008	B	1,114	pH	5,4
Co	0,000	Cr	0,000	Fe	0,000	Br	0,003			TDS	179,55 mg/l

Saturaciones del rechazo y parámetros							
CaSO4, %	53	SrSO4, %	76	Presión osmótica	51,9 bar	pH	7,3
BaSO4, %	148	SiO2, %	2	CCPP	96,00 mg/l	TDS	72195,0 mg/l
Ca3(P04)2 SI	0,00	CaF2, %	149				

Figura 33: Concentraciones en el agua producto con la Combinación 2 (Fuente: IMSDesign)

Modelo	Resultados de Cálculo <small>(Flows are per vessel)</small>								
	Arreglo	Tubo de presión	Alimentación (bar)	Conc (bar)	Alimentación (m3/h)	Conc (m3/h)	Flujo (lmh)	Flujo máximo	Beta máximo
SWC4 MAX	1-1	36	62,1	60,6	9	4,95	14,1	22,7	1,04
SWC4 MAX									
SWC4 MAX									
SWC4 MAX									
SWC5 MAX									
SWC5 MAX									

Concentración de permeado											
Ca	0,527	K	3,305	Sr	0,012	Cl	112,534	P04	0,000	C02	7,766
Mg	1,798	NH4	0,000	HCO3	1,373	NO3	0,027	SiO2	0,004	C03	0,000
Na	69,610	Ba	0,000	SO4	4,182	F	0,009	B	1,156	pH	5,5
Co	0,000	Cr	0,000	Fe	0,000	Br	0,003			TDS	194,54 mg/l

Saturaciones del rechazo y parámetros							
CaSO4, %	53	SrSO4, %	76	Presión osmótica	51,9 bar	pH	7,3
BaSO4, %	148	SiO2, %	2	CCPP	95,95 mg/l	TDS	72186,6 mg/l
Ca3(P04)2 SI	0,00	CaF2, %	149				

Figura 34: Concentraciones en el agua producto con la Combinación 3 (Fuente: IMSDesign)

En cuanto a los consumos específicos obtenidos, fueron 2,34 kWh/m³ para la Combinación 1, 2,30 kWh/m³ para la Combinación 2 y 2,26 kWh/m³ para la combinación 3. En la Tabla 7 se resumen las características de mayor importancia a la hora de estudiar estas opciones, que serían las concentraciones de Boro y TDS, y el consumo específico energético.

Combinación	Boro (mg/L)	TDS (mg/L)	Consumo específico (kWh/m ³)
1	1,029	170,08	2,34
2	1,114	179,55	2,30
3	1,156	194,54	2,26

Tabla 7: Características más importantes para cada combinación de membranas híbridas (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede observar, empleando el modelo SWC5MAX en nuestros tubos, el agua producto siempre excede el 1 mg/L de Boro, en las tres combinaciones. Este parámetro es el parámetro más importante a tener en cuenta al producir agua para consumo humano.

Por otro lado, introduciendo el SWC5MAX en nuestros tubos, el consumo energético desciende (pero de forma poco notable, la que más la combinación 3 con 2,26 kWh/m³, con 7 membranas y una conversión del 45%). Con sólo SWC4MAX, teníamos un consumo de 2,35 (según IMSDesign), por lo que ahorraríamos 0,09 kWh/m³ con nuestro bastidor híbrido.

Éste es un ahorro insignificante si tomamos en cuenta que, cuando nuestra planta entre en funcionamiento, se tendrá la obligación de tener que realizar reemplazos periódicos de las membranas, ya que estas se van desgastando, o algunas requieren ser extraídas del tubo de presión para recibir labores de mantenimiento. Con la opción híbrida, se tendrá que tener 2 modelos diferentes siempre disponibles en el inventario, lo cual aumentará los costes de la planta.

Si unimos este problema a la concentración con la que obtenemos el agua producto (la cual no es la deseable para abastecimiento de consumo humano), la opción de emplear tan solo el SWC4MAX, que fue la inicial, parece más viable para nuestra planta y para los objetivos de este estudio, que son la obtención de un agua apta para consumo humano y una buena eficiencia energética.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO III

**CÁLCULOS PARA EL
DIMENSIONAMIENTO DE TUBERÍAS,
BOMBAS Y TRATAMIENTOS. CONSUMO
ESPECÍFICO FINAL**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO
CON ENERGÍA EÓLICA PARA ABASTECIMIENTO HUMANO
EN GRAN CANARIA**

AUTOR: Marvin Jozef González Van Ieewe

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE - ANEXO III

1. Introducción	1
2. Dimensionamiento del sistema de captación	2
2.1. Tipo de captación (Pozos)	3
2.2. Número total de pozos de captación y colocación en el espacio	3
2.3. Dimensionamiento de los pozos de captación.....	4
3. Dimensionamiento de las longitudes de las tuberías y su colocación en el terreno	8
3.1. Longitud y cotas de altura de las tuberías de captación	8
3.2. Longitud y cotas de altura de la tubería de alimentación.....	8
3.3. Longitud y cotas de altura de la tubería de distribución	9
3.4. Longitud y cotas de altura de la tubería de rechazo de salmuera.....	12
4. Dimensionamiento de los diámetros de las tuberías	14
4.1. Elección del material de las tuberías y diámetros nominales	14
4.2. Cálculos de los diámetros de las tuberías	17
5. Dimensionamiento del pretratamiento.....	19
5.1. Pretratamiento físico	19
5.2. Pretratamiento químico	20
6. Dimensionamiento del postratamiento.....	21
7. Cálculo de las pérdidas de carga en la instalación.....	22
7.1. Pérdidas de carga en las tuberías	22
7.2. Pérdidas de carga en los accesorios de las tuberías	25
7.3. Pérdidas de carga totales.....	27

8. Dimensionamiento de las bombas de la instalación.....	29
8.1. Procedimientos de selección de las bombas.....	29
8.1.1. Balance de energía	29
8.1.2. Curvas características y punto de operación	31
8.1.3. Cavitación	33
8.2. Bombas de captación.....	35
8.2.1. Cálculos para la bomba de captación	35
8.2.2. Selección de la bomba de captación	36
8.3. Bomba de distribución	40
8.3.1. Cálculos para la bomba de distribución	40
8.3.2. Selección de la bomba de distribución.....	41
8.4. Bomba de rechazo de salmuera.....	45
8.4.1. Cálculos para la bomba de rechazo.....	45
8.5. Bomba de alta presión (HPP)	46
8.5.1. Cálculos para la bomba de alta presión (HPP).....	46
8.5.2. Selección de la bomba de alta presión (HPP)	47
8.6. Bomba Booster.....	49
8.6.1. Cálculos para la bomba Booster.....	49
8.6.2. Selección de la bomba Booster	50
8.7. Resumen de las bombas del sistema.....	53
9. Cálculo del consumo específico final de la EDAM	54
9.1. Consumo específico final con ERI.....	54
9.2. Consumo específico final con IMSDesign.....	55
9.3. Consumo específico final con las potencias de las bombas	56

Índice de figuras – Anexo III

Figura 1: Esquema de una captación cerrada mediante pozos (Fuente: www.civilgeeks.com).....	2
Figura 2: Esquema de la colocación de los pozos de captación y del punto colector (Fuente: Elaboración propia).....	4
Figura 3: Emplazamiento de la EDAM y de los pozos de captación (Fuente: Grafcan)	5
Figura 4: Perfil longitudinal del terreno entre los pozos de captación y el nivel del mar (Fuente: Goolzoom).....	7
Figura 5: Distancia en metros desde los pozos de captación hasta la EDAM (Fuente: Goolzoom)	9
Figura 6: Descripción del suelo en el que se construiría el depósito regulador de nuestra EDAM (Fuente: Grafcan)	10
Figura 7: Longitud de la tubería de distribución desde la EDAM hasta el depósito regulador (Fuente: Goolzoom)	11
Figura 8: Perfil longitudinal del terreno en el tramo aproximado desde la EDAM hasta el depósito regulador (Fuente: Goolzoom)	11
Figura 9: Distancia desde la EDAM hasta la isobata de -20 metros (Fuente: Grafcan)	12
Figura 10: Altura de la EDAM sobre el nivel del mar (Fuente: Goolzoom)	13
Figura 11: Lista de aplicaciones que puede tener una tubería (Fuente: www.asetub.es).....	15
Figura 12: Lista de fabricantes recomendados por AseTUB para nuestra EDAM (Fuente: www.asetub.es)	16
Figura 13: Lista de diámetros nominales que emplearemos para las tuberías de nuestra EDAM (Fuente: Flowtite).....	16
Figura 14: Diagrama de flujo obtenido para nuestro sistema de desalación (Fuente: IMSDesign)	17
Figura 15: Valor de pH del agua producto de nuestra EDAM (Fuente: IMSDesign).....	21
Figura 16: Interfaz del buscador "Grundfos Webcaps" (Fuente: www.product-selection.grundfos.com)	31
Figura 17: Interfaz del buscador "Wilo-Select 4" (Fuente: www.wilo-select.com)	32
Figura 18: Punto de corte de una bomba hidráulica (Fuente: www.ingenieriamantenimiento.org)	33

Figura 19: Curvas características obtenidas para la bomba Grundfos SP 160-4-AA-200203B4 (Fuente: Grundfos Webcaps)	37
Figura 20: Imagen de la bomba Grundfos SP 160-4-AA-200203B4 (Fuente: Grundfos Webcaps)	37
Figura 21: Curvas características obtenidas para la bomba sumergible Wilo K8.130 (Fuente: Wilo-Select 4)	38
Figura 22: Imagen de la bomba sumergible Wilo K8.130 (Fuente: Wilo-Select 4)	38
Figura 23: Curvas características obtenidas para la bomba Grundfos CR 150-6 (Fuente: Grundfos Webcaps).....	42
Figura 24: Imagen de la bomba Grundfos CR 150-6 (Fuente: Grundfos Webcaps)	42
Figura 25: Curvas características obtenidas para la bomba Wilo SiBoost Smart 4 Helix V 5206/2 (Fuente: Wilo-Select 4).....	43
Figura 26: Imagen de la bomba Wilo SiBoost Smart 4 Helix V 5206/2 (Fuente: Wilo-Select 4)	43
Figura 27: Interfaz del buscador online de KSB (Fuente: KSB Easysselect)	47
Figura 28: Curvas características obtenidas para la bomba KSB CA 125-10.2 (Fuente: KSB Easysselect)	48
Figura 29: Imagen de la bomba KSB CA 125-10.2 (Fuente: KSB Easysselect).....	48
Figura 30: Curvas características obtenidas para la bomba Grundfos NB 100-200/191 A-F2-A-E-BAQE (Fuente: Grundfos Webcaps).....	51
Figura 31: Imagen de la bomba Grundfos NB 100-200/191 A-F2-A-E-BAQE (Fuente: Grundfos Webcaps).....	51
Figura 32: Curvas características obtenidas para la bomba Etaline 150-150-200 (Fuente: KSB Easysselect)	52
Figura 33: Imagen de la bomba Etaline 150-150-200 (Fuente: KSB Easysselect)	52
Figura 34: Introducción de los rendimientos reales de la HPP y la Bomba Booster en el Excel de ERI (Fuente: Energy Recovery).....	54
Figura 35: Consumo final obtenido con el Excel de ERI (Fuente: Energy Recovery).....	55
Figura 36: Consumo final obtenido con el software de Hydranautics (Fuente: IMSDesign).....	55

Índice de tablas – Anexo III

Tabla 1: Estadísticas de bajamares y pleamares en el puerto de Las Palmas entre 1992 y 2013 (Fuente: REDMAR)	6
Tabla 2: Caudales para todas las tuberías de la EDAM (Fuente: Elaboración propia)	18
Tabla 3: Resultados para el diámetro de las tuberías de la EDAM(Fuente: Elaboración propia). 18	
Tabla 4: Propiedades físicas del agua a 1 bar de presión (Fuente: www.monografías.com)	23
Tabla 5: Datos y resultados para el cálculo del n° de Reynolds (Fuente: Elaboración propia).....	23
Tabla 6: Datos y resultados para iterar y obtener el coeficiente de fricción (Fuente: Elaboración propia)	24
Tabla 7: Datos y resultado para las pérdidas de carga en las tuberías de la instalación (Fuente: Elaboración propia)	25
Tabla 8: Valores de K para varios accesorios (Fuente: "Mecánica de Fluidos Incompresibles y Turbomáquinas hidráulicas". Agüera Soriano)	26
Tabla 9: Datos y resultados para las pérdidas de carga por accesorios en la tubería de captación (Fuente: Elaboración propia).....	26
Tabla 10: Datos y resultados para las pérdidas de carga por accesorios en la tubería de distribución (Fuente: Elaboración propia).....	27
Tabla 11: Suma de todas las pérdidas de carga en tuberías y en accesorios de la instalación (Fuente: Elaboración propia).....	27
Tabla 12: Resultados finales para las pérdidas de carga en nuestra instalación desaladora (Fuente: Elaboración propia)	28
Tabla 13: Valores empleados para el balance de energía de la bomba de captación (Fuente: Elaboración propia)	35
Tabla 14: Tabla resumen de los modelos de bomba de captación (Fuente: Elaboración propia) .	39
Tabla 15: Valores empleados para el balance de energía de la bomba de distribución (Fuente: Elaboración propia)	40
Tabla 16: Tabla resumen de los modelos de bomba de distribución (Fuente: Elaboración propia)	44
Tabla 17: Valores empleados para el balance de energía de la bomba de rechazo (Fuente: Elaboración propia)	45

Tabla 18: Valores empleados para el balance de energía de la bomba de alta presión (Fuente: Elaboración propia).....	46
Tabla 19: Valores empleados para el balance de energía de la bomba Booster (Fuente: Elaboración propia).....	49
Tabla 20: Tabla resumen de los modelos de bomba Booster (Fuente: Elaboración propia)	53
Tabla 21: Tabla resumen de los modelos de bombas que se emplearán en nuestra EDAM (Fuente: Elaboración propia)	53
Tabla 22: Tabla de consumos específicos de cada bomba (Fuente: Elaboración propia).....	56

1. Introducción

El objetivo final de este Anexo será el dimensionamiento de las bombas de la EDAM para así poder obtener el consumo específico final. Para ello, necesitaremos conocer la altura proporcionada por cada bomba, que se extraerá de las variaciones de alturas de cota, presión y velocidad que se produzcan en la parte correspondiente de la instalación. Para las tuberías de toda la EDAM también se definirán sus longitudes, diámetros y colocaciones sobre el terreno (se harán tramos aproximados).

Además, también necesitaremos las pérdidas de carga para cada tramo de tuberías que una bomba alimente. Así, en el presente Anexo III se detallarán todos los cálculos y resultados pertenecientes a los siguientes sistemas:

- Captación
 - Sistema de captación
 - Tuberías de captación
- Alimentación
 - Tubería de alimentación
 - Pretratamiento (físico y químico)
- Distribución
 - Tubería de distribución
 - Postratamiento
- Rechazo de salmuera
 - Tubería de rechazo de salmuera

Una vez calculados y dimensionados todos estos elementos, y habiendo obtenido las pérdidas de carga, se dimensionarán las bombas de captación, de distribución y de rechazo. Además, también dimensionaremos las bombas propias del núcleo de desalación, que son la bomba de alta presión (HPP) y la bomba Booster. Se excluye el dimensionado de otras bombas que necesitaría el sistema como, por ejemplo, bombas para productos de limpieza. El motivo de no tomarlas en cuenta en los cálculos es que sus consumos tienen muy poca influencia sobre el consumo total de la planta desaladora y, por lo tanto, pueden ser considerados como despreciables para nuestros cálculos.

Así, obtendremos los rendimientos y consumos reales de estas máquinas, lo cual nos llevará al cálculo final del consumo específico de la EDAM, cuya obtención es el objetivo final de los Anexos II y III.

Para no mezclar procedimientos de cálculo y ecuaciones diferentes entre sí, los dimensionamientos del Anexo III se ordenarán de la siguiente manera: sistema de captación, tuberías (todas), pretratamiento, postratamiento y, finalmente, bombas del sistema (todas).

2. Dimensionamiento del sistema de captación

Para ello, tendremos que definir el tipo de captación por el que optaremos y cuántas tomas se realizarán, para posteriormente dimensionar el sistema.

Emplearemos un sistema de captación cerrada mediante pozos aislados. Se ha optado por este tipo de captación porque se caracteriza por una mayor limpieza del agua frente a los sistemas de captación abierta. Debido a la acción de filtrado que realiza el terreno de manera natural, el agua entrará al pozo con índices bajos de colmatación (SDI) y turbidez (NTU), lo cual será muy beneficioso ya que implica menor necesidad de pretratamiento (se ahorrarán costes y materiales).

Por otro lado, esta acción de filtrado también implica la ausencia de actividad biológica y orgánica, ambos muy nocivos para la vida útil de las membranas del núcleo de desalación. Las temperaturas del agua no presentarán grandes variaciones (dando por buena nuestra aproximación de los 21 °C), y habrá un bajo contenido de oxígeno (menos oxidación de la maquinaria). Por lo tanto, se podría decir que nuestra agua de captación tendría una buena calidad, beneficiosa para el equipamiento de la EDAM, lo que supone un ahorro en los sistemas de pretratamiento (sobre todo el químico).

Sin embargo, este tipo de captación también presenta algunos inconvenientes, aunque tendrán poca influencia sobre el funcionamiento eficiente de nuestra planta. Habrá una cantidad notable de elementos indeseables tales como el hierro, el aluminio, el flúor, etc. que deberán ser eliminados mediante pretratamiento. También se contará con la presencia de, por ejemplo, pesticidas, al estar la EDAM cercana a zonas de uso agrícola. Por último, la composición del agua química experimentará variaciones a lo largo del tiempo.

Por todo ello, escogemos la captación cerrada mediante pozos (Figura 1), al ser la más beneficiosa para el destino del agua de captación, que son las membranas del núcleo de desalación.

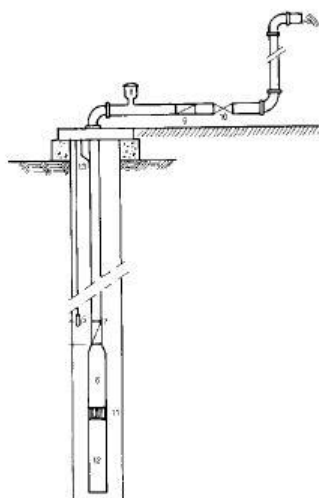


Figura 1: Esquema de una captación cerrada mediante pozos (Fuente: www.civilgeeks.com)

2.1. Tipo de captación (Pozos)

Para ello, se emplearán máquinas de perforación, que perforarán hasta una profundidad en la que haya una suficiente permeabilidad del terreno que nos garantice la obtención del caudal necesario.

Las bombas empleadas en estos pozos, las bombas de captación, serán sumergibles y siempre deben de estar por debajo del nivel del agua para su correcto funcionamiento. La razón de esta necesidad constructiva y de operación es el evitar el fenómeno de cavitación, el cual implicaría la aparición de burbujas de gas o de vapor en el líquido. Produce efectos muy perjudiciales en la bomba, como por ejemplo la formación de picaduras en la superficie interior de ésta. Un inconveniente de estas bombas es que presentan menores rendimientos que otro tipo de bombas disponibles en el mercado, pero son las más adecuadas para el tipo de captación por el que hemos optado.

Cabe destacar que los pozos se colmatarán con el tiempo y perderán su calidad. Una solución podría ser aumentar el pretratamiento, pero normalmente resulta más viable anular el pozo colmatado y construir un pozo nuevo en otra zona que no esté saturada.

Cuando las desaladoras son muy grandes, no se suelen emplear pozos ya que su limitación radica en el bajo caudal de agua que proporcionan. Para aumentar dicho caudal, se requieren estructuras con una obra civil mucho más compleja, por lo que se opta por tomas abiertas, que dan lugar a un agua de peor calidad y así a un incremento de los costes de pretratamiento debido a la alta actividad biológica. Para nuestra EDAM, una toma abierta es inviable, por lo que se escoge la cerrada por pozos. Hay que asegurar que la zona en la que se construyan sea accesible con maquinaria.

2.2. Número total de pozos de captación y colocación en el espacio

Según la bibliografía consultada, para instalaciones desaladoras que funcionan en rangos de producción nominal entre los que se encuentra nuestra EDAM (algunas situadas aquí en Canarias), se aconseja el uso de un total de tres pozos de captación. Dos funcionarán de manera continua, y el tercero actuará como pozo de reserva para aquellos periodos en los que se realice mantenimiento o haya paradas no deseadas en los dos pozos de funcionamiento continuo. Esto implicará la necesidad de un total de tres bombas de captación. En el apartado 9.3 de este Anexo III se justifica la implantación de las bombas de reserva.

Como se ha mencionado anteriormente, se tendrá un pozo de reserva para así evitar inconvenientes o perjuicios económicos a la hora de paradas en la planta u oscilaciones indeseadas en la producción, lo cual además podría dar lugar a daños severos en los equipos. Otra razón para disponer de pozo de reserva es el hecho de que se evite la sobreexplotación de un solo pozo y de una sola bomba de captación.

Además, es probable que un solo pozo no sea capaz de alimentar a la planta desaladora con el caudal necesario para su producción. Así, el caudal se distribuirá equitativamente entre los dos pozos de captación principales mientras que el pozo de reserva se empleará en casos específicos, como la disminución del caudal de uno de los pozos principales o la aparición de fallos en las bombas.

Como se puede apreciar en la Figura 2, los tres pozos se colocarán en forma de cruz, y se unirán todos en un mismo punto central (punto colector o unión colectora). Esta disposición constructiva es la más simple, ya que se necesitará un mínimo de longitud de tubería, al unirse todas en línea recta en un punto. La distancia de cada pozo al punto colector será de 20 metros, considerada suficiente para que no haya problemas constructivos ni operativos entre los pozos.

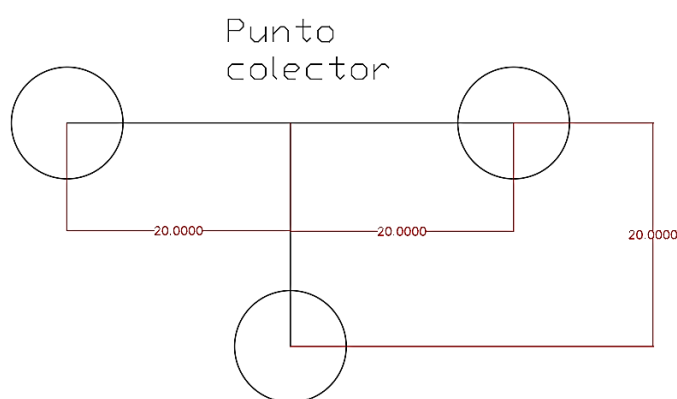


Figura 2: Esquema de la colocación de los pozos de captación y del punto colector (Fuente: Elaboración propia)

Para lograr implantar los pozos y decidir su ubicación, se requerirá de un estudio y análisis complejos del terreno de estudio, todo llevado a cabo por especialistas en este tipo de materias. Debido al alcance limitado de este estudio, se omitirá la inclusión de estos procedimientos en los cálculos de este Anexo. Se tomará la suposición de que el terreno alrededor de nuestra EDAM es apto para la colocación de pozos de captación y que además tiene la permeabilidad necesaria a la profundidad a la que dimensionaremos nuestros pozos de captación en el siguiente sub-apartado de este capítulo.

2.3. Dimensionamiento de los pozos de captación

En el apartado de emplazamiento de la Memoria de este estudio, se especifica el emplazamiento exacto de nuestra EDAM y de todas sus instalaciones, entre las que se encuentran los pozos de captación. Para ello, se ha empleado la herramienta online Grafcan, con la cual se ha hecho un estudio de los tipos de suelo en la zona de implantación y de las edificaciones cercanas, a partir del cual se ha decidido dónde colocar las instalaciones de la EDAM. En la Figura 3 podemos apreciar, una vez más, el emplazamiento de la EDAM y los pozos de captación.



Figura 3: Emplazamiento de la EDAM y de los pozos de captación (Fuente: Grafcan)

Como se puede ver, los pozos de captación se encuentran bastante cerca de la costa, lo cual implicará que probablemente no necesiten de una gran profundidad para poder extraer agua de forma eficiente. Por otro lado, también se sitúa justo al lado de la EDAM, lo cual trae consigo un ahorro considerable en las tuberías de alimentación al necesitar poca longitud, que se dimensionarán en otro apartado de este Anexo. También son accesibles por maquinaria al estar al lado de una carretera asfaltada.

Para calcular la profundidad total de nuestros pozos de captación, tendremos que tener en cuenta cuatro variables:

- La bajamar máxima de la zona
- La altura máxima a la que estarán situados los pozos sobre el nivel del mar
- Las pérdidas de carga debidas a la filtración del terreno
- Las pérdidas de altura o de carga que surgen por el cono de succión que se forma cuando la bomba aspira el agua del pozo.

Analicemos cada variable por separada:

➤ Bajamar máxima

Para obtenerla, se ha estudiado un informe realizado por REDMAR (Red de Mareógrafos de Puertos del Estado), el cual refleja los niveles de mar y marea entre los años 1992 y 2013, todo medido en el puerto de Las Palmas. Al ser en la misma isla y en la vertiente este, como el emplazamiento de nuestra EDAM (Arinaga), daremos por válidos estos valores de mareas para nuestros cálculos.

Para nuestros pozos, nos interesa conocer la bajamar máxima, ya que esto nos indicará de forma directa la pérdida de altura (carga) máxima que podríamos esperar por este fenómeno. En la Tabla 1 se puede observar que la bajamar máxima en el periodo de tiempo estudiado fue de 146 cm, es decir, 1,46 metros.

	Niveles (cm)							
	Observados				Marea astronómica			
	Máx	Mín	Med	D.E.	Máx	Mín	Med	D.E.
Pleamar	319	169	239	27	311	173	238	26
Bajamar	146	0	77	26	141	13	78	25
Pleamar viva	319	244	278	16	311	246	276	15
Bajamar viva	112	0	43	17	73	13	45	14
Pleamar muerta	258	169	199	12	223	173	198	11
Bajamar muerta	146	82	116	12	141	95	116	10

Tabla 1: Estadísticas de bajamares y pleamares en el puerto de Las Palmas entre 1992 y 2013 (Fuente: REDMAR)

➤ Altura de los pozos sobre el nivel del mar

Para obtenerla, empleamos la herramienta gráfica Goolzoom, la cual nos proporcionará las medidas del perfil longitudinal del terreno entre la localización de los pozos y el mar. Realizando la medida, reflejada en la Figura 4, resulta que los pozos de captación se encuentran a una altura aproximada de 5 metros sobre el nivel del mar.

Cabe destacar que la localización inicial que se tomó para los pozos de captación (descrita en la Memoria en el apartado de emplazamiento), fue desechada durante este procedimiento, el cálculo del perfil longitudinal del terreno. Se observó que entre los pozos y la EDAM se hallaba un gran número de pendientes muy pronunciadas, lo cual daría lugar a problemas a la hora de colocar las tuberías de alimentación. Por ello, se decidió elevar los pozos de captación hasta terminar al lado de la EDAM, en una zona relativamente llana.



Figura 4: Perfil longitudinal del terreno entre los pozos de captación y el nivel del mar (Fuente: Goolzoom)

➤ Pérdidas de carga debido a la filtración del terreno

Se estiman en 1 metro, a partir de lo extraído de la bibliografía consultada para este fenómeno.

➤ Pérdidas de carga debido al cono de succión que genera la bomba

También se estima en 1 metro, nuevamente guiados por las fuentes consultadas.

Una vez que ya tenemos todos estos datos de altura, se procede a sumarlos todos y se obtiene que el nivel más bajo de agua que se tendrá en los pozos de captación será de 8,46 metros. Para un correcto funcionamiento del sistema de captación, las bombas de captación sumergibles deberán de estar situadas por debajo de este nivel.

Además, nos interesa aumentar esta profundidad para poder disponer de un margen de seguridad para aquellos casos en los que el nivel del agua dentro de los pozos disminuya más de lo esperado, en los cuales queremos evitar que la bomba quede por encima del agua.

Por ello, seleccionaremos una profundidad de 20 metros para nuestros pozos de captación. Así, las bombas sumergibles aprovecharán la columna de agua superior. Hay que tener en cuenta que el aumento en longitud de las tuberías de captación tiene una influencia despreciable sobre las pérdidas de carga de éstas, por lo que el aumento de la profundidad de los pozos no es un hecho que afecte de forma severa a nuestros cálculos y al gasto energético de nuestra EDAM.

3. Dimensionamiento de las longitudes de las tuberías y su colocación en el terreno

Tendremos que dimensionar las longitudes de un total de 3 tuberías de captación (al haber 3 pozos), 1 de alimentación, 1 de distribución y 1 de rechazo de salmuera. Con ello, definiremos automáticamente sus colocaciones en el terreno mediante tramos aproximados.

Lo haremos, nuevamente, con la herramienta online Goolzoom, estudiando el perfil longitudinal del terreno a estudiar. Aprovechando que estamos trabajando con esta herramienta, también definiremos las diferencias de cotas de altura entre los puntos iniciales y finales de las tuberías. Estas diferencias de cotas las necesitaremos posteriormente a la hora de operar con los balances de energía de las bombas, lo cual haremos en el apartado 7 de este Anexo, en el que dimensionaremos dichas máquinas hidráulicas.

3.1. Longitud y cotas de altura de las tuberías de captación

Para ello, se tendrán que calcular sus longitudes a partir de la profundidad de los pozos de captación y la distancia de éstos hasta el punto colector.

Sabemos que los pozos de captación tendrán una profundidad de 20 metros. Por otro lado, también se sabe que la distancia de cada pozo al punto colector es de 20 metros. Por lo tanto, el dimensionamiento de la longitud de las tuberías de captación es bastante simple: se suman ambos valores. Así, las tuberías de captación de nuestra EDAM tendrán, cada una, una longitud de 40 metros.

Por otro lado, en cuanto a la diferencia de cota entre el inicio y el final de las tuberías de captación, ésta será igual a la profundidad de los pozos. Es decir, 20 metros. El tramo desde el punto colector hasta los pozos lo consideramos horizontal, por lo que no se incrementará o reducirá la diferencia de altura en cuanto las tuberías salgan de los pozos de captación.

En resumen, las tuberías de captación serán, cada una, de una longitud de 40 metros y tendrán una diferencia de cota entre el punto inicial (bomba de captación sumergida en el pozo) y el final (punto colector) de 20 metros.

3.2. Longitud y cotas de altura de la tubería de alimentación

Esta tubería viaja desde el punto colector entre los pozos de captación hasta la entrada de nuestra EDAM, en donde se situará la bomba de alta presión de la instalación. Cabe destacar que

antes de llegar a esta entrada, el agua de alimentación pasará por un pretratamiento, el cual dimensionaremos más adelante, en otro apartado de este Anexo.

En la Figura 5, observaremos que la distancia desde el punto colector de los pozos de captación, hasta la EDAM, es de aproximadamente 165 metros según el tramo estimado que se ha dibujado (los aumentaremos a 170 metros). Por lo tanto, establecemos que la longitud de las tuberías de alimentación de nuestra instalación será de 170 metros.



Figura 5: Distancia en metros desde los pozos de captación hasta la EDAM (Fuente: Goolzoom)

Por otro lado, la diferencia de cota entre el inicio de la tubería de alimentación y su final es nula, ya que el tramo entre el punto colector y la entrada a la EDAM lo consideramos horizontal.

En resumen, sabemos que la tubería de alimentación tendrá una longitud de 170 metros y que no tendrá diferencia de altura alguna.

3.3. Longitud y cotas de altura de la tubería de distribución

La idea inicial para la tubería de distribución, fue la de enviar al agua producto hacia una depuradora que se encuentra justo al lado de la EDAM. Esta opción evitaría la necesidad de incorporar un postratamiento a nuestras instalaciones, resultado así en un ahorro de cálculo y dimensionamientos.

Sin embargo, se descartó esta opción por falta de tiempo y porque se da por hecho que la depuradora ya tiene una capacidad limitada, la cual estará en uso y por lo tanto no es suficiente para tratar el agua de nuestra EDAM.

Por ahora, estudiaremos nuestro propio sistema de distribución. Además, los cálculos del sistema de postratamiento no son demasiado engorrosos y, como no se han tenido en cuenta los costes para este proyecto, no tiene mucho impacto sobre nuestro estudio la incorporación de esta etapa a nuestro sistema.

Ahora, pasaremos a definir la longitud de las tuberías de distribución de nuestra EDAM. Para ello, tendremos que decidir qué depósito regulador ya existente emplearemos para conservar nuestra agua producto. Tendremos en cuenta el requisito de buscar un depósito con gran altura sobre los núcleos poblacionales a abastecer, para así poder asegurar el abastecimiento por gravedad.

Recordemos que nuestro objetivo es el de abastecer las zonas de Polígono, Playa y Cruce de Arinaga. Éste último es el núcleo de población que a mayor altura sobre el nivel del mar se encuentra de los tres. Por lo tanto, buscaremos un depósito regulador que esté a una cota superior que la de esta zona.

Visitamos la página web de Aguas Gran Canaria para extraer alguna información sobre pozos reguladores ya existentes. También buscamos en la página web de los Planes Territoriales para Gran Canaria. Sin embargo, no encontramos nada sobre depósitos reguladores, tomaremos la suposición de que se realizará la construcción de nuevos pozos reguladores para nuestra EDAM. Se colocarán a mayor altura de cota que la zona de Cruce de Arinaga.

Estudiando la zona, se encuentra una parcela vacía. A través de la herramienta gráfica Grafcan, se observa en la Figura 6 que se trata de un suelo de cultivos abandonados, actualmente desaprovechado y al cual se le podría dar un mejor uso.



Figura 6: Descripción del suelo en el que se construiría el depósito regulador de nuestra EDAM (Fuente: Grafcan)

Con Goolzoom y realizando un tramo aproximado reflejado en la Figura 7, obtenemos que la longitud de tuberías desde la EDAM hasta el depósito regulador es de unos 5300 metros. Para mayor seguridad en los cálculos posteriores, redondearemos hacia arriba el valor conseguido. Así, tenemos 5,5 km de longitud para la tubería de distribución de nuestra EDAM.

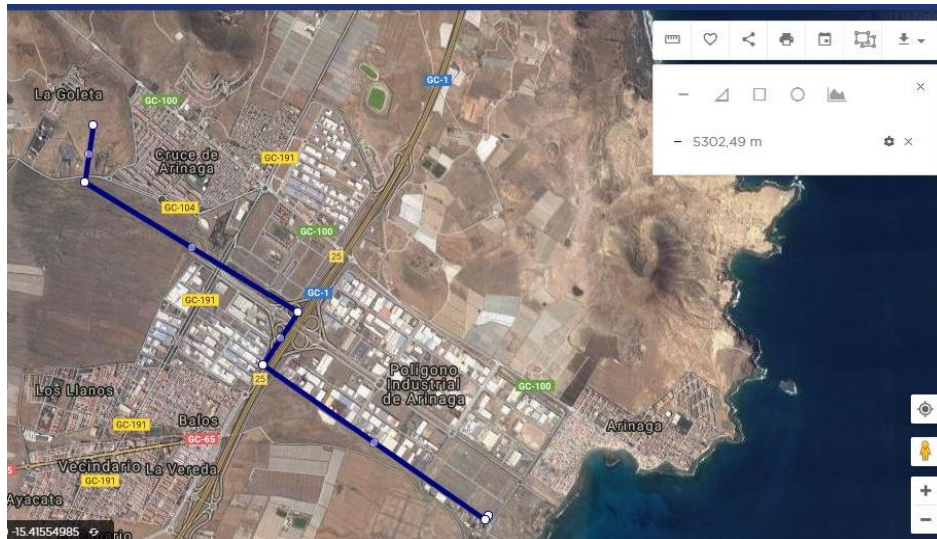


Figura 7: Longitud de la tubería de distribución desde la EDAM hasta el depósito regulador (Fuente: Goolzoom)

Por otro lado, en cuanto a la diferencia de altura entre el punto inicial de la tubería de distribución (salida de la EDAM) y el punto final (pozo regulador), el terreno longitudinal obtenido con Goolzoom en la Figura 8 nos dice que esta equivale a unos 98,58 metros. Redondeando, hablaríamos de 100 metros de diferencia de altura que tendría que vencer la bomba de distribución.

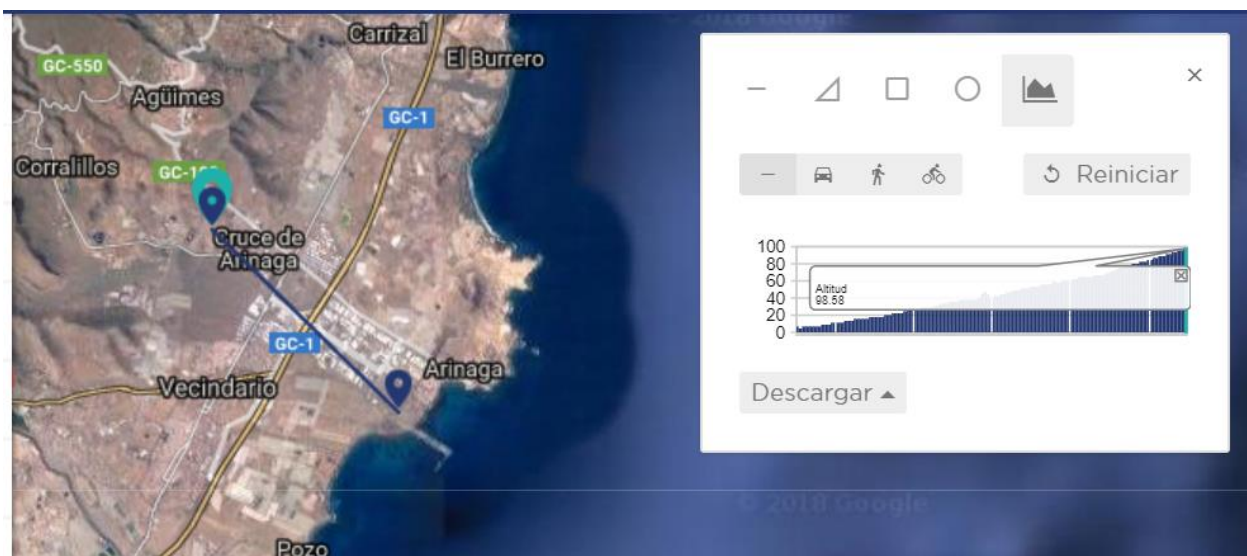


Figura 8: Perfil longitudinal del terreno en el tramo aproximado desde la EDAM hasta el depósito regulador (Fuente: Goolzoom)

En resumen, la tubería de distribución será de una longitud de 5500 metros y tendrá una diferencia de cota entre el punto inicial (salida de la EDAM) y el final (depósito regulador) de 100 metros.

Cabe destacar que nuestro pozo regulador tendrá un volumen de unos 500 m³, para asegurar el abastecimiento de los núcleos poblacionales objetivos en el caso de una parada de la EDAM. Se han tomado estas dimensiones en base al pozo regulador de la desaladora de Santa Cruz de Tenerife, cuyo pozo es de 2000 m³, un 10% de su capacidad (20.000 m³/día). Para nuestra EDAM, dicho porcentaje sería de 350 m³, pero para mayor seguridad redondeamos el volumen a 500 m³.

3.4. Longitud y cotas de altura de la tubería de rechazo de salmuera

Ahora, pasamos a definir las tuberías de rechazo de la salmuera de nuestras instalaciones. Para esta función, instalaremos un emisario submarino a cierta distancia de la costa. Tendremos que estudiar las isobatas presentes en las costas cercanas a la EDAM. Ésta deberá de estar lo suficientemente alejada de la costa y tener bastante profundidad, para así no interferir con la salinidad del agua que recoge el sistema de captación de nuestra EDAM. Sin embargo, para decidir la localización del punto de rechazo de la salmuera, habría que realizar un estudio más profundo y detallista de varios parámetros en relación con los ecosistemas, las aguas superficiales, etc. Por lo tanto, esta estimación de la colocación del emisario submarino será orientativa.

Según la bibliografía consultada, lo correcto es verter la salmuera desde un emisario con una profundidad mínima de entre 10 y 20 metros bajo el nivel del mar. Escogeremos la opción de 20 metros, para tener mayor seguridad. Las isobatas se estudiarán a partir de un mapa de barimetría generado por Grafcan, a partir de datos aportados por el Instituto Español de Oceanografía. En la Figura 9 vemos la distancia a la cual se encuentra la isobata -20 de la costa y de la EDAM.



Figura 9: Distancia desde la EDAM hasta la isobata de -20 metros (Fuente: Grafcan)

Como se puede apreciar, el emisario estará alejado unos 1930 metros de la costa, y su distancia a la EDAM será de unos 2375 metros. Redondearemos estos números hacia arriba para una mayor seguridad en los cálculos.

Así, establecemos que el emisario se encontrará a una profundidad de 20 metros bajo el nivel del mar, a una distancia de 2 km de la costa más cercana. La tubería de rechazo de salmuera será de unos 2500 metros, distancia que viajará desde la salida de la EDAM hasta el emisario submarino.

Ahora calcularemos la diferencia de cota entre la salida de la EDAM y el emisario submarino. Sabemos que éste se encuentra a -20 metros, por lo que solo queda calcular la distancia entre la EDAM y la costa, siguiendo el trayecto establecido para la tubería de rechazo. Lo haremos, al igual que en las demás tuberías de la instalación, obteniendo el perfil longitudinal del terreno con la herramienta gráfica online Goolzoom, reflejado en la Figura 10.

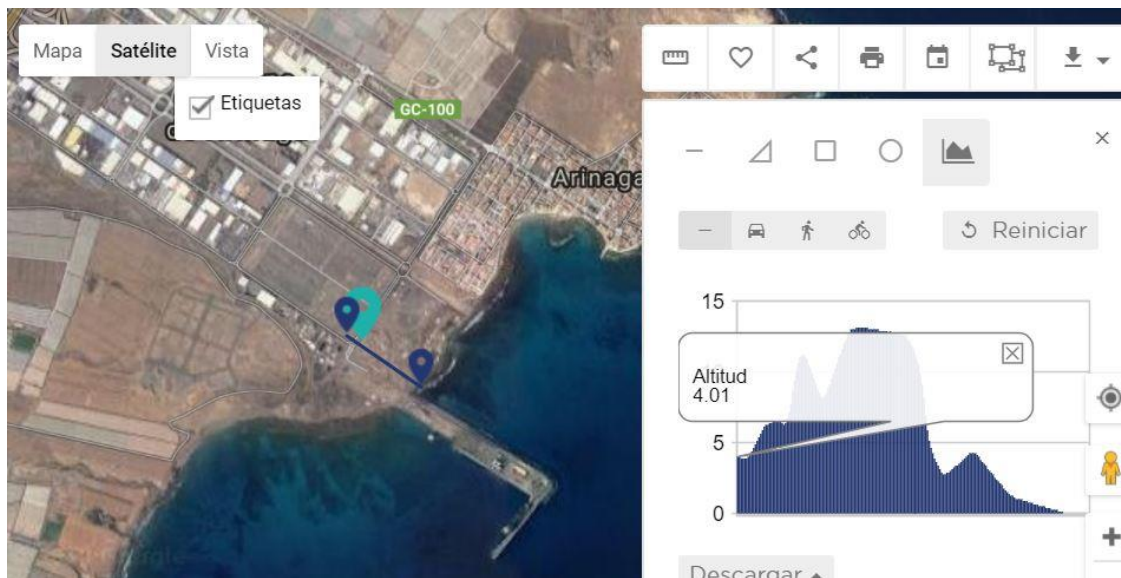


Figura 10: Altura de la EDAM sobre el nivel del mar (Fuente: Goolzoom)

Como se puede observar, la EDAM se encuentra unos 4 metros de altura sobre el nivel del mar. Por lo tanto, sumándolo a la profundidad del emisario, la tubería de rechazo descenderá unos 24 metros en altura. Lo redondearemos a 25 metros para mayor seguridad en los cálculos.

En resumen, la tubería de rechazo de salmuera de nuestra EDAM tendrá 2500 metros de longitud y descende 25 metros en altura.

4. Dimensionamiento de los diámetros de las tuberías

Ahora que ya conocemos las longitudes que tendrán todas las tuberías de la EDAM, el siguiente paso será el dimensionamiento de sus diámetros. Para ello, el primer paso será la selección del material del que estarán hechas. El motivo es que los fabricantes de tuberías ofrecen diámetros nominales según el material escogido, y debemos de escoger nuestros diámetros a partir de esta selección ofrecida.

Posteriormente, se obtendrá el diámetro mínimo teórico según el criterio de Bonet para los diámetros de tuberías hidráulicas. Estos valores se redondearán hacia arriba, guiándonos por la selección de diámetros nominales obtenida.

4.1. Elección del material de las tuberías y diámetros nominales

En este sub-apartado se realizará su elección, siendo el material resultante y los diámetros nominales los que emplearemos para todas las tuberías de la instalación (de captación, de alimentación, de distribución y de rechazo).

Comenzamos entrando a la página web de la Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos (AseTUB), la cual a su vez pertenece a la Asociación Española de Industriales de Plástico (ANAIP). En ella podremos encontrar a todos los fabricantes de tubos y accesorios plásticos presentes en el territorio nacional y, según las aplicaciones de sus productos, obtendremos una selección de las empresas que se dedican a la fabricación y distribución del tipo de tuberías que requerirá nuestra EDAM.

Como se podrá ver en la Figura 11, debemos de seleccionar la aplicación que tendrán las tuberías. Seleccionaremos la industrial, ya que nuestras instalaciones tienen esta aplicación.

Elija una aplicación: Aplicaciones industriales ▼

Elija un producto:

Buscar

Abastecimiento de agua

Agua reciclada/regenerada

Aguas de lluvia y tormenta

Aire comprimido

Aplicaciones industriales

Calefacción urbana - District heating

Canalización eléctrica

Circuitos de Climatización

Climatización radiante

Construcción naval

Drenaje

Emisarios submarinos

Evacuación aguas residuales

Frío comercial

Frío industrial

Gas

Gas - instalaciones receptoras

Gases medicinales

Geotermia

20 ▼

Empresa

Página web

Figura 11: Lista de aplicaciones que puede tener una tubería (Fuente: www.asetub.es)

También tenemos que seleccionar el material de la tubería. De todos los que se pueden emplear, escogemos el PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio), ya que es un material ampliamente empleado, según la bibliografía consultada, en instalaciones de este tipo.

Las ventajas de este material para tuberías son varias, entre las que destacan la alta resistencia mecánica y la alta resistencia a la corrosión (lo cual es sumamente importante ya que trabajaremos con agua con altos índices de sal). Además, presenta una alta ligereza (pesa 4 veces menos que las tuberías de acero o de fundición), una vida útil casi ilimitada (lo cual da lugar a poca necesidad de mantenimiento de las tuberías de la instalación) y tiene una superficie interior lisa (lo cual reducirá las pérdidas de carga a lo largo de la tubería y que además no presentará acumulación de lodos).

Otro aspecto a favor de este material es que las medidas estándar de longitud en las que los fabricantes las comercializan son mayores (varían entre los 6 y los 12 metros). Esto facilitará los trabajos de montaje ya que no habrá necesidad de juntar tantas tuberías en comparación al empleo de otros materiales en los que las medidas estándar serían menores, suponiendo mayor tiempo de construcción y un aumento de costes.

En la Figura 12 se podrán ver los fabricantes que nos ha recomendado AseTUB en base a la aplicación y el material que hemos escogido.

Elija una aplicación:

Elija un producto:

Mostrar #

Empresa	E-mail	Teléfono	Página web
Amiblu	info-es@amiblu.com	+34 977 470 777	www.amiantit.eu
Future Pipe Spain	spain@futurepipe.com	+34 937 798 888	www.futurepipe.com
Prefabricados Delta	apenalba@fcc.es	+34 915 300 047	www.prefabricadosdelta.com

Figura 12: Lista de fabricantes recomendados por AseTUB para nuestra EDAM (Fuente: www.asetub.es)

Como podemos ver, el buscador ofrecido por AseTUB nos propone tres fabricantes diferentes: Amiblu, Future Pipe Spain y Prefabricados Delta. Entrando a las páginas web de los tres, observamos que la empresa Amiblu (situada en Tarragona) distribuye los productos de la empresa Flowtite, la cual destaca por ser mundialmente la mayor distribuidora de tuberías y accesorios de PRFV. Escogeremos esta empresa como nuestra proveedora de tuberías.

Una vez seleccionados el material y la empresa, podremos consultar los diámetros nominales que nos ofrece Flowtite. Buscando en su página web, encontramos un catálogo online que ofrece una lista de diámetros nominales para tuberías de PRFV, reflejada en la Figura 13.

Diámetros

La tubería FLOWTITE se fabrica en los diámetros nominales (mm) que siguen, si bien se puede fabricar tubería de otros diámetros, hasta 3700 mm, bajo pedido:

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

Para otros diámetros consulte con el fabricante.

Figura 13: Lista de diámetros nominales que emplearemos para las tuberías de nuestra EDAM (Fuente: Flowtite)

Como se puede observar, mediante consulta con el fabricante de las tuberías, se pueden pedir otros diámetros de tuberías, que podrían ajustarse a nuestros próximos cálculos. Sin embargo, esto probablemente aumentaría los costes ya que se trataría de una fabricación a pedido. Por ello, escogeremos entre los diámetros nominales estándar que están listados por Flowtite.

4.2. Cálculos de los diámetros de las tuberías

Procedemos a calcular el diámetro mínimo teórico que necesitarán todas las tuberías de nuestra EDAM. Nos basaremos en el criterio de Bonet (Ecuación 1), que establece que el diámetro mínimo teórico se obtiene con la siguiente ecuación, en la cual el caudal (Q) se introducirá en m³/s, obteniéndose el diámetro mínimo teórico (D) en metros.

$$D_{min} = 0.835 * Q^{\frac{2}{5}}$$

Ecuación 1: Criterio de Bonet para el diámetro de una tubería hidráulica

Para ello, necesitaremos los caudales que circularán por las tuberías de la EDAM. Los extraeremos a partir del diagrama de flujo generado por IMSDesign, visible en la Figura 14. Hay que tener en cuenta que el caudal de alimentación pasará a ser dividido en dos cuando se considere el caudal de captación, ya que el agua proviene de dos pozos mientras que el tercero no aportará caudal debido a que tendrá la función de pozo de reserva. Por lo tanto, tan sólo estarán en funcionamiento dos de las tres bombas de captación durante las etapas de operación normal del sistema de captación y de la EDAM.

Con nuestro sistema de desalación de simple etapa, 7 membranas SWC4 MAX, 36 tubos de presión y un 45% de conversión, obtenemos el siguiente diagrama de flujo en IMSDesign:

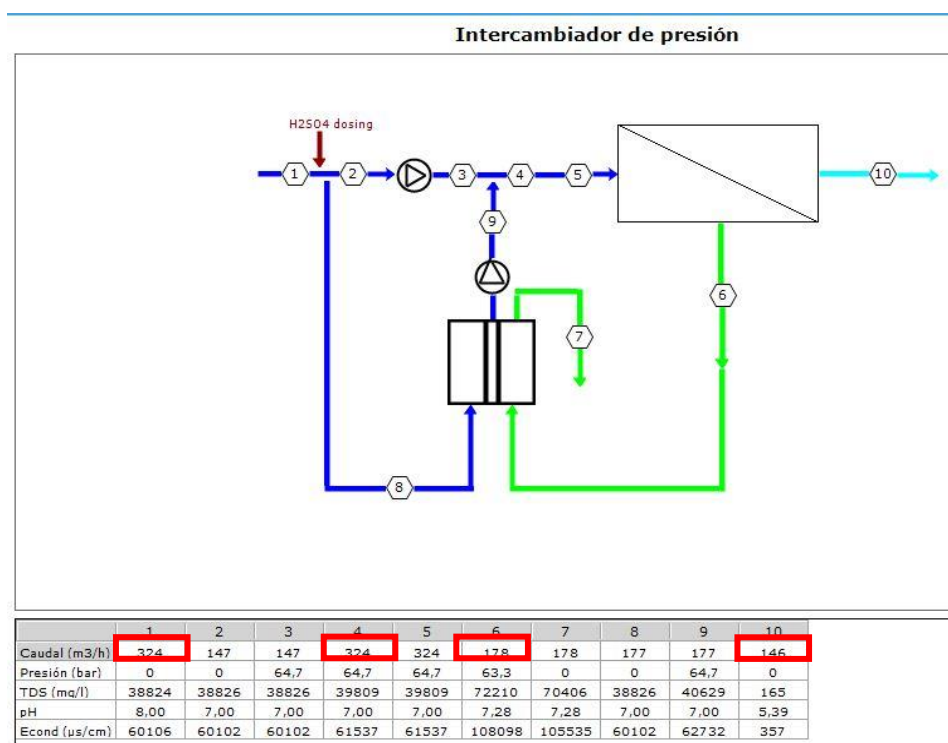


Figura 14: Diagrama de flujo obtenido para nuestro sistema de desalación (Fuente: IMSDesign)

Para la tubería de captación, necesitaremos el caudal de los tramos 1, 4 ó 5. Este será el caudal de alimentación de la EDAM, el cual tendremos que dividir entre dos. Es decir, los 324 m³/h para la alimentación significan que como caudal de captación se tendrán 162 m³/h por cada tubería.

Para la tubería de alimentación, escogemos uno de los tramos mencionados anteriormente, pero sin dividir entre 2. Obtenemos un caudal de 324 m³/h.

Para la tubería de distribución, escogeremos el caudal del agua producto (el tramo 10), que equivale a 146 m³/h.

Por último, para la tubería de rechazo de salmuera empleamos el caudal de los tramos 6 ó 7, que es de 178 m³/h.

Para poder ser introducidos en la Ecuación 1, pasaremos todos estos caudales a m³/s, dividiendo entre 3600 (al haber tantos segundos en 1 hora), reflejados en la Tabla 2.

Tuberías de la instalación	Caudal (m ³ /h)	Caudal (m ³ /s)
Captación	162	0,045
Alimentación	324	0,090
Distribución	146	0,041
Rechazo	178	0,049

Tabla 2: Caudales para todas las tuberías de la EDAM (Fuente: Elaboración propia)

Introducimos estos caudales en m³/s en la Ecuación 1 propuesta por el Criterio de Bonet, obteniendo así los siguientes diámetros teóricos mínimos de la Tabla 3. Los pasaremos a mm para poder seleccionar un diámetro nominal entre los ofrecidos por el fabricante Flowtite.

Tuberías	Diámetro mín. (m)	Diámetro mín. (mm)	Diámetro nominal (mm)
Captación	0,2415	241,5	250
Alimentación	0,3187	318,7	350
Distribución	0,2327	232,7	250
Rechazo	0,2499	249,9	250

Tabla 3: Resultados para el diámetro de las tuberías de la EDAM (Fuente: Elaboración propia)

Como podemos observar, la tubería de alimentación de la EDAM será la mayor de la instalación, con 350 mm de diámetro, mientras que las de captación, distribución y rechazo tendrán el mismo diámetro, de 250 mm.

El siguiente paso en nuestro procedimiento de cálculos, ya conocidos diámetros y longitudes de las tuberías, será el cálculo de las pérdidas de carga en ellas y en sus accesorios.

5. Dimensionamiento del pretratamiento

Antes de proceder a calcular las pérdidas de carga en las tuberías de la instalación, dimensionaremos el pretratamiento, ya que en éste también habrá pérdidas de cargas que tendrán que ser sumadas a las de la tubería de alimentación. En ésta se situarán los filtros y sistemas que realizarán el pretratamiento. El sistema dependerá sobretodo del tipo de pozos (cerrados en nuestro caso) y de su tamaño.

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema de captación escogido (cerrado mediante pozos) influye mucho sobre el tipo de pretratamiento que se escogerá y en su cantidad. Tendrán una gran importancia los aspectos físicos, químicos y biológicos del agua captada, todo ello con el objetivo de evitar el desgaste prematuro de las membranas del núcleo de desalación.

Para que el pretratamiento quede dimensionado correctamente, lo correcto sería construir el pozo de captación y analizar el agua que sale de él, durante un periodo determinado de tiempo. En este proyecto no es posible realizar este estudio, al no tener alcance ejecutable y siendo su objeto tan sólo los efectos mecánicos y energéticos de la EDAM. Por ello, en este apartado no se entrará en profundidad en el dimensionado exacto del pretratamiento, ya que todo queda en función de los pozos y no tenemos la posibilidad de construirlos y de tomar las muestras necesarias. Se expondrán las líneas generales de actuación y se explicarán los pretratamientos estándar para este tipo de instalaciones.

5.1. Pretratamiento físico

En nuestro caso, el agua se captará mediante pozos, método que tiene la ventaja de proporcionar un agua con pocas sustancias disueltas y con más limpieza en comparación a otros métodos de captación. Todo ello ocurre gracias a la acción filtrante del terreno del que se extrae dicha agua. A pesar de ello, el agua de captación seguirá conteniendo varios elementos físicos disueltos que podrían provocar una obstrucción en las membranas del núcleo de desalación durante las etapas de funcionamiento normal de la EDAM.

Debido a ello, se propone un pretratamiento acorde al aconsejado por José Antonio Medina San Juan en el libro “Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa”. En él, recomienda el empleo de filtros de arena y de cartucho para poder realizar un pretratamiento físico adecuado que provea al núcleo de desalación con un agua que no dañe las membranas de osmosis inversa.

Los filtros de arena estarán dispuestos en una tubería, con una boquilla filtrante de 0,5 mm de diámetro de paso. Esto provocará que el agua pase mientras que la arena se quede atrás, en una especie de vacío. Los filtros de cartucho son depósitos metálicos recubiertos interiormente que destacan por garantizar un nivel de filtración mínimo de 5 micras. Este valor es normalmente requerido por los fabricantes de membranas para evitar un deterioro precoz de éstas. Algunas empresas punteras en la fabricación de cartuchos y filtros son Pure Aqua y Lenntec.

Según lo observado en proyectos y estudios similares al presente en los que también se omite el dimensionado a fondo de los cartuchos, se toma como válida una pérdida de carga en torno a los 2 y 2,5 bar. Realizando una búsqueda en las páginas web de los fabricantes de cartuchos anteriormente mencionados, hemos encontrado valores de pérdidas de presión entre los 0,5 y el 1 kg/cm² para los filtros de arena, mientras que para los filtros de cartucho la gran mayoría presenta una pérdida de presión de 1 kg/cm².

Por motivos de seguridad en los cálculos, se tomará como válida la caída de presión más desfavorable en ambos tipos de filtros, por lo que escogeremos una caída de 1 kg/cm² para ambos grupos. Así, llegamos a la conclusión de que las pérdidas de carga en el pretratamiento físico supondrán una caída de 2 kg/cm² de presión, que son equivalentes a 1,961 bar. Es decir, si redondeamos hacia arriba, tendríamos unas pérdidas de presión de aproximadamente 2 bar en el pretratamiento físico, los cuales se tendrán que sumar a las pérdidas de carga en la tubería de alimentación a la hora de dimensionar las bombas de captación, en el apartado 8.1.

5.2. Pretratamiento químico

Este tipo de pretratamiento se realiza por el hecho de que existe el riesgo en nuestra EDAM de precipitación sales minerales o de óxidos metálicos a la hora de realizarse el proceso de desalación. Ambos fenómenos serían muy perjudiciales para las membranas del bastidor, lo cual conduciría a un desgaste prematuro de éstas.

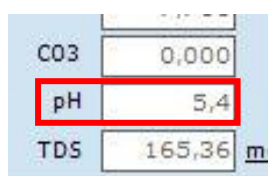
Realizaríamos varias modificaciones químicas en el agua de alimentación, que serán:

- **Corrección del pH:** se reducirá mediante una dosis de HCl (concentración 100%), el cual nos dimensionará IMSDesign. Según este software, tendremos que administrar una dosis de 8,92 mg de ácido clorhídrico por cada litro de agua que entre al bastidor. Con ello evitaremos la precipitación de carbonato cálcico en las membranas, al volverse este más soluble con la reducción del pH. También existe la opción de emplear ácido sulfúrico, pero no se emplea en la actualidad al implicar graves riesgos para la seguridad y la salud que se tendrán que tener en cuenta, lo cual no entra en el alcance de este proyecto. El HCl también es peligroso, pero mucho menos que el ácido sulfúrico.
- **Dispersante:** se empleará para evitar la precipitación de CaF₂ (fluoruro cálcico) y de BaSO₄ (sulfato de Bario) en las membranas, al ser estos compuestos poco solubles de por sí.
- **Cloración / Decloración:** primero se realiza una cloración del agua para combatir la actividad biológica que esta presenta, muy perjudicial para las membranas. Se llega al 1ppm de Cl. Posteriormente se realiza una decloración mediante NaHSO₃ (bisulfito sódico), ya que las membranas de poliamida (las que hemos seleccionado de Hydranautics) no son resistentes a elevados contenido de Cloro en el agua a desalar.

6. Dimensionamiento del postratamiento

A pesar de que no contribuirá a las pérdidas de carga, también dimensionaremos el postratamiento, al ser una parte importante de la EDAM debido a la aplicación que tiene ésta: el abastecimiento de consumo humano.

Según el RD 140/2003 del cual hemos extraído los requisitos para nuestra agua producto, el pH debe estar entre el 6,5 y el 9,5. Sin embargo, nuestro permeado, según los resultados obtenidos con IMSDesign, tiene un nivel de pH de 5,4 (Figura 15), bastante por debajo de lo requerido, siendo así no apta para consumo humano. Además, también se tendrán que reestabilizar los bajos valores de alcalinidad y de calcio, para evitar el tener un agua producto desequilibrada.



CO3	0,000
pH	5,4
TDS	165,36 mg

Figura 15: Valor de pH del agua producto de nuestra EDAM (Fuente: IMSDesign)

Para conseguir nuestros objetivos, emplearemos el siguiente procedimiento en el sistema de postratamiento de nuestra EDAM, situado justo a la salida del núcleo de desalación:

- **Empleo de productos químicos:** es el método empleado por IMSDesign, que se halla en la última pestaña, denominada “Postratamiento”. Los más empleados en instalaciones de este tipo son el NaOH y el Na₂CO₃. Estos productos estabilizan el pH pero, por otro lado, el agua podría volverse corrosiva al sufrir un déficit de Calcio. Para corregir este problema, se añade un inhibidor de corrosión, que protegerá los materiales de las tuberías y de la bomba de distribución. Podríamos dimensionar las dosis de cada producto en IMSDesign, pero se omite este paso ya que no disponemos de los conocimientos suficientes para realizarlo correctamente.

Otros postratamientos que se podrían emplear son la mezcla con otras aguas (donde el agua desalada esté presente como mínimo en un 10% de la composición) o mediante la descarbonatación o la desgasificación. Con el último método se reduciría el CO₂ hasta quedar el pH en torno al 6.

Sin embargo, debido a la falta de conocimientos suficientes sobre los métodos explicados y sobre el agua de captación de los pozos, no se toma una decisión final sobre el postratamiento. Para ello, se necesitaría de un estudio profundo de los efectos de los métodos mencionados anteriormente, el cual no entra dentro del alcance de este proyecto.

7. Cálculo de las pérdidas de carga en la instalación

Ya calculados y escogidos los diámetros, caudales, longitudes y material de las tuberías, y dimensionados los pretratamientos, procederemos a calcular las pérdidas de cargas que estas experimentarán durante las etapas de operación de nuestra instalación. Éstas se calculan con el objetivo posterior de dimensionar las bombas de la EDAM, cuyo consumo energético será tomado en cuenta para el consumo específico total de la planta, objetivo final de este estudio.

7.1. Pérdidas de carga en las tuberías

Para nuestro cálculo, consideraremos como hipótesis inicial el régimen estacionario, y emplearemos las ecuaciones propuestas por la bibliografía consultada y a partir de conocimientos propios sobre Ingeniería Fluidomecánica. Las pérdidas de carga en las tuberías de la EDAM las obtendremos a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach (Ecuación 2).

$$Hr = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación 2: Ecuación de Darcy-Weisbach para pérdidas de carga en tuberías hidráulicas

Donde g corresponde a la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$), V es la velocidad del flujo de agua (se obtiene a partir de $V = Q/\text{Área}$), L y D la longitud y el diámetro de la tubería, y f el coeficiente de fricción.

De todos estos valores, tendremos que hallar el coeficiente de fricción para poder proceder con los cálculos. Para ello, se empleará la expresión de Colebrook (Ecuación 3), que es válida para aquellos casos en los que el número de Reynolds (Re) sea mayor de 4000, lo cual implica que nuestro fluido se encuentra en régimen turbulento.

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

Ecuación 3: Expresión de Colebrook para flujos con un n° de Reynolds mayor de 4000

Donde k es la rugosidad de la tubería según su material (0,029 mm para el PRFV según el fabricante Flowtite) y Re es el número de Reynolds, el cual se obtendrá a partir de la Ecuación 4:

$$Re = \frac{4 * Q}{\pi * D * \nu}$$

Ecuación 4: Ecuación para obtener el nº de Reynolds

Donde ν es la viscosidad cinemática del agua a la temperatura de operación de 21 °C ($0,981 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), obtenido tras interpolación entre 20 y 25 °C en la Tabla 4, la cual representa las propiedades físicas del agua a 1 bar de presión.

temperatura t °C	densidad ρ kg/m ³	módulo elasticidad $K \cdot 10^{-9}$ N/m ²	viscosidad dinámica $\mu \cdot 10^3$ N·s/m ²	viscosidad cinemática $\nu \cdot 10^6$ m ² /s	tensión superficial σ N/m	presión de vapor p_v kPa
0	999,8	1,98	1,781	1,785	0,0756	0,61
5	1000,0	2,05	1,518	1,519	0,0749	0,87
10	999,7	2,10	1,307	1,306	0,0742	1,23
15	999,1	2,15	1,139	1,140	0,0735	1,70
20	998,2	2,17	1,002	1,003	0,0728	2,34
25	997,0	2,22	0,890	0,893	0,0720	3,17
30	995,7	2,25	0,798	0,800	0,0712	4,24
40	992,2	2,28	0,653	0,658	0,0696	7,38
50	988,0	2,29	0,547	0,553	0,0679	12,33

Tabla 4: Propiedades físicas del agua a 1 bar de presión (Fuente: www.monografias.com)

Para poder obtener un coeficiente de fricción correcto a partir de la expresión de Colebrook (Ecuación 3), se debe de emplear un proceso iterativo del mismo. Primero, se supondrá que el coeficiente de fricción tiene un valor inicial de 0,015 (recomendado por la bibliografía consultada y a partir de conocimientos propios sobre Ingeniería Fluidomecánica). Se continuará iterando hasta que f ya no presente una variación significativa entre el valor inicial y el final tras resolver la Ecuación 3, y se tomará este último valor como bueno para su empleo en el cálculo de las pérdidas de carga en las tuberías.

Antes de comenzar con las iteraciones, calcularemos el número de Reynolds (Tabla 5) con la Ecuación 4 para cada uno de los tramos empleando su respectiva ecuación y los datos que ya tenemos de caudal (Q), diámetro (D) y viscosidad cinemática (ν).

Tuberías	Q (m ³ /s)	D (m)	ν (m ² /s)	Nº de Reynolds
Captación	0,045	0,250	$0,981 \times 10^{-6}$	233622
Alimentación	0,090	0,350	$0,981 \times 10^{-6}$	333746
Distribución	0,041	0,250	$0,981 \times 10^{-6}$	212856
Rechazo	0,049	0,250	$0,981 \times 10^{-6}$	254388

Tabla 5: Datos y resultados para el cálculo del nº de Reynolds (Fuente: Elaboración propia)

Como podemos observar, en las tuberías de la instalación el caudal de agua circulante se encuentra en régimen turbulento, el cual se da, como hemos mencionado anteriormente, cuando se cumple que el número de Reynolds es mayor de 4000, afirmativo en todas las tuberías. Por lo tanto, podremos emplear la Ecuación 3 para obtener el coeficiente de fricción f mediante iteración introduciendo los valores de k , D y Re , comenzando con un valor de $f_0 = 0,015$. Se reiterará hasta que se obtenga una variación muy pequeña entre f_n y f_{n+1} , realizado en la Tabla 6.

Tuberías	k (mm)	D (mm)	Re	f_1	f_2	f_3	f_4
Captación	0,029	250	233622	0,016232	0,016129	0,016137	0,016136
Alimentación	0,029	350	333746	0,015039	0,015037	0,015037	0,015037
Distribución	0,029	250	212856	0,016484	0,016355	0,016366	0,016365
Rechazo	0,029	250	254388	0,016011	0,015929	0,015936	0,015935

Tabla 6: Datos y resultados para iterar y obtener el coeficiente de fricción (Fuente: Elaboración propia)

El fin de estos cálculos es obtener unos valores de pérdidas de carga que son necesarios para dimensionar las bombas del sistema. Sin embargo, para el tramo de rechazo, no hará falta bomba alguna, ya que el fluido del rechazo se moverá desde la EDAM hasta el emisario submarino gracias a la acción de la gravedad.

La cota inicial del tramo de rechazo (salida de la EDAM) es superior a la cota del punto final (emisario submarino), y no hay pendientes positivas en el tramo. Por lo tanto, se cumplirá esta suposición. Además, el flujo de rechazo de salmuera saldrá con la presión suficiente del núcleo de desalación, más que suficiente para transportar el agua al emisario.

La justificación de esta decisión se encuentra en el apartado 8.3 de este Anexo III, en el cual calcularemos la altura manométrica necesaria para la bomba de rechazo de salmuera. En caso de dar negativa o igual a 0, no será necesaria dicha bomba. Para ello necesitaremos las pérdidas de carga en la tubería de rechazo. De no ser así, podríamos haber prescindido de su cálculo.

En cuanto a los resultados de la Tabla 6, se puede observar que en f_4 ya no hay gran variación respecto al valor anterior. Por ello, tomaremos sus valores como válidos para los cálculos de las pérdidas de carga.

La velocidad del flujo de cada tramo de tuberías la obtengo con la Ecuación 5. Para obtener la velocidad V en m/s se tendrá que introducir el caudal Q en m³/s y el área A en m².

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

Ecuación 5: Ecuación para obtener la velocidad de un flujo hidráulico mediante el caudal y el área de la tubería

Así, obtenemos los siguientes resultados en la Tabla 7 para las pérdidas de carga en las tuberías de la EDAM, empleando la Ecuación 2:

Tuberías	D (m)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	L (m)	f	g (m/s ²)	H_r (m)
Captación	0,250	0,045	0,9167	40	0,016136	9,81	0,111
Alimentación	0,350	0,090	0,9354	170	0,015037	9,81	0,326
Distribución	0,250	0,041	0,8352	5500	0,016365	9,81	12,800
Rechazo	0,250	0,049	0,9982	2500	0,015935	9,81	8,093

Tabla 7: Datos y resultado para las pérdidas de carga en las tuberías de la instalación (Fuente: Elaboración propia)

Estas pérdidas formarán gran parte de las pérdidas de carga totales de la EDAM. Como es habitual en otros cálculos similares al nuestro, podríamos prescindir de las pérdidas de carga por accesorios, al ser muy pequeñas en comparación a las de las tuberías. Sin embargo, ya que en este estudio se han tomado muchas suposiciones y excluido muchos cálculos de ciertos sistemas, se deciden calcular también las pérdidas en los accesorios, con el motivo de tener una mayor exactitud dentro de lo que cabe.

7.2. Pérdidas de carga en los accesorios de las tuberías

Hay que tener en cuenta que los accesorios de las tuberías también producirán pérdidas de carga locales a lo largo de los trayectos de nuestro flujo de agua.

En el caso de esta instalación, en las tuberías de distribución, captación y rechazo de salmuera hay varios codos de 90°, y en el paso de las tuberías de captación a la tubería de alimentación existe lo que podríamos considerar como un empalme en T, ya que las tuberías de captación se unen en una. Para obtener estas pérdidas de carga accesorias, se debe hacer uso de la Ecuación 6.

$$H_{r,acc} = K * \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación 6: Ecuación para las pérdidas de carga en accesorios de tuberías hidráulicas

Donde K corresponde al coeficiente de pérdida, cuyo valor extraeremos de la Tabla 8, según el accesorio que se estudie.

Accesorio	Valor de K
Válvula esférica, totalmente abierta	10
Válvula de ángulo, totalmente abierta	5
Válvula de retención de <u>charneta</u>	2,5
Válvula de pie con colador	0,8
Válvula de compuerta, totalmente abierta	0,19
Codo de retroceso (codo en U)	2,2
Empalme en T normal	1,8
Codo de 90° normal	0,9
Codo de 90° de radio medio	0,75
Codo de 90° de radio grande	0,60
Codo de 45°	0,42

Tabla 8: Valores de K para varios accesorios (Fuente: "Mecánica de Fluidos Incompresibles y Turbomáquinas hidráulicas". Agüera Soriano)

Para este caso, necesitaremos los coeficientes de los accesorios "Codo de 90° normal" ($K=0,9$) y "Empalme en T normal" ($K=1,8$). Así, calcularemos las pérdidas de carga por accesorios en cada tramo de tuberías. Las que corresponden al empalme en T en el punto de unión de las tuberías de captación las incluiremos en las de las tuberías de captación junto con los codos de 90°. Además, cada pérdida de carga tendremos que multiplicarla por la cantidad de su tipo que se encuentre en el tramo de tuberías a estudiar.

Por ejemplo, el tramo de distribución tiene 4 codos de 90°, por lo que multiplicaremos la pérdida de carga por accesorio de un codo de 90° en la distribución por 4. Procedamos a los cálculos. Cabe destacar que, para el empalme en T, se escogió la mayor velocidad de flujo entre los tramos de captación y de alimentación.

➤ Tubería de captación (Tabla 9):

Accesorio	K	V (m/s)	g (m/s ²)	H _{r,acc} (m) /acc	Cantidad	H _{r,acc} (m) Total
Codos de 90°	0,9	0,9167	9,81	0,039	1	0,039
Empalme en T	1,8	0,9354	9,81	0,080	1	0,080

Tabla 9: Datos y resultados para las pérdidas de carga por accesorios en la tubería de captación (Fuente: Elaboración propia)

➤ Tubería de distribución (Tabla 10):

Accesorio	K	$V (m/s)$	$g (m/s^2)$	$H_{r,acc} (m) /acc$	Cantidad	$H_{r,acc} (m) Total$
Codos de 90°	0,9	0,8352	9,81	0,032	4	0,128

Tabla 10: Datos y resultados para las pérdidas de carga por accesorios en la tubería de distribución (Fuente: Elaboración propia)

Para la tubería de alimentación no se calcularon las pérdidas de carga por accesorios, ya que se estima que se tratará de una tubería de tramo recto, sin codos ni empalmes. Para la tubería de rechazo, tampoco. Las pérdidas de carga por accesorios son generalmente prescindibles y, por los motivos explicados en el apartado 7.1 y la demostración con cálculos en el 8.3, no hará falta bomba de rechazo. Por ello, no es estrictamente necesario el cálculo de pérdidas por accesorios en el rechazo, ya que tendrá poca influencia en los resultados del apartado 8.3. Con ello, evitaremos la redundancia y el alargamiento innecesario del contenido de este Anexo.

7.3. Pérdidas de carga totales

Ahora, el siguiente paso será el de sumar las pérdidas de cargas por accesorios obtenidas anteriormente a las que ya teníamos para cada tramo de tuberías, en la Tabla 11.

Tuberías	$H_{r,acc} (m) Codos 90^\circ$	$H_{r,acc} (m) Empalmes en T$	$H_r (m)$	$H_{r,acc} + H_r (m)$
Captación	0,039	0,080	0,111	0,230
Alimentación	0	0	0,326	0,326
Distribución	0,128	0	12,800	12,928
Rechazo	0	0	8,093	8,093

Tabla 11: Suma de todas las pérdidas de carga en tuberías y en accesorios de la instalación (Fuente: Elaboración propia)

Cabe destacar que, al no ser un proyecto ejecutable, no se han tenido en cuenta las pérdidas de carga que se darían a lo largo de las tuberías debido a válvulas y otros accesorios comúnmente presentes en instalaciones hidráulicas de este tipo, ya que no se han definido estos elementos en el presente estudio. Por ello, guiándonos por la bibliografía consultada, estimaremos estas pérdidas de carga en un 20% de las ya obtenidas de la suma de las de tuberías y accesorios (codos y empalme en T).

Así, obtenemos finalmente las siguientes pérdidas de carga totales para cada tramo de tuberías, sumando el total obtenido anteriormente más un 20% de dicho total, en la Tabla 12:

Tuberías	$H_{r,acc}$ (m)	H_r (m)	$H_{r,acc} + H_r$ (m)	20%	H_r TOTAL (m)
Captación	0,119	0,111	0,230	0,046	0,276
Alimentación	0	0,326	0,326	0,065	0,391
Distribución	0,128	12,800	12,928	2,586	15,514
Rechazo	0	8,093	8,093	1,619	9,712

Tabla 12: Resultados finales para las pérdidas de carga en nuestra instalación desaladora (Fuente: Elaboración propia)

Ya teniendo estos resultados, se puede proceder al dimensionamiento de las bombas del sistema, quizás el cálculo más importante de este Anexo, ya que los rendimientos y consumos de bombas que obtengamos definirán el consumo específico final de la EDAM.

8. Dimensionamiento de las bombas de la instalación

Teniendo ya calculadas las pérdidas de cargas en toda la instalación, podemos proceder al dimensionamiento de las bombas que impulsarán a los fluidos a través de cada tubería hacia sus destinos finales. Para ello, haremos uso del balance de energía correspondiente a una bomba hidráulica, con el objetivo de hallar la altura que tendrá que aportar cada bomba al fluido para el correcto funcionamiento de la EDAM. Las bombas que ésta necesitará son las siguientes:

- Bombas de captación: transportarán el agua desde los pozos de captación hasta el punto colector, a través de las tuberías de captación, y a partir de ahí hasta la entrada del núcleo de desalación, a través de la tubería de alimentación.
- Bomba de distribución: transportará el agua producto desde la salida del núcleo de desalación hasta los pozos de distribución, a través de la tubería de distribución.
- Bomba de rechazo: transportará la salmuera desde la salida del intercambiador de presión hasta el emisario submarino de rechazo, a través de la tubería de rechazo de salmuera. En el apartado 8.3 justificaremos, mediante cálculos, la decisión de prescindir de esta bomba en el apartado 7.1. de este Anexo III.
- Bomba de alta presión: elevará la presión del agua de entrada a las membranas hasta la necesaria para la operación correcta del núcleo de desalación.
- Bomba Booster: suplirá la diferencia de presión existente entre la presión de entrada al bastidor de membranas y la presión de la salmuera cuando sale del bastidor de membranas.

8.1. Procedimientos de selección de las bombas

8.1.1. Balance de energía

El balance de energía de una bomba sería el siguiente, Ecuación 7, tomándose siempre la hipótesis de régimen estacionario:

$$H_b = \frac{P_2 - P_1}{\rho * g} + z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \sum Hr$$

Ecuación 7: Balance de energía para una bomba hidráulica

Donde los términos con el número 1 y 2 como subíndices corresponden a volúmenes de control. En este estudio, los términos con el subíndice 1 serán aquellos referidos al punto inicial de la tubería por la cual la bomba en cuestión impulsará el fluido, mientras que el subíndice 2 se referirá al punto final de dicha tubería. Por el ejemplo, en la bomba de captación, el subíndice 1 corresponde a la superficie libre en la que se capta el agua (inicio de la tubería de captación), mientras que el subíndice 2 se refiere a el punto de entrada de la bomba de alta presión (final de la tubería de alimentación).

En la Ecuación 7, P es la presión a la que se encuentra el agua, y la obtendremos a partir del diagrama de flujo del núcleo de desalación que nos proporciona el software IMSDesign (Figura 14 de este Anexo). El término z se refiere a la altura en metros sobre el nivel del mar a la que se encuentra el fluido, y la cual extraeremos de las diferencias de alturas calculadas mediante la herramienta online Goolzoom. Para mayor facilidad de cálculos, para cada bomba tomaremos la cota z_1 como igual a 0 y la z_2 será la diferencia de altura entre el punto inicial y el punto final de la tubería que se alimente, por lo que podemos suprimir el término de z_1 de nuestro balance de energía ya que siempre será nulo. La v es la velocidad del fluido en m/s, para las cuales emplearemos las velocidades de flujo que obtuvimos en el apartado de cálculo de las pérdidas de carga en las tuberías de la instalación. En los denominadores, ρ es la densidad del agua a 21 °C, que tendrá un valor aproximado de unos 1000 kg/m³ según la bibliografía consultada, y g será la aceleración de la gravedad (tomada, como en apartados anteriores, como 9,81 m/s²). Finalmente, el sumatorio de Hr se refiere a las pérdidas de carga totales por tuberías y accesorios que hemos calculado anteriormente, correspondientes al tramo que estudiemos según la bomba a dimensionar.

Para poder emplear correctamente este balance de energía, adoptaremos la hipótesis inicial de régimen estacionario.

Las variaciones en la energía cinética y la energía potencial del agua podrían ser consideradas como despreciables para nuestros cálculos, y por lo tanto ser eliminadas del balance. Sin embargo, tan sólo despreciaremos las variaciones de energía cinética, ya que no habrá variación entre los puntos 1 y 2 del balance de energía (debido al gran tamaño de la instalación y a la ausencia de toberas o estrechamientos), siendo este término siempre igual a 0. Por otro lado, las variaciones de energía potencial (representadas por la diferencia de cotas de altura en el balance) serán tomadas en cuenta en todas las bombas menos en la de alta presión y en la Booster, donde no hay variación alguna de altura entre el inicio y el final de los tramos que alimentan, ya que en el núcleo de desalación y el intercambiador de presión no hay cambios de altura apreciables.

Así, el balance de energía que emplearemos para calcular las alturas que debe proporcionar cada bomba quedará como está reflejado en la Ecuación 8.

$$Hb = \frac{P_2 - P_1}{\rho * g} + z_2 + \sum Hr$$

Ecuación 8: Balance de energía final para la bomba hidráulica, tras suprimir términos innecesarios para nuestros cálculos

8.1.2. Curvas características y punto de operación

Procedamos con el cálculo para cada bomba. Tras obtener la altura que deben suministrar, se seleccionará un modelo disponible en el mercado que se ajuste a las exigencias de nuestra instalación. Para ello, se consultarán los catálogos de una selección que hemos hecho de dos fabricantes líderes a nivel mundial, que son Grundfos y Wilo.

Para ambos fabricantes y sus catálogos emplearemos softwares desarrollados por ellos mismos. El de Grundfos es el “Grundfos Webcaps”, mientras que el de Wilo es el “Wilo-Select 4”. Al introducir los requerimientos de las bombas de nuestra instalación, estos programas nos devolverán los modelos más adecuados y que más se ajustan a nuestras necesidades. También se han tenido en consideración otros fabricantes, como ERI o Lowara, pero sus buscadores online nos daban fallos para los mismos criterios empleados en los de Grundfos y Wilo, que funcionaban correctamente. Por ello, solo seleccionaremos modelos de estos dos fabricantes. En las Figuras 16 y 17 podemos observar las interfaces de los programas online de búsqueda seleccionados.

The image shows the Grundfos Webcaps interface. At the top, there are four colored buttons: a blue button for 'Dimensionamiento' (Introduction: dimension pump), a green button for 'Catálogo' (Product and services), an orange button for 'Sustitución' (Replace old pump by new), and a brown button for 'Líquid.' (Search by liquid). Below these is a search form with three tabs: 'Dimension. rápido', 'Dimension. avanzado por aplicación', and 'Guía de selec.'. The 'Dimension. rápido' tab is selected. It contains two input fields: 'Caudal (Q)*' with a unit dropdown set to 'm³/h', and 'Altura (H)*' with a unit dropdown set to 'm'. To the right of these fields are three radio buttons under the heading 'Selec. dimensionam. por:'. The options are 'Dimension. por aplicación', 'Dimension. por diseño bomba', and 'Dimension. por familia bomba'. A blue button labeled 'EMPEZAR DIMENSIONAM.' is located to the right of the form.

Figura 16: Interfaz del buscador "Grundfos Webcaps" (Fuente: www.product-selection.grundfos.com)

Figura 17: Interfaz del buscador "Wilo-Select 4" (Fuente: www.wilo-select.com)

Para este estudio y para cada bomba de la instalación, seleccionaremos un modelo apropiado de cada fabricante. Para ello, necesitaremos saber la altura de la bomba H_b (que obtenemos del balance de energía explicado anteriormente) y el caudal Q que circulará por ella (el cual ya conocemos a partir del diagrama de flujo proporcionado por IMSDesign en la Figura 14). Introduciremos estos dos valores en los parámetros que nos pedirán los fabricantes, para así poder ofrecernos los modelos adecuados a nuestro sistema. También tendremos en cuenta que las bombas deberán de ser resistentes a agua con altos índices de sal (todas menos la bomba de distribución, que transportará el agua producto ya desalada) y cuál es su aplicación: la desalación de agua de mar. No hay que olvidar que las bombas de captación tendrán que ser sumergibles.

El resultado que nos proporcionarán los fabricantes serán las curvas características de los modelos de bomba ofertados, su consumo de potencia, su eficiencia y, en algunos casos, sus costes, que analizaremos de forma orientativa.

Hay que tener en cuenta que el fabricante nos proporcionará una bomba con una curva característica lo más cercana posible a nuestro punto de operación (el Q y H_b de la bomba). Básicamente, se trata de resolver un sistema de ecuaciones. Una es la de la curva característica de la bomba (que tiene la forma $H=a+cQ^2$), y la otra es la curva resistente o del sistema (que tiene la misma forma de ecuación). El punto de corte entre estas dos, es el punto de operación que buscamos, y el cual definirá el consumo y el rendimiento que tendrá la bomba. La representación gráfica de esta explicación se puede observar en la Figura 18.

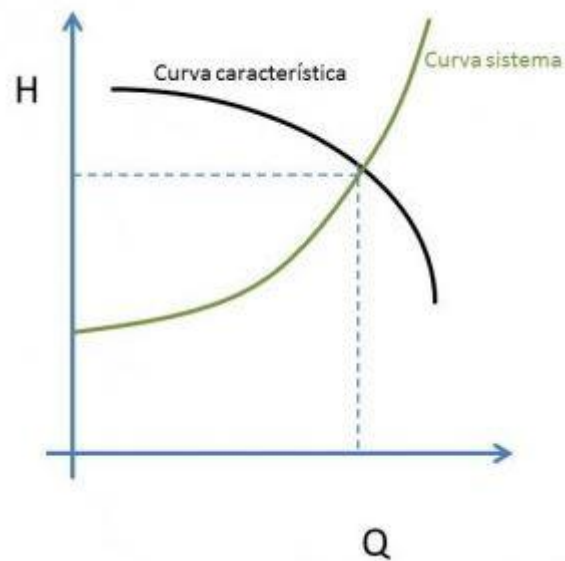


Figura 18: Punto de corte de una bomba hidráulica (Fuente: www.ingenieriamantenimiento.org)

Hay que tener en cuenta que es casi imposible que el punto de corte sea igual al Q y H_b que introducimos. Siempre se tendrá o el caudal igual y la altura algo diferente, o la altura igual pero el caudal algo mayor o menor.

Para solucionar este problema, se pueden emplear válvulas, y es posible que las bombas mismas ya las lleven incorporadas para regular la presión y el caudal. Para este estudio, tomaremos la suposición de que hay válvulas reguladoras de presión tanto a la entrada como a la salida de la bomba, y que además se tiene una válvula de compuerta que regulará el caudal. Sin embargo, en los modelos de bombas en los que el caudal o la altura se desvíen mucho de los valores que buscamos, se descartará dicho modelo, ya que regular mucho el caudal o la presión implicaría unas pérdidas de carga notables, que son indeseables, ya que aumentarían el consumo de la instalación.

8.1.3. Cavitación

Además, para la selección correcta de bomba para cada tubería, se debe de estudiar un concepto conocido como “altura mínima de aspiración”, que se representa como $NPSH_r$, y cuyo valor lo proporcionará el fabricante en metros, según el modelo de bomba seleccionado. Cuando la “altura neta de aspiración disponible” ($NPSH_d$) sea igual o menor que la mínima, se producirá la cavitación en las tuberías.

Este fenómeno se basa en la formación de burbujas de gas o de vapor en el líquido a lo largo de su trayecto debido a que su presión sea inferior a su presión de vapor. Es un fenómeno

muy indeseable para las tuberías y las bombas, ya que causará daños en los componentes de éstos, generará mucho ruido y además supone una pérdida de rendimiento de la instalación. Por lo tanto, nuestro objetivo será evitar este fenómeno, y por ello lo tendremos en cuenta junto con los demás cálculos que realicemos para las bombas de nuestra EDAM.

La $NPSH_d$ se calcula con la Ecuación 9.

$$NPSH_d = \frac{P_a}{\gamma} - H_a - H_{ra} - \frac{P_s}{\gamma}$$

Ecuación 9: Ecuación para el cálculo de la altura neta de aspiración disponible (NPSHd)

Donde P_a es la suma de la presión atmosférica más la presión debida a la columna de agua (dependiendo de la profundidad de la bomba) en la aspiración, H_a es la altura geométrica a la cual se encuentra la aspiración, H_{ra} es la pérdida de carga en la línea de aspiración y P_s es la presión de vapor del agua a la temperatura de bombeo.

Sin embargo, no emplearemos la Ecuación 9, sino que simplemente tomaremos la equivalencia aproximada de que 1 bar equivale a 10 metros columna de agua. Así, si la presión de entrada a la bomba supera en metros a la $NPSH_r$, confirmaremos que no habrá cavitación.

Definidas todas las ecuaciones que emplearemos para el cálculo de la altura necesaria en las bombas, y las hipótesis que hemos adoptado, procedemos a la ejecución de dichos cálculos para el dimensionamiento de las bombas de la EDAM.

8.2. Bombas de captación

Primero efectuaremos los cálculos necesarios para obtener la altura necesaria para las bombas de captación y, posteriormente, con este valor y el caudal que moverá dicha bomba, seleccionaremos modelos adecuados para las necesidades de nuestra EDAM.

8.2.1. Cálculos para la bomba de captación

Tendremos un total de tres bombas de captación, una para cada tubería correspondiente a este tramo de la EDAM. Sin embargo, tendremos que tener en cuenta que cada bomba deberá de vencer las pérdidas de carga de una tubería de captación y de la tubería de alimentación completa, ya que las bombas de captación impulsarán al fluido hasta la entrada de la EDAM, en donde se situará la bomba de alta presión (HPP).

Introducimos los siguientes datos en el balance de energía de la bomba (Ecuación 8):

TÉRMINO	VALOR
g (m/s ²)	9,81
ρ (kg/m ³)	1000
P_1 (bar)	0
P_2 (bar)	4
z_2 (m)	20
ΣH_r (m)	0,667

Tabla 13: Valores empleados para el balance de energía de la bomba de captación (Fuente: Elaboración propia)

La z_2 vale 20 metros debido a que ésta es la profundidad de los pozos de captación, y es la altura que tendrá que vencer la bomba de captación. El tramo entre el punto colector y la entrada de la EDAM es prácticamente plano, por lo que no habrá más diferencia de cota aparte de la profundidad de los pozos.

P_1 la tomamos como 0 bar al ser tomada en los pozos. P_2 vale 4 bar, resultado de sumar los 2 bar de presión de entrada a la HPP necesarios para evitar la cavitación en dicha bomba y los 2 bar de diferencia de presión perdidos en el pretratamiento físico.

El ΣH_r vale 0,667 metros ya que es la suma de las pérdidas de carga tanto en la tubería de captación como en la tubería de alimentación, al ser la bomba de captación la que hace fluir el agua por un tramo de tubería de captación y luego por el general de alimentación.

Así, obtenemos que:

$$H_{CAP} = 61,44 \text{ m}$$

Para el caudal que fluirá por la bomba de captación, se tomará el caudal de captación ya conocido en m^3/h (extraído de la Tabla 7), porque las gráficas proporcionadas por los fabricantes de bombas emplean el caudal en estas unidades:

$$Q_{CAP} = 162 \frac{m^3}{h}$$

8.2.2. Selección de la bomba de captación

Las bombas de captación deben ser sumergibles. Para los distintos fabricantes y según nuestras necesidades, nos han recomendado los siguientes modelos de bombas sumergibles:

- **Grundfos:** la gama de bombas sumergibles es la SP. Introducimos los datos de altura, caudal y temperatura del agua en el buscador, y como aplicación la industrial para tratamiento de aguas. El buscador nos recomienda los modelos SP160 o SP215. Al pedir el mejor resultado al buscador, nos ofrece 6 versiones del modelo SP160, de los cuales escogemos el SP 160-4-AA-200203B4 (que tiene un rendimiento del 63,5%, el mayor de las seis bombas). Aunque este estudio no tenga en cuenta los costes económicos, el fabricante nos proporciona el precio unitario de este modelo, y por motivos orientativos se expondrá, siendo de 11.303 euros. La bomba tiene un consumo de 46,11 kW.
- **Wilo:** tras introducir los datos de altura y caudal en el buscador, y seleccionar “Aplicaciones especiales”, encontramos una gama de bombas acordes a nuestras exigencias y que además son sumergibles. Al seleccionar la de mayor eficiencia, obtenemos la bomba K8.130, con una eficiencia del 77,2% y un consumo de 37,8 kW.

A continuación, se muestran las curvas características obtenidas para los modelos seleccionados, acompañadas de una ilustración de éstos. Las Figuras 19 y 20 para la bomba de Grundfos, y las Figuras 21 y 22 para la bomba de Wilo.

• **Grundfos SP 160-4-AA-200203B4**

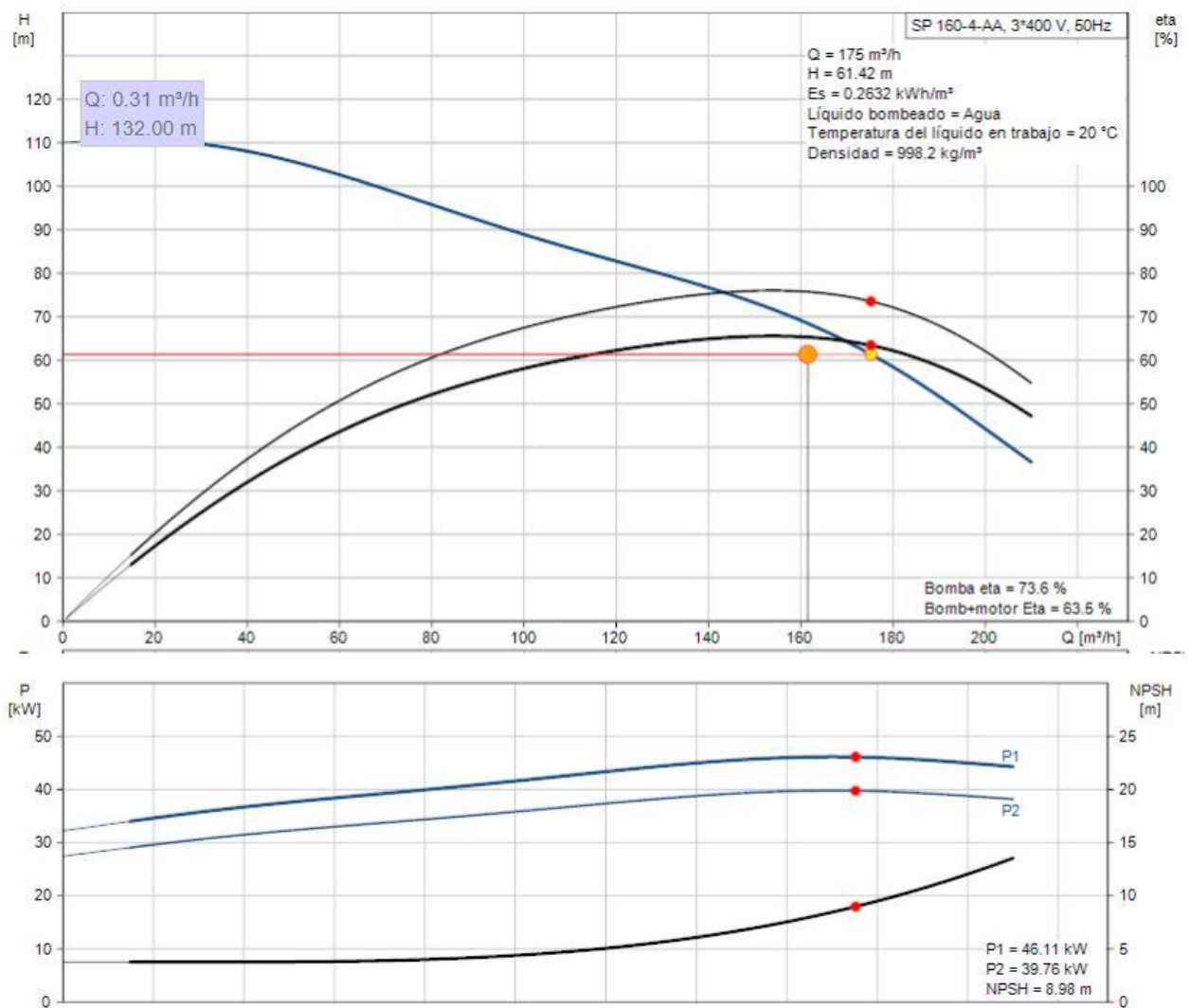


Figura 19: Curvas características obtenidas para la bomba Grundfos SP 160-4-AA-200203B4 (Fuente: Grundfos Webcaps)



Figura 20: Imagen de la bomba Grundfos SP 160-4-AA-200203B4 (Fuente: Grundfos Webcaps)

- **Wilo K8.130**

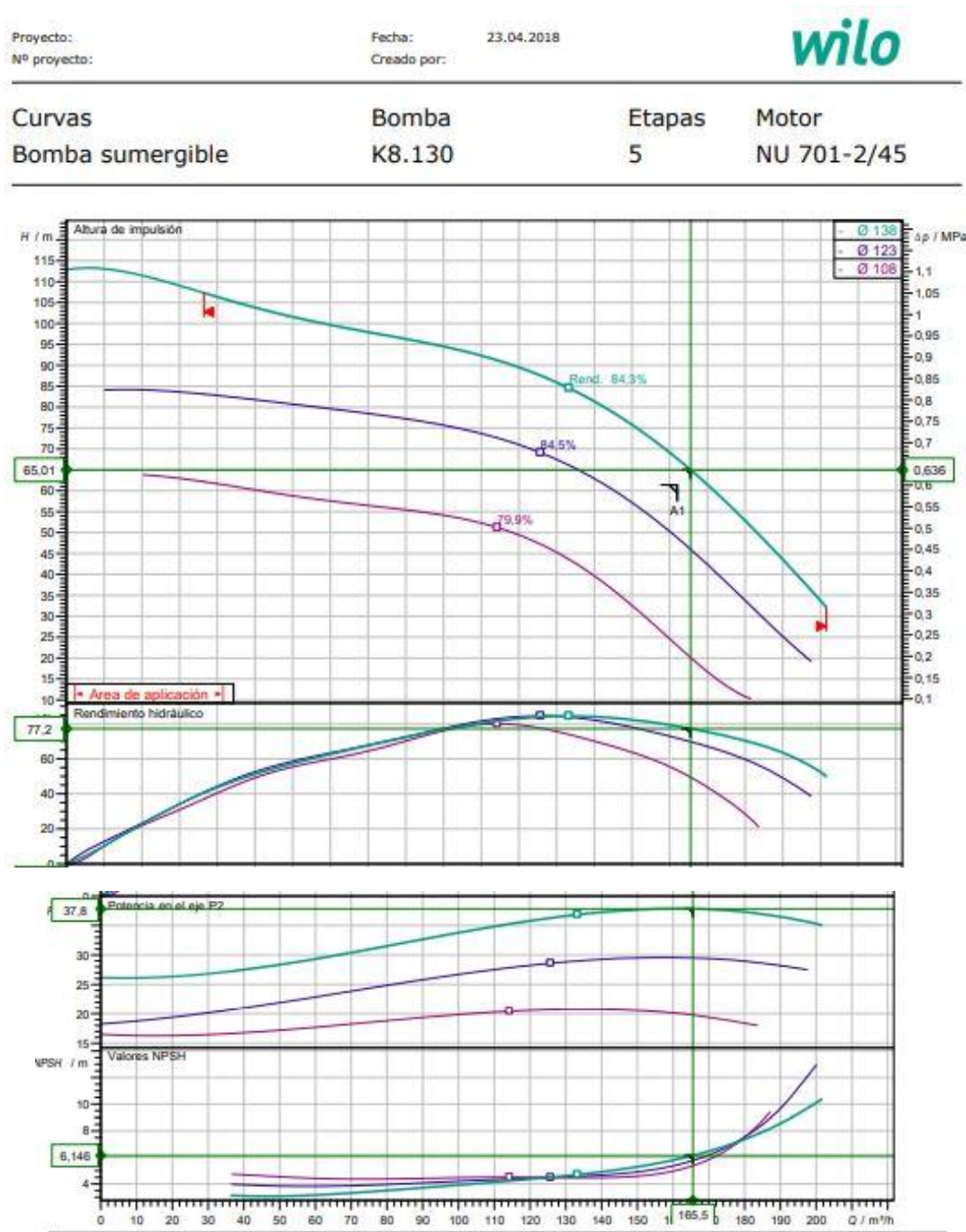


Figura 21: Curvas características obtenidas para la bomba sumergible Wilo K8.130 (Fuente: Wilo-Select 4)

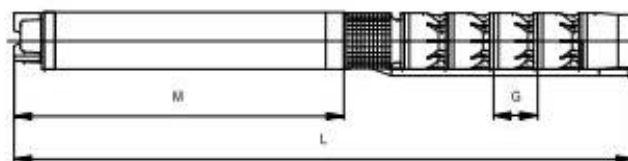


Figura 22: Imagen de la bomba sumergible Wilo K8.130 (Fuente: Wilo-Select 4)

Se refleja un resumen de los modelos obtenidos en la Tabla 14.

Fabricante	Modelo de bomba	Rendimiento (%)	Consumo (kW)
Grundfos	SP 160-4-AA-200203B4	63,5	46,11
Wilo	K8.130	77,2	37,80

Tabla 14: Tabla resumen de los modelos de bomba de captación (Fuente: Elaboración propia)

Como podemos observar, escogeremos la bomba Wilo K8.130 ya que tiene el mayor rendimiento de ambas, un 77,20%. Consumirá 37,80 kW de potencia. Otro motivo para escoger la bomba de Wilo, es que su punto de operación ($Q=165,5$; $H=65,01$) es muy cercano al punto que requerimos ($Q=162$; $H=61,44$), lo cual se corregirá mediante válvulas. Mientras, en la bomba de Grundfos se tendría un caudal de $175 \text{ m}^3/\text{h}$, lo cual es una diferencia de caudal innecesaria e indeseable ($13 \text{ m}^3/\text{h}$ de más).

Cabe destacar que, en la selección de las bombas de captación, al ser sumergibles, no disponen de tubería de aspiración. Esto hace que los términos H_a y H_r de la Ecuación 9 siempre sean iguales a 0. Así, no existirá el riesgo de cavitación en este tipo de bombas, ya que, además, por otro lado, las bombas de captación sufrirán una presión de 20 metros columna de agua, que superan con creces el NPSH_r de la bomba seleccionada, de 6,146 metros.

8.3. Bomba de distribución

Al igual que se hizo para la captación, primero efectuaremos los cálculos necesarios para obtener la altura necesaria para la bomba de distribución. El siguiente paso será, con la altura y el caudal que fluirá de la bomba, seleccionar los modelos adecuados para la distribución de la EDAM. Cabe destacar que habrá un total de dos bombas de distribución, de las que una actuará de reserva en el caso de que la primera deje de funcionar por avería o paradas inesperadas. En el apartado 9.3 de este Anexo III se justifica la implantación de las bombas de reserva.

8.3.1. Cálculos para la bomba de distribución

Para la bomba de distribución, introduciremos los datos a continuación en el balance de energía de la bomba:

TÉRMINO	VALOR
g (m/s ²)	9,81
ρ (kg/m ³)	1000
P_1 (bar)	--
P_2 (bar)	--
z_2 (m)	100
ΣH_r (m)	15,514

Tabla 15: Valores empleados para el balance de energía de la bomba de distribución (Fuente: Elaboración propia)

Para este balance de energía no tendremos en cuenta la variación de energía de presión, el emplearse en la distribución un depósito abierto. Por ello, la altura manométrica de la bomba de distribución tan sólo dependerá de las pérdidas de carga y de la diferencia de cota.

La z_2 vale 100 metros, ya que esta es la diferencia de altura entre la salida del agua producto de la EDAM (el inicio de la tubería de distribución) y el depósito regulador.

El ΣH_r para la tubería de distribución se ha obtenido de los cálculos realizados en apartados anteriores. Así, tenemos que:

$$H_{DIS} = 115,51 \text{ m}$$

Para el caudal que fluirá por la bomba de distribución, se tomará el caudal de distribución ya calculado anteriormente en m³/h (extraído de la Tabla 7), porque las gráficas proporcionadas por los fabricantes de bombas emplean el caudal en estas unidades:

$$Q_{DIS} = 146 \frac{m^3}{h}$$

8.3.2. Selección de la bomba de distribución

Haciendo una búsqueda en los buscadores de Grundfos y Wilos, ambos nos han recomendado los siguientes modelos de bombas para la distribución:

- **Grundfos:** Introducimos los datos de altura, caudal y temperatura del agua en el buscador, y como aplicación la industrial para aumento de presión. Nos recomienda los modelos CR. El que mejor rendimiento tiene de todos es el CR 150-6, con un rendimiento del 71,9% y un consumo de 58,17 kW.
- **Wilo:** tras introducir los datos de altura y caudal en el buscador online, y al seleccionar “Aplicaciones especiales”, encontramos una gama de bombas acordes a las características de nuestro tramo de distribución. Al seleccionar la de mayor eficiencia, obtenemos la bomba SiBoost Smart 4 Helix V 5206/2, con una eficiencia del 77,12% y que consumirá una potencia de 56,8 kW.

A continuación, se muestran las curvas características obtenidas para los modelos recomendados, acompañadas de una ilustración de éstos. Las Figuras 23 y 24 para la bomba de Grundfos, y las Figuras 25 y 26 para la bomba de Wilo.

• **Grundfos CR 150-6**

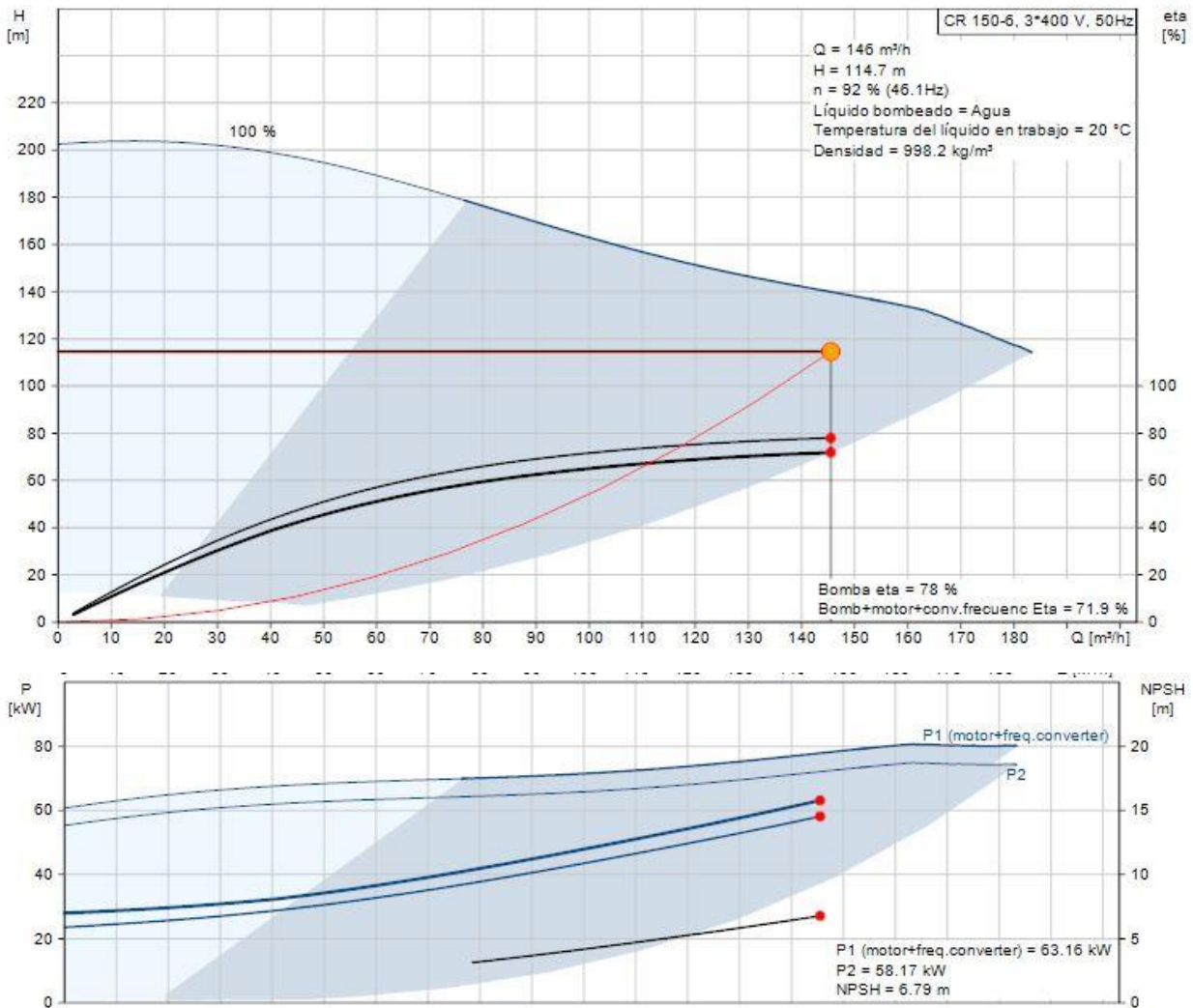


Figura 23: Curvas características obtenidas para la bomba Grundfos CR 150-6 (Fuente: Grundfos Webcaps)



Figura 24: Imagen de la bomba Grundfos CR 150-6 (Fuente: Grundfos Webcaps)

- *Wilo SiBoost Smart 4 Helix V 5206/2*

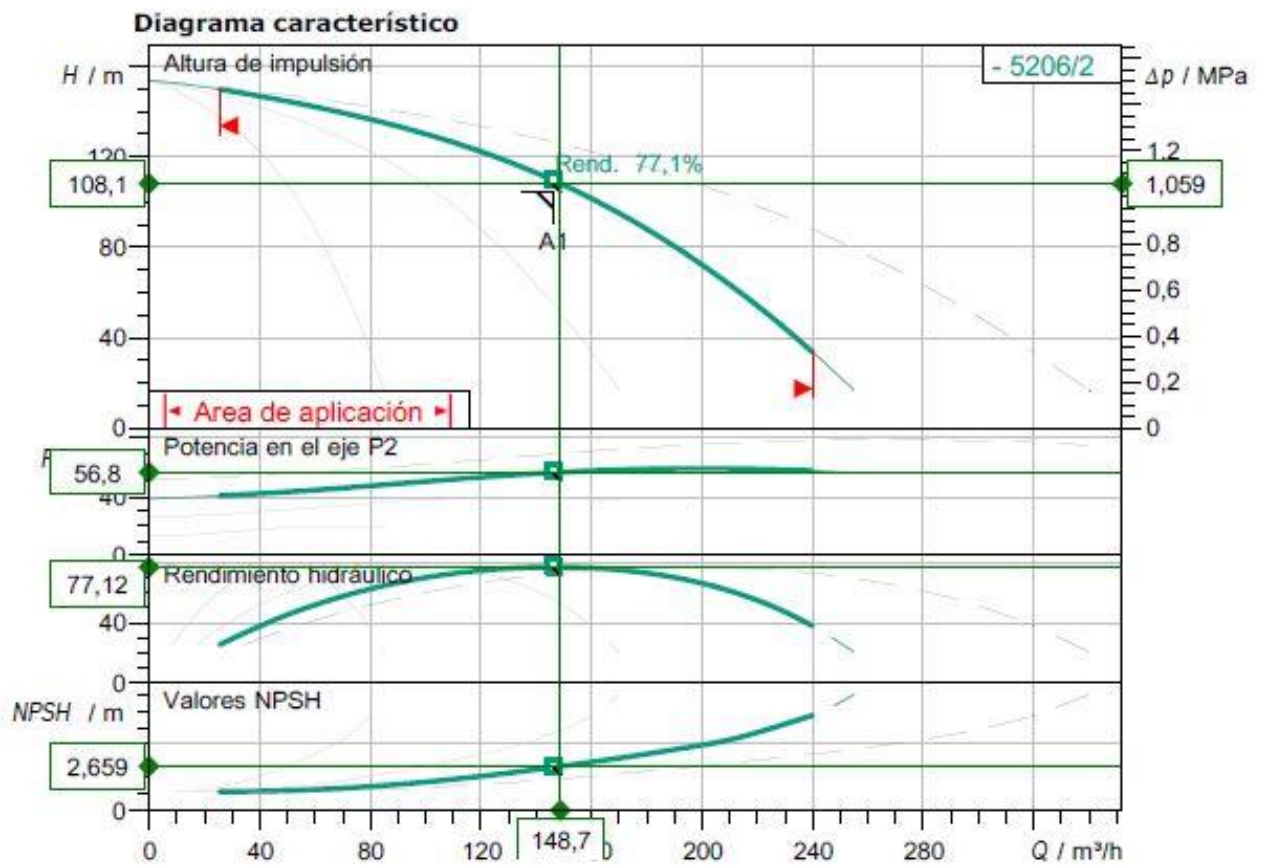


Figura 25: Curvas características obtenidas para la bomba Wilo SiBoost Smart 4 Helix V 5206/2 (Fuente: Wilo-Select 4)



Figura 26: Imagen de la bomba Wilo SiBoost Smart 4 Helix V 5206/2 (Fuente: Wilo-Select 4)

Se refleja un resumen de los modelos obtenidos en la Tabla 16.

Fabricante	Modelo de bomba	Rendimiento (%)	Consumo (kW)
Grundfos	CR 150-6	71,90	58,17
Wilo	SiBoost Smart 4 Helix V 5206/2	77,12	56,80

Tabla 16: Tabla resumen de los modelos de bomba de distribución (Fuente: Elaboración propia)

Como podemos observar, la bomba Wilo SiBoost Smart 4 Helix V 5206/2, gana al modelo de Grundfos en cuanto al rendimiento y consumo, con un rendimiento del 77,12% y un consumo de potencia de 56,80 kW. Sin embargo, si estudiamos los puntos de operación, la bomba de Wilo opera en (Q=148,7; H=108,1), bastante alejado de nuestras necesidades (Q=146; H=115,51). Como podemos observar, no es capaz de proporcionar la altura deseada. Por otro lado, la bomba CR 150-6 de Grundfos, opera en (Q=146; H=114,7), el cual es un punto de operación prácticamente idéntico al que requiere nuestra instalación. Esto implicaría la nula necesidad de válvulas para regular el caudal y la presión, y a la vez un considerable ahorro en cuanto a pérdidas de carga.

Por lo tanto, nuestra bomba de distribución será el modelo CR 150-6 de Grundfos, con un consumo de 58,17 kW y un rendimiento del 71,9%.

8.4. Bomba de rechazo de salmuera

No habrá bomba para el tramo de rechazo de la EDAM. La justificación para esta decisión está explicada en el apartado 7.1. de este Anexo III. Ahora, en este apartado demostraremos tal justificación mediante los cálculos con el balance de energía de la bomba. Para que la bomba de rechazo de salmuera sea prescindible en nuestras instalaciones, en el balance de energía su altura manométrica debería resultar negativa o igual a 0.

8.4.1. Cálculos para la bomba de rechazo

Para demostrar que la bomba de rechazo de salmuera no es necesaria, introduciremos los datos a continuación en el balance de energía de la bomba:

TÉRMINO	VALOR
g (m/s ²)	9,81
ρ (kg/m ³)	1000
P_1 (bar)	--
P_2 (bar)	--
z_2 (m)	-25
ΣH_r (m)	9,712

Tabla 17: Valores empleados para el balance de energía de la bomba de rechazo (Fuente: Elaboración propia)

No tendremos en cuenta ni la presión de salida del rechazo de salmuera de la EDAM (al no conocerla) ni de la necesaria en el emisario para evacuarla. Tomaremos la suposición de que el flujo de rechazo llega con la suficiente presión al emisario, por lo cual el término de las presiones se anula al ser ambas iguales y estar restando. La presión en cuestión tendría que ser superior a los 2,5 bar para poder vencer a la presión de los 25 metros de columna de agua bajo la que se encuentra el emisario submarino.

La z_2 vale -25 metros, al ser esta la altura que descenderá la tubería de rechazo de salmuera. El ΣH_r se calculó anteriormente, valiendo 9,096 metros. Así, introduciendo todos estos datos en el balance de energía de la bomba, obtenemos que:

$$H_{RECH} = -15,288 \text{ m}$$

Como podemos ver, la altura manométrica de la bomba de rechazo resulta negativa. Esto significa que dicha bomba será prescindible en nuestras instalaciones, ya que la presión a la que sale la salmuera de la EDAM y la diferencia de cota entre esta salida y el emisario submarino son suficientes para que el flujo de rechazo fluya hacia su destino final por la acción de la gravedad.

8.5. Bomba de alta presión (HPP)

Al igual que se hizo anteriormente, primero efectuaremos los cálculos necesarios para obtener la altura necesaria para la bomba de alta presión del núcleo de desalación. Posteriormente, con la altura obtenida y el caudal que fluirá por la bomba, seleccionaremos los modelos adecuados para las necesidades del núcleo de desalación de la EDAM.

8.5.1. Cálculos para la bomba de alta presión (HPP)

Introducimos los siguientes datos en el balance de energía de la bomba:

TÉRMINO	VALOR
g (m/s ²)	9,81
ρ (kg/m ³)	1000
P_1 (bar)	2
P_2 (bar)	64,7
z_2 (m)	--
ΣH_r (m)	--

Tabla 18: Valores empleados para el balance de energía de la bomba de alta presión (Fuente: Elaboración propia)

Para este balance no tendremos en cuenta la altura de cota, al no haber diferencias de altura significativas en el núcleo de desalación. Por ello, la altura manométrica tan sólo dependerá de las pérdidas de carga y de la diferencia de presiones.

P_1 la tomamos como 2 bar al ser la presión del agua proveniente de la alimentación para evitar la cavitación, y P_2 , la presión de entrada del agua al bastidor de membranas, vale 64,7 bar, valor que nos ha proporcionado el resultado de los cálculos realizados en apartados anteriores con el software IMSDesign.

El ΣH_r se considera como insignificante al haber unas pérdidas de carga diminutas en el paso del agua por las membranas. Esto es debido a la limpieza realizada en el pretratamiento físico, que facilitará la circulación del agua por el bastidor.

Así, obtenemos:

$$H_{HPP} = 639,14 \text{ m}$$

Para el caudal que fluirá por la bomba de alta presión, se tomará el caudal proporcionado por IMSDesign, que nos da el caudal por la bomba de alta presión antes de unirse con la otra parte

de fluido que sale presurizada del intercambiador de presión. Las gráficas proporcionadas por los fabricantes de bombas emplean el caudal en estas unidades:

$$Q_{HPP} = 147 \frac{m^3}{h}$$

8.5.2. Selección de la bomba de alta presión (HPP)

Con los datos de altura y caudal de la bomba de alta presión, hemos obtenido los siguientes modelos en los buscadores de Grundfos y Wilos:

- **Grundfos:** Introducimos los datos de altura, caudal y temperatura del agua en el buscador, y como aplicación la industrial para aumento de presión. Nos da error, ya que ningún modelo de este fabricante es capaz de proporcionar la altura requerida por nuestra EDAM.
- **Wilo:** También nos da error, al no encontrar el buscador modelos para nuestras necesidades, ni seleccionando Aplicaciones especiales ni Aplicaciones de procesos.

Al no encontrar ningún modelo disponible en Wilo ni en Grundfos, decidimos buscar en otros fabricantes. Entramos al buscador online de un fabricante empleado en la bibliografía consultada para las bombas de alta presión. Se trata de KSB. Empleando su aplicación “KSB Easyselect” (Figura 27), nos da como resultado dos series de bombas: La Multitec y la UPA. Esta última la descartamos, porque se trata de una serie de bombas sumergibles.

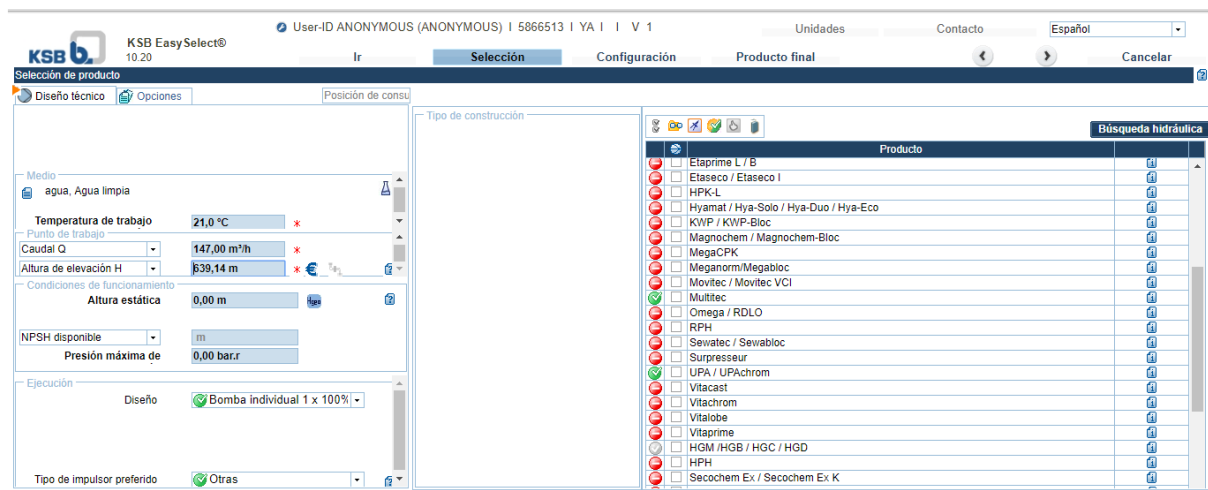


Figura 27: Interfaz del buscador online de KSB (Fuente: KSB Easyselect)

Así, nos recomienda los modelos GA y CA. Escogeremos el segundo, específicamente el modelo CA 125-10.2, con un rendimiento del 78,11% y un consumo de 372,05 kW. En la siguiente página se pueden observar sus curvas características (Figura 28) y una imagen de la bomba en cuestión (Figura 29).

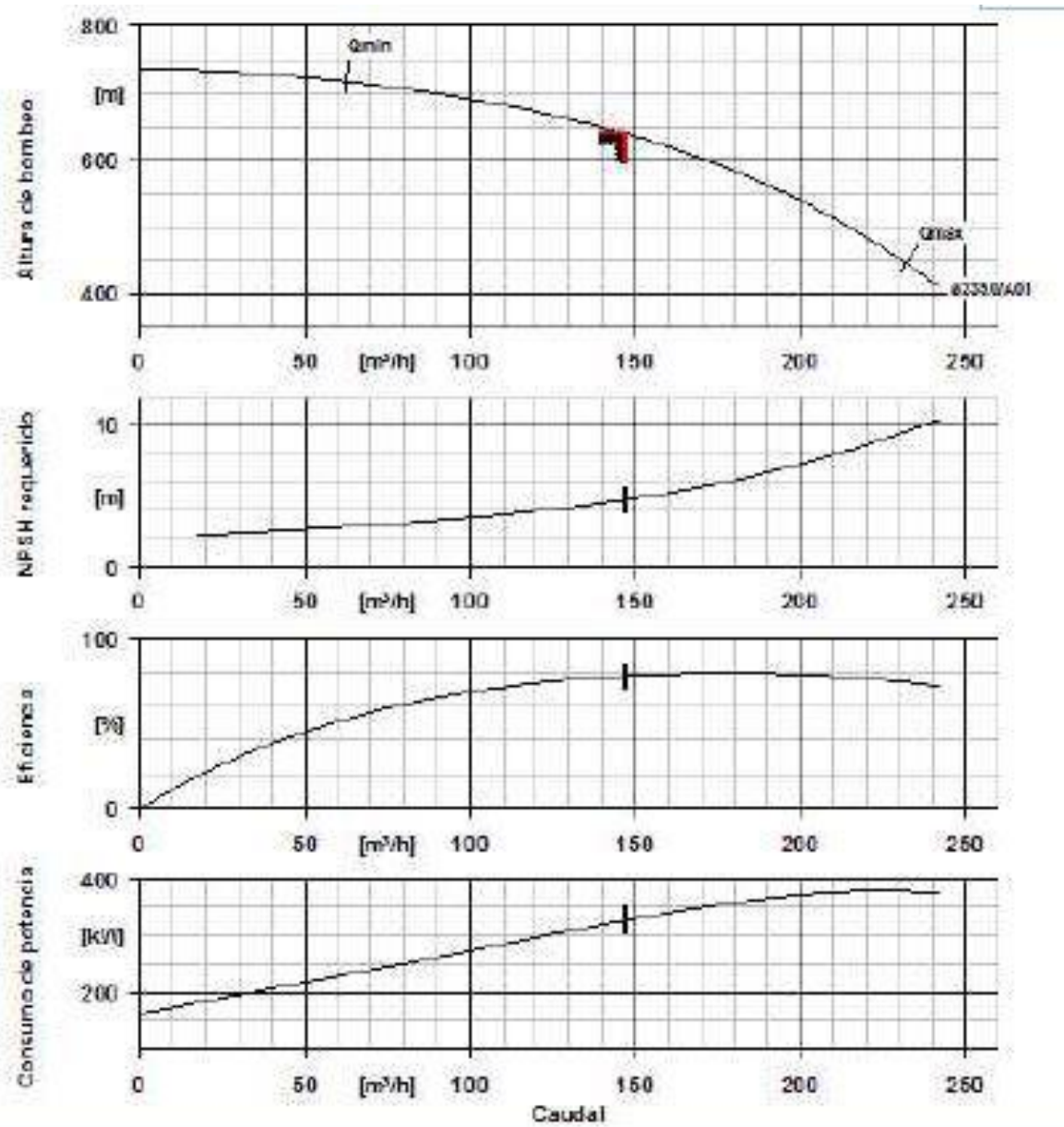


Figura 28: Curvas características obtenidas para la bomba KSB CA 125-10.2 (Fuente: KSB Easyselect)



Figura 29: Imagen de la bomba KSB CA 125-10.2 (Fuente: KSB Easyselect)

El $NPSH_r$ de la bomba de alta presión es de unos 5 metros, según la curva característica de la Figura 28. La presión de entrada es de 2 bar, equivalente a 20 metros columna de agua, por lo que no habrá cavitación.

8.6. Bomba Booster

Para esta bomba buscaremos uno de los fabricantes que hemos empleado mayoritariamente, que es Grundfos, y también el que nos dio buenos resultados para la bomba de alta presión, que sería KSB. Probablemente tengan bombas que puedan aguantar nuestras necesidades, ya que para la bomba Booster la altura a proporcionar será mucho menor que en la de alta presión, y habrá muchos modelos que sí que nos puedan ser de uso.

8.6.1. Cálculos para la bomba Booster

Emplearemos los siguientes valores para el balance de energía de la bomba Booster:

TÉRMINO	VALOR
g (m/s ²)	9,81
ρ (kg/m ³)	1000
P_1 (bar)	63,3
P_2 (bar)	64,7
z_2 (m)	--
ΣH_r (m)	--

Tabla 19: Valores empleados para el balance de energía de la bomba Booster (Fuente: Elaboración propia)

Para este balance no tendremos en cuenta la altura de cota, al no haber una diferencia de altura significativa en el núcleo de desalación. Por ello, la altura manométrica tan sólo dependerá de las pérdidas de carga y de la diferencia de presiones.

P_1 la tomamos como 63,3 bar (presión de la salmuera que sale del bastidor de membranas) y P_2 como 64,7 bar (presión de entrada al bastidor de membranas), cuyos valores se han extraído del resultado de los cálculos realizados en apartados anteriores con el software IMSDesign.

El ΣH_r se considera como insignificante al haber unas pérdidas de carga muy pequeñas en el intercambiador de presión.

Así, tenemos que:

$$H_{Booster} = 14,27 \text{ m}$$

Para el caudal que fluirá por la bomba Booster, se tomará el caudal del rechazo de salmuera en m^3/h , ya que las gráficas proporcionadas por los fabricantes de bombas emplean el caudal en estas unidades:

$$Q_{Booster} = 178 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

8.6.2. Selección de la bomba Booster

Realizando una búsqueda en los buscadores de Grundfos y KSB, ambos nos han dado como resultado los siguientes modelos de bombas:

- **Grundfos:** Introducimos los datos de altura, caudal y temperatura del agua en el buscador, y como aplicación la industrial para aumento de presión. Nos recomienda como primera de todas las series la NB. El que mejor rendimiento tiene de todos es el modelo NB 100-200/191 A-F2-A-E-BAQE, con un rendimiento del 74,8%, consumiendo en total 9,3 kW.
- **KSB:** tras introducir los datos de altura y temperatura en la aplicación, encontramos varias gamas de bombas acordes a las exigencias para nuestra bomba Booster. Seleccionaremos varias. La mejor de todas resulta ser una de la serie Etaline / Etaline Z. En específico, se trata del modelo Etaline 150-150-200, que tiene un rendimiento del 79,37% y consume una potencia de 8,76 kW.

A continuación, se muestran las curvas características obtenidas para los modelos recomendados, acompañadas de una imagen real de éstos. Las Figuras 30 y 31 para la bomba de Grundfos, y las Figuras 32 y 33 para la bomba de KSB.

• **Grundfos NB 100-200/191 A-F2-A-E-BAQE**

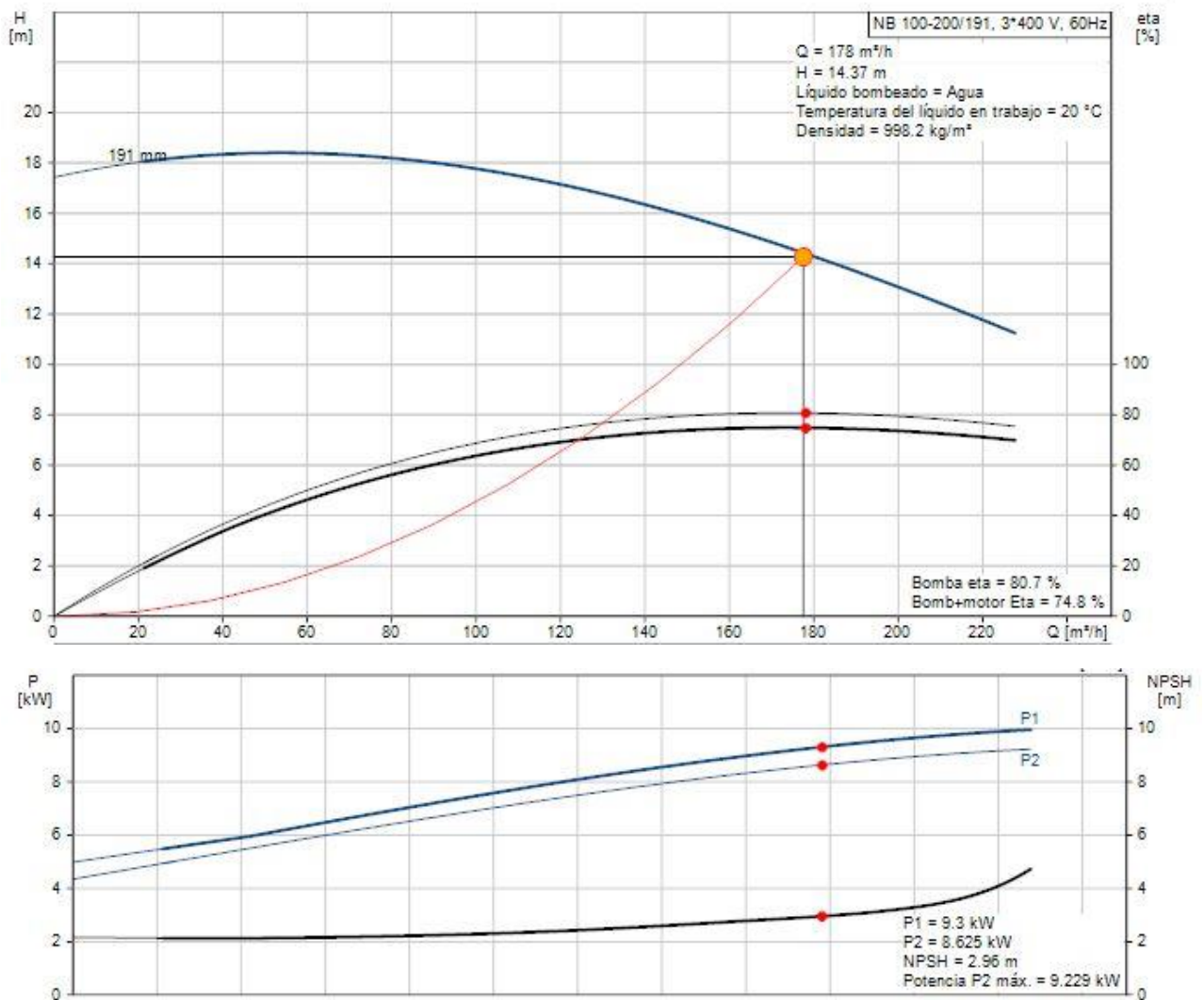


Figura 30: Curvas características obtenidas para la bomba Grundfos NB 100-200/191 A-F2-A-E-BAQE (Fuente: Grundfos Webcaps)



Figura 31: Imagen de la bomba Grundfos NB 100-200/191 A-F2-A-E-BAQE (Fuente: Grundfos Webcaps)

- **KSB Etaline 150-150-200**

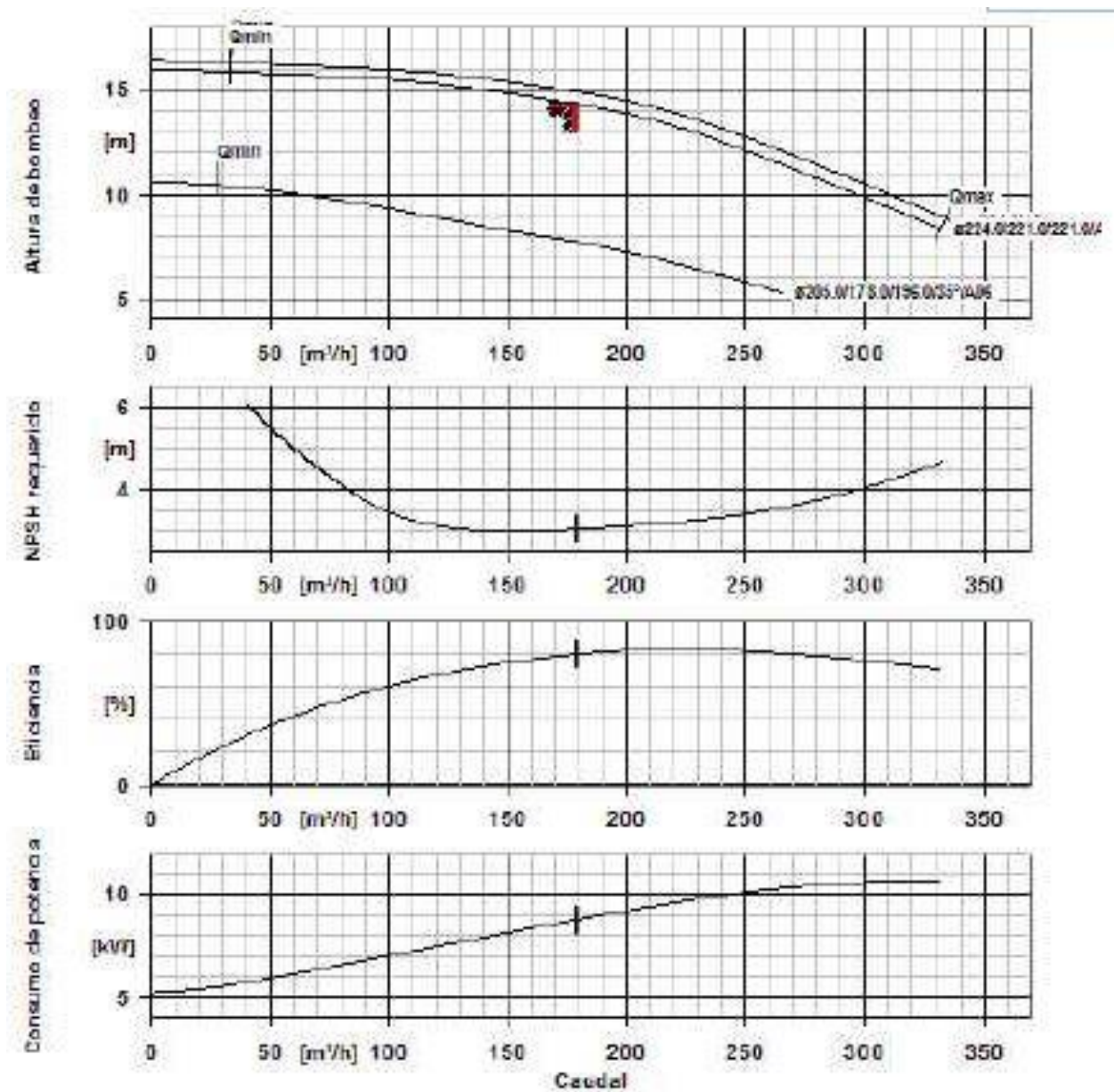


Figura 32: Curvas características obtenidas para la bomba Etaline 150-150-200 (Fuente: KSB Easysselect)



Figura 33: Imagen de la bomba Etaline 150-150-200 (Fuente: KSB Easysselect)

Se refleja un resumen de los modelos obtenidos en la Tabla 20.

Fabricante	Modelo de bomba	Rendimiento (%)	Consumo (kW)
Grundfos	NB 100-200/191 A-F2-A-E-BAQE	74,80	9,30
KSB	Etaline 150-150-200	79,37	8,76

Tabla 20: Tabla resumen de los modelos de bomba Booster (Fuente: Elaboración propia)

Como es lógico, se elegirá la bomba KSB Etaline 150-150-200 al tener el mayor rendimiento de ambas opciones, de un 79,37% con un consumo de 8,76 kW. No se comparan los puntos de operación, ya que ambas bombas funcionan cercanas al punto de operación requerido por la instalación.

El $NPSH_r$ de la bomba Booster seleccionada es de aproximadamente 1 metro. La presión de entrada es de 63,3 bar, equivalente a 633 metros columna de agua, por lo que no habrá cavitación.

8.7. Resumen de las bombas del sistema

A continuación, se adjunta un resumen en la Tabla 21 que contiene los modelos finalmente escogidos para nuestra EDAM, con sus rendimientos y consumos de potencia. Estos datos se emplearán en el siguiente apartado (número 9), el último de este Anexo III, en el cual se calculará el consumo específico final de toda la EDAM.

Parte de la EDAM	Fabricante	Modelo	Rendimiento (%)	Consumo (kW)
Captación/Alimentación	Wilo	K8.130	77,20	37,80
Distribución	Grundfos	CR 150-6	71,90	58,17
Alta presión (HPP)	KSB	CA 125-10.2	78,11	372,05
Bomba Booster	KSB	Etaline 150-150-200	79,37	8,76

Tabla 21: Tabla resumen de los modelos de bombas que se emplearán en nuestra EDAM (Fuente: Elaboración propia)

Cabe destacar que, para la captación, habrá dos de las tres bombas funcionando a la vez, por lo que habrá que multiplicar el consumo por 2 en los siguientes cálculos de consumo específico. La tercera bomba actuará de reserva, y no consumirá potencia hasta que otra de las dos deje de funcionar. Por lo tanto, siempre habrá dos bombas consumiendo en la captación.

Ahora pasamos al apartado 9 de este Anexo, en el cual emplearemos los datos de las bombas para obtener el consumo específico final. Este nos será de gran utilidad para dimensionar el sistema eólico en el Anexo IV y para saber si nuestra planta es eficiente energéticamente al compararla con plantas del mismo tipo ya existentes.

9. Cálculo del consumo específico final de la EDAM

Se calculará de tres maneras para poder comparar los distintos resultados. Una con el Excel de ERI, otra con IMSDesign y, la última, sumando todas las potencias de las bombas. Para las dos primeras, modificaremos los rendimientos y consumos de las bombas en los softwares respectivos, que antes estaban supuestos, obteniendo como resultado el consumo específico final del núcleo de desalación. En la última obtendremos el consumo de toda la planta, ya que en las primeras no se tienen en cuenta los consumos de las bombas de captación y de distribución.

9.1. Consumo específico final con ERI

Introducimos los rendimientos reales de las bombas de alta presión (“High Pressure Pump”) y de la bomba Booster (“Circulation Pump”) en el Excel de ERI, reflejado en la Figura 34. Los rendimientos de los motores de las bombas se han supuesto.

Parameter	Value
Pump efficiency	78%
Motor Efficiency	97%
Q (Flowrate)	147,7 m ³ /hr
Diff. Pressure	62,7 bar
Electrical Power	338,1 kW

Parameter	Value
Pump efficiency	79,4%
Motor Efficiency	98,0%
VFD Efficiency	100%
Q (Flowrate)	176,8 m ³ /hr
Diff. Pressure	2,2 bar
Electrical Power	13,7 kW

Figura 34: Introducción de los rendimientos reales de la HPP y la Bomba Booster en el Excel de ERI (Fuente: Energy Recovery)

Así, obtenemos el siguiente resultado (Figura 35) para el consumo específico final del núcleo de desalación de la EDAM. Recordar que en este consumo no se incluyen los de las bombas de captación ni los de la bomba de distribución. Esto quiere decir que este resultado sólo lo podemos comparar con la suma de las potencias obtenidas en el apartado 6 de las bombas de alta presión y la bomba Booster. Obtenemos 2,41 kWh/m³.

PX Technology Performance	
PX unitary flow	59,5 m ³ /hr
Salinity Increase at membranes	2,5%
Volumetric mixing VM	5,4%
Lubrication flow (LF) per PX array	1,6 m ³ /hr
LF as % of concentrate flow	0,9%
HP DP	0,8 bar
LP DP	0,8 bar
RO Specific Energy **	2,41 kWh/m³
Efficiency	96,77%

** Does not Include Feedwater Supply Pump Energy consumption

Figura 35: Consumo final obtenido con el Excel de ERI (Fuente: Energy Recovery)

9.2. Consumo específico final con IMSDesign

Introducimos los rendimientos de las bombas en la pestaña “Cálculos”, y en la misma página obtenemos el consumo específico del núcleo de desalación. Obtenemos 2,49 kWh/m³ (Figura 36), muy similar al consumo obtenido con el Excel de ERI en el apartado anterior.

Cálculo de potencia		Paso1	ERD Impulsar
Bomba / incremento de presión	bar	64,7	2,2
Caudal de producto	m ³ /d	3500,0	
Caudal bomba	m ³ /d	3536,5	4241,3
Rendimiento bomba	%	78,1	79,4
Rendimiento motor	%	97,0	98,0
Eficiencia variador frecuencia	%	100,0	100,0
Potencia/etapa/paso	kw	348,9	14,1
	BHP	467,7	18,9
Potencia total de bombeo	kw	363,0	
Potencia específica de bombeo	kwh/m ³	2,49	

Figura 36: Consumo final obtenido con el software de Hydranautics (Fuente: IMSDesign)

9.3. Consumo específico final con las potencias de las bombas

Para ello, tenemos que dividir cada consumo entre la producción de la planta (3500 m³/día). Éste se tendrá que pasar a m³/h, ya que el consumo en kW de las bombas es por hora. Tendríamos una producción de 145,8 m³/h. Así, para obtener el consumo específico (kWh/m³), se dividirán los consumos de las bombas entre la producción en horas de la EDAM (145,8 m³/h). Obtenemos los resultados de la Tabla 22.

Bomba	Consumo (kW)	Consumo específico (kWh/m ³)
Alta presión (HPP)	372,05	2,55
Booster	8,76	0,06
Captación (x2)	75,6	0,52
Distribución	58,17	0,40
TOTAL=	514,58	3,53

Tabla 22: Tabla de consumos específicos de cada bomba (Fuente: Elaboración propia)

Así, obtenemos un consumo específico final de 2,61 kWh/m³ para el núcleo de desalación (HPP + Booster). Es un poquito mayor que los 2,41 y 2,49 kWh/m³ conseguidos con IMSDesign y ERI, lo cual se debe a haber supuesto los rendimientos de los motores en sus respectivos softwares de cálculo.

Para la EDAM completa, el consumo específico final es de 3,53 kWh/m³. El consumo total de la planta en kW es de 514,58 kW.

No hay que olvidar que, además de las bombas presentes en la tabla, habrá dos de reserva (una para la captación y otra para la distribución), exactamente los mismos modelos para cada uno. Estas no consumirán potencia hasta que entren en funcionamiento debido a la parada de una de las bombas activas. Esto hace que el consumo de la planta no varíe, aunque entren en funcionamiento las de reserva, el implicar esto que se dejará de consumir la misma potencia en las principales. En instalaciones desaladoras de tamaños en el rango en que se encuentra la nuestra (poca capacidad) no se suelen emplear bombas de reserva, ya que esto aumenta considerablemente los costes y no se podrán asumir debido a la poca producción que se tiene. Además, el depósito regulador puede aguantar algunos días abasteciendo y, con un buen mantenimiento, las bombas no suelen fallar. Aun así, en esta EDAM se ha decidido implantar las bombas de reserva ya que, al no haber hecho un análisis exhaustivo de costes y del servicio técnico que tendremos disponible en la zona, esta decisión no tendrá inconvenientes significativos en este estudio.

Damos por bueno este consumo, ya que las plantas desaladoras actuales en Canarias consumen entre los 4 y los 5 kWh/m³ según el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, por lo cual nuestra EDAM es eficiente en comparación a las que hay actualmente en funcionamiento.

También hay que mencionar que nuestro consumo podría ser más bajo si el pozo regulador no tuviese el requisito de estar a gran altura (100 m) y a gran distancia (5,5 km) de la EDAM. De

estar más cercano, el consumo podría rondar los 3 kWh/m³. Sin embargo, por ahora es la única opción, ya que uno de los núcleos a abastecer (Cruce de Arinaga) está a gran altura, y un requisito es que el pozo regulador se encuentre por encima para poder realizar el abastecimiento mediante trasvase por gravedad. Existe la posibilidad de poner la EDAM más cerca del pozo regulador, pero se incrementarían los costes de captación y la modificación no supondría un ahorro considerable del consumo energético.

Sin embargo, en el futuro podría estudiarse a fondo la posibilidad de transportar el agua hacia la depurado próxima a la EDAM, lo cual ahorraría considerablemente ese consumo extra en la distribución.

Aunque no se ha incluido un análisis de costes en este estudio, de forma orientativa se analizará qué coste tendría nuestra planta si se alimentase con energía eléctrica de la red. Esto nos dará una idea de la importancia del abastecimiento con energía eólica en cuanto al ahorro de costes económicos.

En la página web de Endesa Clientes encontramos que, en el mercado regulado, esta empresa vende cada kWh por 0,14 euros. Se supondrán las condiciones máximas de producción, que serían 3500 m³/día de agua producto y funcionamiento continuo los 365 días del año. Así, con unos cálculos sencillos, nuestra EDAM tendría los siguientes costes:

$$\text{Coste del m}^3 \text{ de agua} = 0,14 \frac{\text{Euros}}{\text{kWh}} * 3,53 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} = 0,49 \frac{\text{Euros}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Coste diario de la EDAM} = 0,49 \frac{\text{Euros}}{\text{m}^3} * 3500 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 1.715 \frac{\text{Euros}}{\text{día}}$$

$$\text{Coste anual de la EDAM} = 1.715 \frac{\text{Euros}}{\text{día}} * 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 625.975 \frac{\text{Euros}}{\text{año}}$$

Se vuelve a destacar que el abastecimiento de energía eléctrica será realizado por el sistema eólico que se dimensionará en el Anexo IV, el cual, obviamente, tendrá sus costes económicos de implantación y de operación (los cuales no analizaremos). Sin embargo, la experiencia en proyectos de este tipo demuestra que el abastecimiento con energía eólica resulta económicamente rentable.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO IV

CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA EÓLICO

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO
CON ENERGÍA EÓLICA PARA ABASTECIMIENTO HUMANO
EN GRAN CANARIA**

AUTOR: Marvin Jozef González Van leeuwe

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE - ANEXO IV

1. Introducción	1
2. Análisis del recurso eólico de la zona	2
2.1. Emplazamiento del aerogenerador	2
2.2. Datos del recurso eólico y orientación del aerogenerador	3
2.3. Distribución de probabilidad de velocidad del viento	6
3. Selección del aerogenerador para la potencia prevista	9
3.1. Energía eléctrica necesaria y coordenadas del emplazamiento.....	11
3.2. Selección de los modelos disponibles en el mercado	12
3.3. Análisis energético de los modelos disponibles	15
3.4. Selección final del modelo específico de aerogenerador.....	17

Índice de figuras – Anexo IV

Figura 1: Aerogeneradores instalados y en proyecto cercanos al emplazamiento de la EDAM (Fuente: Grafcan)	2
Figura 2: Aerogenerador seleccionado para nuestra EDAM (Fuente: Grafcan).....	3
Figura 3: Mapa eólico de Canarias (Fuente: IDAE)	4
Figura 4: Mapa eólico del municipio de Agüimes (Fuente: IDAE).....	4
Figura 5: Datos eólicos A 80 metros en el punto más cercano al emplazamiento del aerogenerador (Fuente: IDAE).....	5
Figura 6: Rosa de los vientos de las frecuencias (%) y las velocidades (m/s) a 80 m en el más punto cercano al emplazamiento del aerogenerador (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de IDAE).....	6
Figura 7: Gráfica de distribución de velocidades obtenida con la distribución de Weibull (Fuente: Elaboración propia).....	8
Figura 8: Interfaz de la herramienta online del ITC para estimar la energía producida por un aerogenerador (Fuente: ITC).....	10
Figura 9: Curva de potencia de un modelo específico de aerogenerador (Fuente: ITC)	11
Figura 10: Coordenadas UTM del emplazamiento de nuestro aerogenerador (Fuente: Grafcan) 12	
Figura 11: Captura en la que se observa que el fabricante Clipper ya no está en activo desde el año 2012 (Fuente: www.thewindpower.net).....	12
Figura 12: Lista de modelos de aerogeneradores. La expresión "old model" indicará que ya no están disponibles (Fuente: www.thewindpower.net)	13
Figura 13: Ejemplo de cálculo con la aplicación del ITC con uno de los modelos estudiados, a 60 m de altura (Fuente: Aplicación online del ITC)	16
Figura 14: Curva de potencia del aerogenerador D6 62/1250kW de DeWind (Fuente: Aplicación online del ITC).....	19
Figura 15: Imagen real del aerogenerador D6 62/1250kW de DeWind (Fuente: www.en.wind-turbine-models.com)	19

Índice de tablas – Anexo IV

Tabla 1: Datos eólicos a 80 metros en el punto más cercano al emplazamiento del aerogenerador (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de IDAE)	5
Tabla 2: Valores obtenidos para la distribución de Weibull con los datos de viento estudiados (Fuente: Elaboración propia).....	8
Tabla 3: Lista de modelos de aerogeneradores analizados (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de www.thewindpower.net).....	15
Tabla 4: Lista de modelos de aerogeneradores disponibles, con su altura de rotor y la energía anual que producen (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de www.thewindpower.net y de la aplicación online del ITC)	16
Tabla 5: Resultados del factor de carga para los modelos disponibles (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de la aplicación online del ITC)	17
Tabla 6: Análisis de la generación de energía eléctrica de los modelos frente al consumo de la EDAM (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de la aplicación online del ITC)	18
Tabla 7: Características principales del modelo de aerogenerador D6 62/1250kW de la empresa DeWind. (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de www.thewindpower.net).....	20

1. Introducción

En este Anexo IV se dimensionará el sistema de abastecimiento energético de nuestra EDAM, específicamente con energía eólica, mediante aerogeneradores. Éstos tendrán que ser capaces de abastecer el consumo de la desaladora, ya calculado en el Anexo III de este estudio.

Para poder obtener un modelo de aerogenerador que genere la energía eléctrica que necesitamos, tendremos que realizar dos estudios.

El primero, será el análisis del recurso eólico de la zona en la que implantaremos nuestro sistema eólico. Éste procedimiento se dividirá en tres partes diferenciadas:

1. Decidiremos el emplazamiento exacto que tendrá el aerogenerador.
2. Teniendo definido el emplazamiento, obtendremos los datos del recurso eólico de dicha zona, obteniendo así los parámetros necesarios para realizar una distribución de probabilidad de velocidad del viento.
3. Realizar la distribución mencionada anteriormente, que será una distribución de Weibull.

Posteriormente, se realizará la selección de un modelo de aerogenerador real que logre abastecer energéticamente a nuestra EDAM a partir del recurso eólico disponible en su emplazamiento. Para ello:

1. Definiremos las coordenadas exactas del emplazamiento del aerogenerador y la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de nuestra instalación desaladora.
2. Estudiaremos qué modelos están disponibles en el mercado, de los que aparecen en la base de datos de la herramienta de cálculo que emplearemos (perteneciente al ITC).
3. Analizaremos la potencia y la energía eléctrica que generará cada uno de los modelos seleccionados en el emplazamiento definido. A partir de estos resultados, se seleccionará un modelo final, que será el que abastece a la EDAM.

Además, tendremos en cuenta si los modelos son capaces de abastecer completamente a la instalación, y también la cantidad de exceso de energía que generan si se diese el caso. También será importante tener en cuenta la altura de instalación de la torre del aerogenerador, y el factor de carga que tendrán estas máquinas.

Así, siguiendo estos pasos, se dimensionará y definirá el sistema de abastecimiento eólico para nuestra EDAM.

2. Análisis del recurso eólico de la zona

Necesitamos conocer las condiciones eólicas que se dan en el emplazamiento de la EDAM, el cual es la zona de Arinaga, en la isla de Gran Canaria. Para ello, se intentó buscar dicha información en la página web del ITC (Instituto Tecnológico de Canarias), pero la aplicación para obtener el recurso eólico daba fallos. Por ello, extraeremos los datos deseados de la página web del Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). En ella, encontraremos el Atlas Eólico de España, y podremos extraer la información del recurso eólico en la zona de Arinaga.

2.1. Emplazamiento del aerogenerador

Antes de buscar los datos referentes al recurso eólico, tendremos que definir el emplazamiento de los aerogeneradores, explicado en la Memoria. Como se menciona en dicho documento, ya hay una serie de aerogeneradores instalados al lado de la EDAM, por lo que eso es un buen indicativo de que es una zona óptima para poner el nuestro, tanto por el recurso eólico como por la disponibilidad del suelo. También hay una serie de aerogeneradores en construcción o en proyecto en la zona. Debido a que no disponemos de los recursos para hacer estudios intensos necesarios para decidir la implantación de un aerogenerador (estudios ambientales, de viento, etc.) y que este estudio no tiene un alcance ejecutable, tomaremos la suposición de que uno de los aerogeneradores ya proyectados en la zona corresponderá al de nuestra EDAM. En la Figura 1 se observan los aerogeneradores ya instalados (en color verde) y aquellos que están en proyecto (en color rojo).



Figura 1: Aerogeneradores instalados y en proyecto cercanos al emplazamiento de la EDAM (Fuente: Grafcan)

Así, seleccionaremos uno de los aerogeneradores rojos como el de nuestra EDAM. Para evitar posibles turbulencias del viento debido a la cercanía de los edificios del polígono industrial, seleccionaremos un aerogenerador de la fila inferior de los rojos. Como el recurso eólico suele ser mayor cuanto más cerca se sitúe el aerogenerador al mar, se seleccionará el más cercano a la costa de los de la fila inferior.



Figura 2: Aerogenerador seleccionado para nuestra EDAM (Fuente: Grafcan)

Cabe destacar que, para el emplazamiento de nuestro aerogenerador, se podría haber optado por colocarlos en el mar. Sin embargo, esta opción podría dar lugar a problemas de cimentación. Además, debido al alcance limitado de este estudio, no disponemos de los estudios necesarios del fondo marino que rodea la costa cercana al emplazamiento de la EDAM, por lo que tampoco es posible decidir la localización exacta del aerogenerador, como sí lo es para el caso por el cual hemos optado (colocarlo en las parcelas próximas al polígono industrial). Otro inconveniente a tener en cuenta a la hora de colocar el aerogenerador en el mar, es el transporte de la energía eléctrica hacia la EDAM, que debería de realizarse con cableado submarino, incrementando así los costes.

2.2. Datos del recurso eólico y orientación del aerogenerador

Una vez seleccionado el emplazamiento del aerogenerador, podemos proceder a estudiar el recurso eólico en este punto. Para ello, como se mencionó anteriormente, emplearemos los recursos disponibles en la página web de IDAE. En esta fuente, de inicio ya encontramos un mapa eólico de Canarias, en donde se puede observar que la localización de nuestra EDAM es bastante buena en cuanto al potencial de aprovechamiento de energía eólica, situándose en una zona con una densidad de potencia del viento mayor a los 800 W/m^2 .

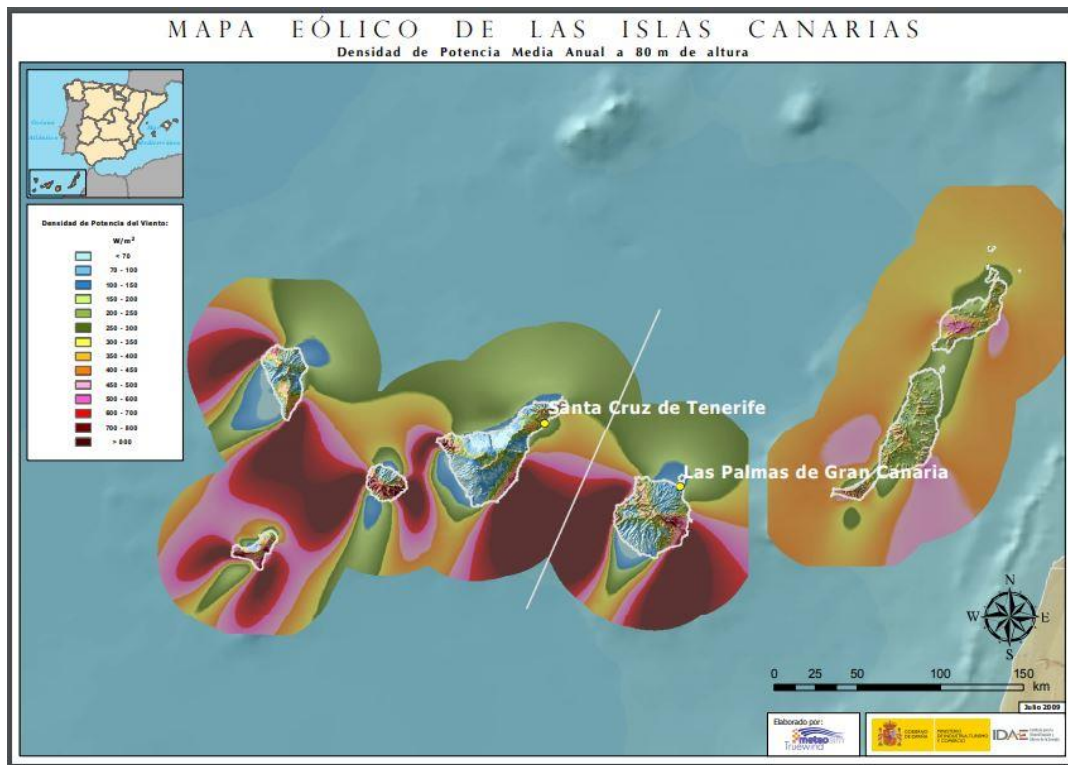


Figura 3: Mapa eólico de Canarias (Fuente: IDAE)

Entramos a la aplicación del Atlas Eólico, y buscamos la zona de la que nos interesa conocer los datos. Según la bibliografía consultada, en esta aplicación es recomendable estudiar los datos del viento en la capa de 2,5 kilómetros y rosas de viento a 80 metros, ya que a esta altura el viento es más homogéneo e intenso. Estudiaremos los datos del municipio en el que estará situada la EDAM, en este caso Agüimes. Una vez en él, buscamos un punto situado lo más cercano posible al emplazamiento del aerogenerador, obteniendo los resultados reflejados en la Tabla 1.

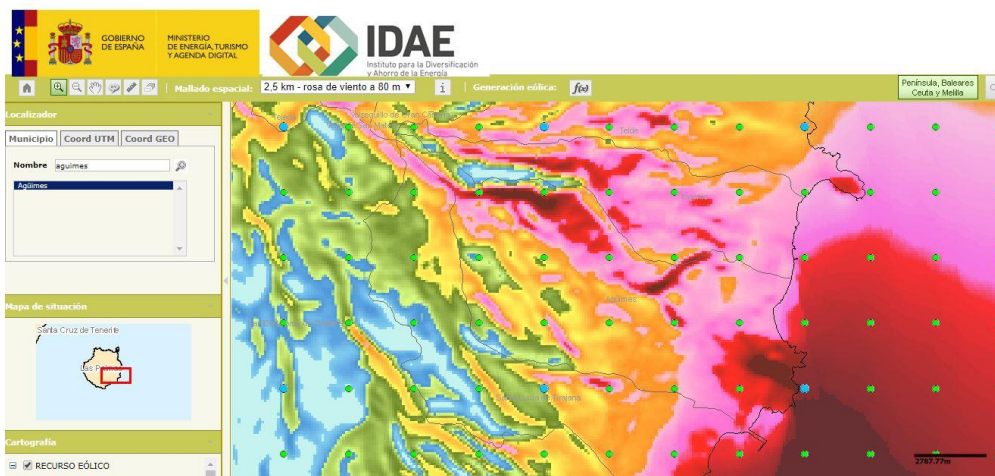


Figura 4: Mapa eólico del municipio de Agüimes (Fuente: IDAE)

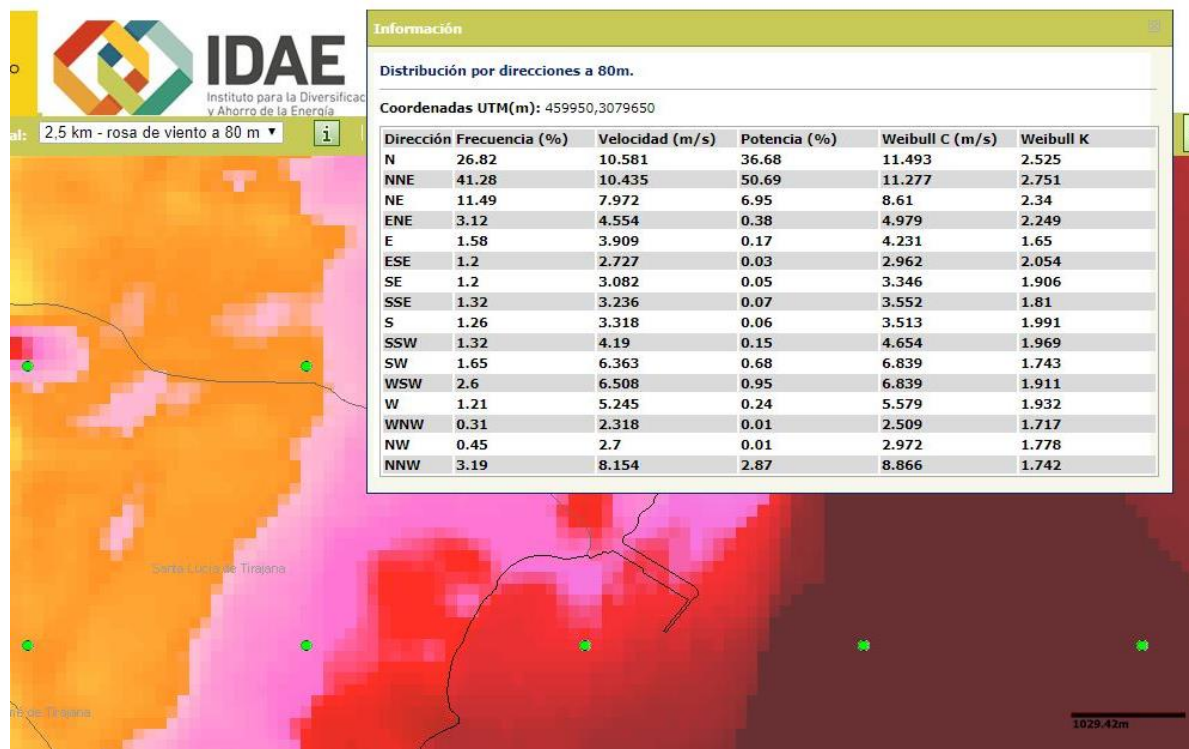


Figura 5: Datos eólicos A 80 metros en el punto más cercano al emplazamiento del aerogenerador (Fuente: IDAE)

Dirección	Frecuencia (%)	Velocidad (m/s)	Potencia (%)	Weibull C (m/s)	Weibull K
N	26,82	10,581	36,68	11,493	2,525
NNE	41,28	10,435	50,69	11,277	2,751
NE	11,49	7,972	6,95	8,61	2,34
ENE	3,12	4,554	0,38	4,979	2,249
E	1,58	3,909	0,17	4,231	1,65
ESE	1,2	2,727	0,03	2,962	2,054
SE	1,2	3,082	0,05	3,346	1,906
SSE	1,32	3,236	0,07	3,552	1,81
S	1,26	3,318	0,06	3,513	1,991
SSW	1,32	4,19	0,15	4,654	1,969
SW	1,65	6,363	0,68	6,839	1,743
WSW	2,6	6,508	0,95	6,839	1,911
W	1,21	5,245	0,24	5,579	1,932
WNW	0,31	2,318	0,01	2,509	1,717
NW	0,45	2,7	0,01	2,972	1,778
NNW	3,19	8,154	2,87	8,866	1,742

Tabla 1: Datos eólicos a 80 metros en el punto más cercano al emplazamiento del aerogenerador (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de IDAE)

A partir de esta información, el primer paso es el de decidir la orientación que tendrá el aerogenerador. Para ello, elaboraremos un gráfico de coordenadas polares que se conoce como la rosa de los vientos, mediante Excel. En ella se podrá apreciar gráficamente con qué frecuencia y velocidad sopla el viento en cada dirección, y a partir de ello definiremos la ubicación del aerogenerador. Las velocidades y frecuencias serán representadas en gráficos distintos, para poder apreciarlas bien por separado.

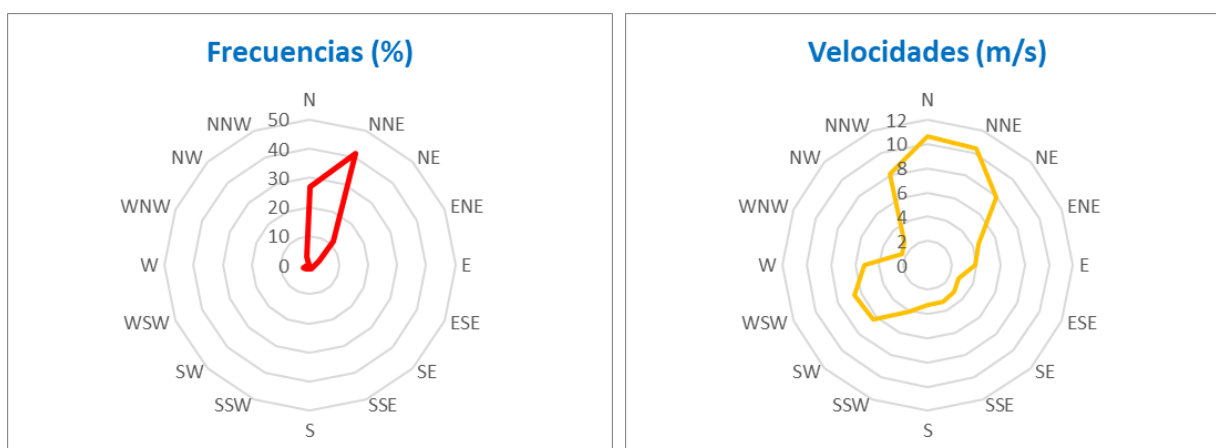


Figura 6: Rosa de los vientos de las frecuencias (%) y las velocidades (m/s) a 80 m en el más punto cercano al emplazamiento del aerogenerador (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de IDAE)

Como se puede apreciar en la Figura 6, el viento sopla con la mayor frecuencia hacia el Nornoreste (NNE). En cuanto a los velocidades, las mayores se dan en el Norte (N) y el Nornoreste (NNE). Debido a que las velocidades en ambas direcciones son idénticas (alrededor de los 10,5 m/s), pero la frecuencia del Norte (26,82%) es baja frente a la del Nornoreste (41,28%), el aerogenerador de nuestra EDAM estará orientado hacia el Nornoreste (NNE), ya que en esta dirección tendremos un aprovechamiento óptimo del recurso eólico disponible en el emplazamiento en cuestión.

2.3. Distribución de probabilidad de velocidad del viento

Se obtendrá mediante una distribución de Weibull. Para ello, se emplea la siguiente ecuación:

$$f(v) = \frac{K}{C} * \left(\frac{v}{C}\right)^{K-1} * e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^K}$$

Ecuación 1: Distribución de Weibull $f(v)$

Donde K es el “factor de forma”, el cual definirá la forma de la curva de la gráfica. Si no se dispone de su valor, se supone igual a 2, caso conocido como distribución de Rayleigh. C es el “factor de escala”, y está relacionado con la velocidad media (se da en m/s). Por último, v es la velocidad del viento, también en m/s.

Para obtener K y C , necesitaremos el promedio de los datos de la Tabla 1 de estos valores. En dicha tabla se dan para cada dirección del viento. Así, obtenemos que:

$$K = 2,004 \quad C = 5,764$$

Empleando la Ecuación 1 con los valores de K y C obtenidos, obtenemos los siguientes resultados de $f(v)$ para cada velocidad que nos interese analizar. Para este caso, hemos tomado velocidades desde 0 a 25 m/s, en intervalos de 1 m/s. También se mostrará la $f(v)$ en porcentaje, para tener una mejor idea de la probabilidad de cada velocidad de viento. Por otro lado, también se pueden deducir fácilmente las horas que se tendrá cada velocidad para el viento por año, simplemente multiplicando el valor de $f(v)$ para cada velocidad por el total de horas que hay en un año natural (365 días equivalen a 8760 horas). Así, tenemos que:

Velocidad (m/s)	$f(v)$	$f(v)$ (%)	Horas por año
0	0,00000	0,00000	0,0
1	0,05812	5,81197	509,1
2	0,10655	10,65498	933,4
3	0,13776	13,77591	1206,8
4	0,14896	14,89634	1304,9
5	0,14211	14,21086	1244,9
6	0,12248	12,24788	1072,9
7	0,09658	9,65825	846,1
8	0,07021	7,02117	615,1
9	0,04728	4,72828	414,2
10	0,02959	2,95949	259,3
11	0,01726	1,72573	151,2
12	0,00939	0,93913	82,3
13	0,00478	0,47758	41,8
14	0,00227	0,22718	19,9
15	0,00101	0,10117	8,9
16	0,00042	0,04221	3,7
17	0,00017	0,01650	1,4
18	0,00006	0,00605	0,5
19	0,00002	0,00208	0,2
20	0,00001	0,00067	0,1
21	0,00000	0,00020	0,0

22	0,00000	0,00006	0,0
23	0,00000	0,00002	0,0
24	0,00000	0,00000	0,0
25	0,00000	0,00000	0,0

Tabla 2: Valores obtenidos para la distribución de Weibull con los datos de viento estudiados (Fuente: Elaboración propia)

Con los valores obtenidos de la distribución de Weibull, se genera la gráfica de distribución de velocidades que buscamos. En el eje de abscisas tendemos a las velocidades en m/s, desde el 0 hasta el 25, en intervalos de 1 (primera columna de la Tabla 2). En el eje de ordenadas estarán las frecuencias en porcentajes, que corresponden a los valores de $f(v)$ en la tercera columna de la Tabla 2.

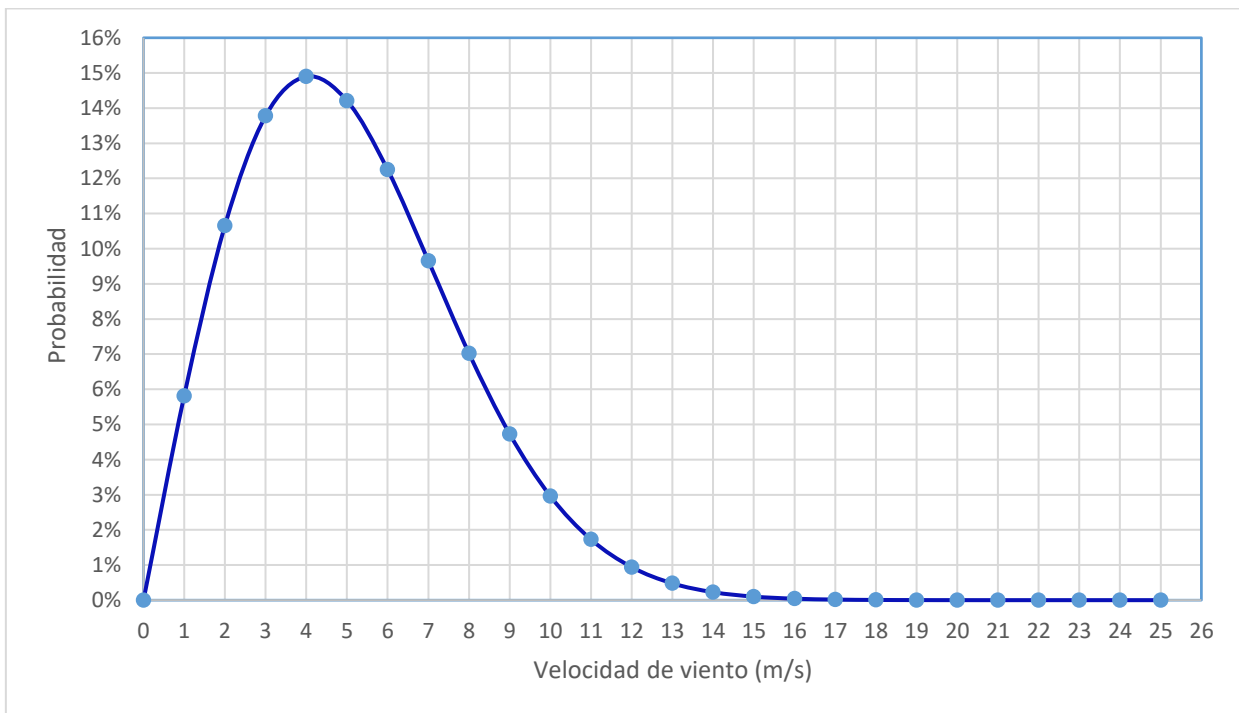


Figura 7: Gráfica de distribución de velocidades obtenida con la distribución de Weibull (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede observar fácilmente en la Figura 7, la velocidad del viento se situará la mayor parte del tiempo entre los 2 y los 7 m/s, siendo la velocidad más probable entre los 4 y los 5 m/s. Teniendo ya la distribución de velocidades y la rosa de los vientos, el siguiente paso en nuestros cálculos será el de la selección del aerogenerador adecuado. Con él, a partir del recurso eólico disponible en su emplazamiento obtendremos la potencia eléctrica necesaria para el funcionamiento de la EDAM.

3. Selección del aerogenerador para la potencia prevista

Para seleccionar un aerogenerador adecuado para las necesidades de nuestra EDAM, necesitaremos su curva de potencia, la cual en combinación con la distribución de velocidades del apartado anterior nos dará la potencia que obtendremos con cierto modelo de aerogenerador. Será conveniente que proporcione una potencia superior a la que necesitemos para nuestra instalación desaladora, ya que de esa manera aseguraremos que siempre haya abastecimiento energético, incluso en periodos de baja generación de energía eólica.

Una vez obtenida la curva de potencia del aerogenerador (a partir del fabricante o de otros recursos), se emplea la siguiente ecuación para obtener la potencia promedio que éste genera:

$$P = \int_{v_A}^{v_P} P_{AG} * f(v) * dv$$

Ecuación 2: Potencia promedio que se obtiene con un aerogenerador

Donde v_P es la velocidad de parada del aerogenerador, mientras que v_A es su velocidad de arranque. El término $f(v)$ corresponde a las probabilidades obtenidas en el apartado anterior en la distribución de Weibull. Por último, P_{AG} corresponde a la curva de potencia del aerogenerador.

Una vez obtenida la potencia promedio, se dividirá entre la potencia nominal del aerogenerador para obtener su factor de carga (FC), el cual a partir de un 20-25% ya es considerado aceptable según la bibliografía consultada:

$$FC (\%) = \frac{P}{P_{nominal.AG}} * 100$$

Ecuación 3: Factor de carga de un aerogenerador

Si se desea conocer el viento que incide sobre el aerogenerador durante todo el año, se emplea:

$$P_{incidente} = \int_0^{\infty} f(v) * dv$$

Ecuación 4: Potencia que incidirá sobre el aerogenerador en su emplazamiento

Para simplificar el proceso de cálculo de este apartado, emplearemos la herramienta online que proporciona el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), la cual ofrece una calculadora que trabajará con el recurso eólico del emplazamiento indicado y con las curvas de potencia de varios modelos reales de aerogeneradores que se encuentran en la base de datos del ITC.

Así, esta herramienta trabajará con la Ecuación 2, en la cual empleará la distribución de Weibull según las coordenadas UTM (X e Y) del emplazamiento que le proporcionemos, y las curvas de potencia del modelo de aerogenerador que se desee estudiar para el emplazamiento en cuestión. Con ello, calculará la energía y la potencia anual que generará el modelo escogido en dicha localización, teniéndose siempre en cuenta que es una estimación.

Una vez obtenidos estos datos de los modelos disponibles, calcularemos el factor de carga de cada uno con la Ecuación 3, para conocer cuánto se está aprovechando el aerogenerador. Finalmente, en base a la energía y potencia generadas, y los factores de carga, escogeremos uno de los modelos estudiados para ser el que abastecerá a nuestra EDAM.

Como se puede ver, gracias a la herramienta proporcionada por el ITC, no hará falta operar con la Ecuación 2, lo cual simplifica bastante el proceso de cálculo, debido a la alta cantidad de modelos de aerogeneradores que se estudiarán.

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

Posición (UTM)		Límites R.E.C
X =	<input type="text"/>	[170550, 677550]
Y =	<input type="text"/>	[3040750, 3274850]

Aerogenerador

Modelo: ?

Curva de potencia: Ningún archivo seleccionado ?

Altura (m): ?

Figura 8: Interfaz de la herramienta online del ITC para estimar la energía producida por un aerogenerador (Fuente: ITC)

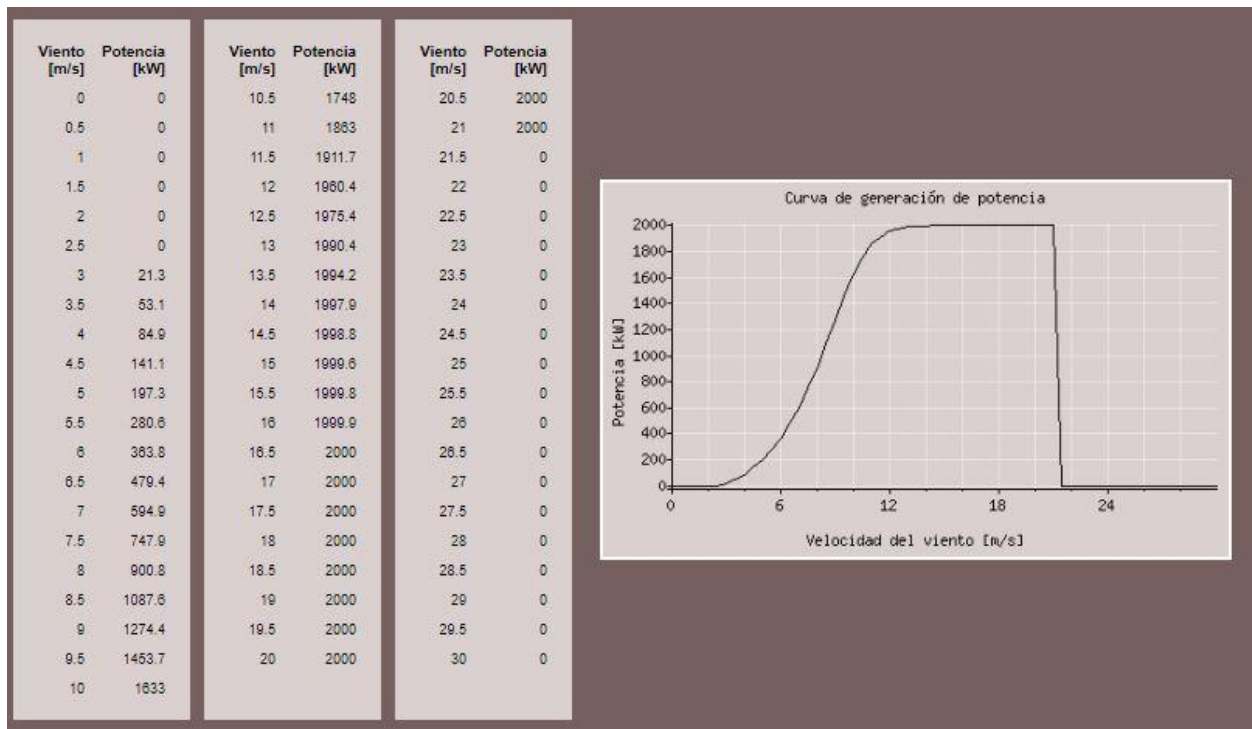


Figura 9: Curva de potencia de un modelo específico de aerogenerador (Fuente: ITC)

3.1. Energía eléctrica necesaria y coordenadas del emplazamiento

Necesitaremos conocer el consumo total de la planta desaladora en todo el año para saber qué necesidades energéticas tendremos. Supondremos un 90% de disponibilidad de la instalación (lo recomendado según la bibliografía consultada) y, sabiendo el consumo diario, obtendremos el consumo anual.

$$\text{Consumo diario} = 3500 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 3,53 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} = 12355 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$$

$$\text{Consumo anual} = 12355 \frac{\text{kWh}}{\text{día}} * \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} * 0,9 = 4058618 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

Es decir, nuestra EDAM tendrá un consumo anual aproximado de 4.058.618 kWh. También sabemos que la potencia nominal que consumirá la planta será de 514,58 kW (dato extraído del Anexo III de este estudio).

Como se puede observar en la Figura 8, necesitaremos las coordenadas UTM del emplazamiento de nuestro aerogenerador. Para ello, emplearemos la herramienta online Grafcan,

y, seleccionando el punto del emplazamiento del aerogenerador, obtenemos unas coordenadas UTM X=459485,48 e Y=3080664,53.

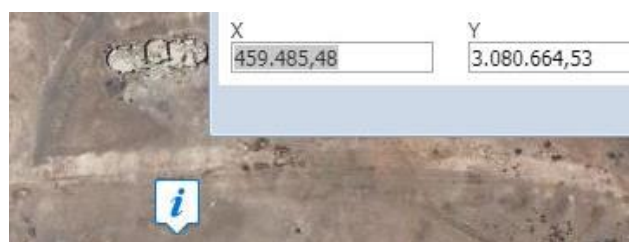


Figura 10: Coordenadas UTM del emplazamiento de nuestro aerogenerador (Fuente: Grafcan)

3.2. Selección de los modelos disponibles en el mercado

Lo siguiente que necesitaremos para poder operar con la calculadora del ITC y los modelos de aerogeneradores que ésta tiene en su base de datos, será seleccionar aquellos que estén disponibles actualmente en el mercado, ya que hay algunos modelos que se han dejado de fabricar. Para ello, se ha consultado la página web de The Wind Power (www.thewindpower.net). Dicha página web pone a nuestra disposición diversas bases de datos de fabricantes y de modelos de aerogeneradores, y su disponibilidad a tiempo real. Además, también nos detalla la potencia que estos modelos generan y sus características principales.

Para empezar, estudiaremos qué fabricantes de la lista empleada por el ITC ya no existen o cuyos modelos ya no estén disponibles en el mercado. Encontramos que, según la página web de The Wind Power, ya no están en activo en el mercado de energía eólica los fabricantes siguientes, presentes en la base de datos del ITC: Clipper (2012), Eozen (2015), Fuhrländer (2012), Get (1992), Hanseatische, Izar (2007), Mitsubishi, Seewind (1996), Torres, Turbowind (2016), Ventis (1996) y Villas.

China Creative Wind Energy	China	
Clipper	USA	No more active (2012)
CNYD	China	

Figura 11: Captura en la que se observa que el fabricante Clipper ya no está en activo desde el año 2012 (Fuente: www.thewindpower.net)

Por ello, excluirémos del estudio a todos los modelos de la lista del ITC que provengan de estos fabricantes. La Tabla 3 contendrá la relación de los modelos de aerogeneradores junto a su disponibilidad en el mercado. Para aquellos modelos que resulten como disponibles actualmente en el mercado, indicaremos su energía anual estimada en la Tabla 4.

- 20 (150 kW, 20 m diameter) (old model)
- 28 (225 kW, 28 m diameter) (old model)
- 44 (600 kW, 44 m diameter) (old model)
- 48700 (700 kW, 48 m diameter) (old model)
- 48 (750 kW, 48 m diameter) (old model)
- 62 (1300 kW, 62 m diameter) (old model)
- 74 (1670 kW, 74 m diameter) (old model)
- 80 1.6 (1670 kW, 80 m diameter) (old model)
- 86 (1670 kW, 86 m diameter) (old model)
- 80 2.0 (2000 kW, 80 m diameter) (old model)

Figura 12: Lista de modelos de aerogeneradores. La expresión "old model" indicará que ya no están disponibles
(Fuente: www.thewindpower.net)

Fabricante	Modelo	Disponibilidad
DEWIND	D4 46/600kW	SÍ
DEWIND	D6 60/1250kW	NO
DEWIND	D6 62/1250kW	SÍ
DEWIND	D8 – 80m	SÍ
ECOTECNIA	100	NO
ECOTECNIA	44/630	NO
ECOTECNIA	48/750	NO
ECOTECNIA	62/1300	NO
ECOTECNIA	74/1670	NO
ECOTECNIA	80 1.6	NO
ECOTECNIA	80 2.0	NO
ENERCON	E 40/500	NO
ENERCON	E-101	NO
ENERCON	E-40 /600kW	NO
ENERCON	E-44	SÍ
ENERCON	E-48	SÍ
ENERCON	E-66 /1500kW	NO
ENERCON	E-66 /1800kW	NO
ENERCON	E-82	SÍ
ENERCON	E-82 E2	NO
ENERCON	E44/600	NO
ENERCON	E70 - 2300	SÍ
ENERCON	E70 /2000	NO
ENRON	EW50/750	NO
ENRON	WIND EW-1500S	NO
ENRON	WIND EW-1500SL	NO
ENRON	WIND EW-900	NO
ENRON	WIND EW-900S	NO
ENRON	WIND EW-900SL	NO
GAMESA	EOLICA G66/1650kW	NO

GAMESA	EOLICA G80/2000kW	SÍ
GAMESA	G52-850 kW	NO
GAMESA	G58/850	NO
GAMESA	G87/2000 kW	SÍ
GAMESA	G90	SÍ
GE ENERGY	GE 1.5 s	NO
GE ENERGY	GE 1.5 se	NO
GE ENERGY	GE 1.5 sl	NO
GE ENERGY	GE 1.5 sle	NO
GE ENERGY	GE 1.5 xle	NO
GE ENERGY	GE 2.5xl	NO
GE ENERGY	GE 3.6 sl	NO
GENESIS	GENESIS600	NO
MADE	AE-46	NO
MADE	AE-46/1	NO
MADE	AE-61	NO
MADE	AE-61/1300	NO
MADE	AE-90	NO
MADE	AE-90/2 MW	NO
MADE	AE-52/800	NO
NEG MICON	NM 1500/64	NO
NEG MICON	NM 1000/60	NO
NEG MICON	NM 1500/72	NO
NEG MICON	NM 600/43	NO
NEG MICON	NM 600/48	NO
NEG MICON	NM 750/44	NO
NEG MICON	NM 750/48	NO
NEG MICON	NM 900/52	NO
NORDEX	N43/600	NO
NORDEX	N54/1000	NO
NORDEX	N60	NO
NORDEX	N80	NO
NORDEX	N90	NO
NORDEX	N90/2500 LS	SÍ
NORDEX	S70	NO
NORDEX	S77	NO
NORDTANK	NTK 1500/60	NO
NORDTANK	NTK 600/43	NO
REPOWER	5 M	NO
REPOWER	MD - 77	NO

REPOWER	MM - 70	NO
REPOWER	MM - 82	NO
REPOWER	MM - 92	NO
SIEMENS	SWT-3.6-107	NO
SIEMENS	SWT-2.3-93	NO
SIEMENS	SWT-3.0-101	NO
SÜDWIND	S.46/600	NO
SÜDWIND	S.46/750	NO
TACKE	TW 600	NO
TACKE	TW1.5	NO
TURBOWIND	T600-48	NO
VESTAS	V27/225	NO
VESTAS	V42/600 Kw	NO
VESTAS	V44/600 Kw	NO
VESTAS	V52/850	NO
VESTAS	V66/1,65Mw	NO
VESTAS	V80	NO
VESTAS	V90/1800	NO
VESTAS	V90/2000	SÍ
VESTAS	V90/3000	NO
WIND WORLD	W-4200/600	NO
WIND WORLD	W-4800/750	NO
ZOND	Z-46	NO

Tabla 3: Lista de modelos de aerogeneradores analizados (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de www.thewindpower.net)

3.3. Análisis energético de los modelos disponibles

Para obtener la energía anual que generan estos modelos en el emplazamiento seleccionado mediante la aplicación del ITC, necesitaremos introducir la altura a la cual queremos estudiar el viento. La aplicación posee la mayor cantidad de datos para las alturas de 40, 60 y 80 metros, por lo que es conveniente seleccionar una de estas. Se seleccionará la de 60 metros, ya que está en la media de la serie de alturas y, además, se encuentra el Aeropuerto de Gran Canaria a unos 9 km del emplazamiento del aerogenerador, y no es deseable una interferencia con los aviones que circulen por la zona.

Así, introduciendo las coordenadas UTM del emplazamiento, la altura de 60 metros, y seleccionando uno por uno los modelos disponibles de la Tabla 3, obtenemos que:

Fabricante	Modelo	Energía anual (kWh)
DEWIND	D4 46/600kW	2276718,9
DEWIND	D6 62/1250kW	4376492,8
DEWIND	D8 – 80m	7000538,6
ENERCON	E-44	2973308,8
ENERCON	E-48	3149602,9
ENERCON	E-82	8522381,9
ENERCON	E70 - 2300	7753973,6
GAMESA	EOLICA G80/2000kW	7572812,7
GAMESA	G87/2000 kW	8320117,1
GAMESA	G90	8561623,7
NORDEX	N90/2500 LS	9597220,4
VESTAS	V90/2000	8568626,3

Tabla 4: Lista de modelos de aerogeneradores disponibles, con su altura de rotor y la energía anual que producen (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de www.thewindpower.net y de la aplicación online del ITC)

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

Posición (UTM) Límites R.E.C

X = [170550, 677550]

Y = [3040750, 3274850]

Aerogenerador

Modelo: ?

Curva de potencia: Ningún archi...seleccionado ?

Altura (m): ?

Coord X (UTM): 459450 (más próxima)

Coord Y (UTM): 3080650 (más próxima)

Tomo detalle numérico: [GranCanaria8.pdf](#)

Aerogenerador: ENERCON E-44 ✓

Altura: 60 m

Cte K de Weibull (60 m): 2.026 ?

Velocidad viento (60 m): 8.4 m/s

Dirección predominante del viento: NNE

Energía anual estimada: 2973308.8 kWh ?

Potencia anual: 339.419 kW ?

Horas anuales equivalentes: 3303.7 h ?

Figura 13: Ejemplo de cálculo con la aplicación del ITC con uno de los modelos estudiados, a 60 m de altura (Fuente: Aplicación online del ITC)

Otro valor importante a tener en cuenta, es el factor de carga. Para ello, introduciremos las potencias nominales y las potencias anuales de los modelos (obtenidos también con la aplicación del ITC) en la Ecuación 3. Así, obtendremos el factor de carga en porcentaje para cada aerogenerador.

Fabricante	Modelo	Potencia nominal (kW)	Potencia anual (kW)	FC (%)
DEWIND	D4 46/600kW	600	259,889	43,31
DEWIND	D6 62/1250kW	1250	499,600	39,97
DEWIND	D8 – 80m	2000	799,148	39,96
ENERCON	E-44	900	339,419	37,71
ENERCON	E-48	800	359,544	44,94
ENERCON	E-82	2000	972,875	48,64
ENERCON	E70 - 2300	2300	885,157	38,49
GAMESA	EOLICA G80/2000kW	2000	864,476	43,22
GAMESA	G87/2000 kW	2000	949,785	47,49
GAMESA	G90	2000	977,354	48,87
NORDEX	N90/2500 LS	2500	1095,573	43,82
VESTAS	V90/2000	2000	978,154	48,91

Tabla 5: Resultados del factor de carga para los modelos disponibles (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de la aplicación online del ITC)

Según la bibliografía consultada, los factores de carga se clasifican en rangos diferentes según lo buenos que son. Entre el 20 y el 25% se consideran aceptables; entre el 25 y el 30%, buenos; entre el 30 y el 40%, muy buenos; entre el 40 y el 50%, excelentes; y mayores del 50%, excepcionales.

3.4. Selección final del modelo específico de aerogenerador

Cabe recordar que la EDAM consumirá unos 4.058.618 kWh al año. Nos interesa escoger un aerogenerador que produzca una cantidad de energía cercana a la que se consumirá, y que además tenga el mejor factor de carga posible. En la siguiente tabla, la 6, analizaremos el porcentaje de exceso o de déficit de producción de energía anual de cada modelo de aerogenerador frente al consumo total de la EDAM.

A partir de esos resultados y de los factores de carga extraídos de la Tabla 5, escogeremos un modelo de aerogenerador para nuestra instalación de desalación.

Fabricante	Modelo	Energía anual (kWh)	Diferencia con la EDAM (kWh)	Diferencia (%)	FC (%)
DEWIND	D4 46/600kW	2276718,9	-1781899,1	-43,9	43,31
DEWIND	D6 62/1250kW	4376492,8	317874,8	7,8	39,97
DEWIND	D8 – 80m	7000538,6	2941920,6	72,5	39,96

ENERCON	E-44	2973308,8	-1085309,2	-26,7	37,71
ENERCON	E-48	3149602,9	-909015,1	-22,4	44,94
ENERCON	E-82	8522381,9	4463763,9	110,0	48,64
ENERCON	E70 - 2300	7753973,6	3695355,6	91,0	38,49
GAMESA	EOLICA G80/2000kW	7572812,7	3514194,7	86,6	43,22
GAMESA	G87/2000 kW	8320117,1	4261499,1	105,0	47,49
GAMESA	G90	8561623,7	4503005,7	110,9	48,87
NORDEX	N90/2500 LS	9597220,4	5538602,4	136,5	43,82
VESTAS	V90/2000	8568626,3	4510008,3	111,1	48,91

Tabla 6: Análisis de la generación de energía eléctrica de los modelos frente al consumo de la EDAM (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de la aplicación online del ITC)

Como se puede observar en la Tabla 6, hay algunos aerogeneradores que no son capaces de proporcionar la energía eléctrica necesaria (diferencia negativa con la EDAM), mientras que otros dan un exceso de energía eléctrica que no es posible de asumir y que complicaría su distribución (por ejemplo, ENERCON E-82 tiene un exceso del 110%, lo cual significa que generará algo más que el doble de energía eléctrica que la que necesita nuestra EDAM). Por lo tanto, tendremos que realizar un descarte antes de analizar los factores de carga.

Se desecharán, como es lógico, aquellos aerogeneradores con una diferencia negativa, es decir, que no serán capaces de producir la energía total que necesita la EDAM. Por otro lado, también descartaremos aquellos aerogeneradores que generen un exceso superior al 20%, ya que es totalmente innecesario disponer de más energía eléctrica, al volverse un problema su distribución o disipación.

Así, analizando la Tabla 6 y los porcentajes de diferencia con la EDAM, tan sólo queda un modelo de aerogenerador: el modelo D6 62/1250kW de la empresa DeWind, que generará un 7,8% de exceso de energía. El siguiente más próximo, genera un exceso del 72,5%, algo inviable para nuestra EDAM. Como se puede observar, también en la Tabla 6, el modelo seleccionado de DeWind tiene un factor de carga de prácticamente un 40%, el cual establece la frontera entre muy bueno y excelente. Debido a ello, seleccionaremos este modelo como el aerogenerador que se empleará en nuestra EDAM.

Como conclusión a este Anexo, se adjuntan la curva de potencia, una imagen real y una tabla de características principales del modelo de aerogenerador seleccionado. Cabe destacar que no se logró encontrar la curva de potencia del modelo en la página web del fabricante, ya que éste sólo la distribuye ante una posibilidad de venta real. Sin embargo, se pudo obtener la curva de potencia a partir de la aplicación online del ITC.

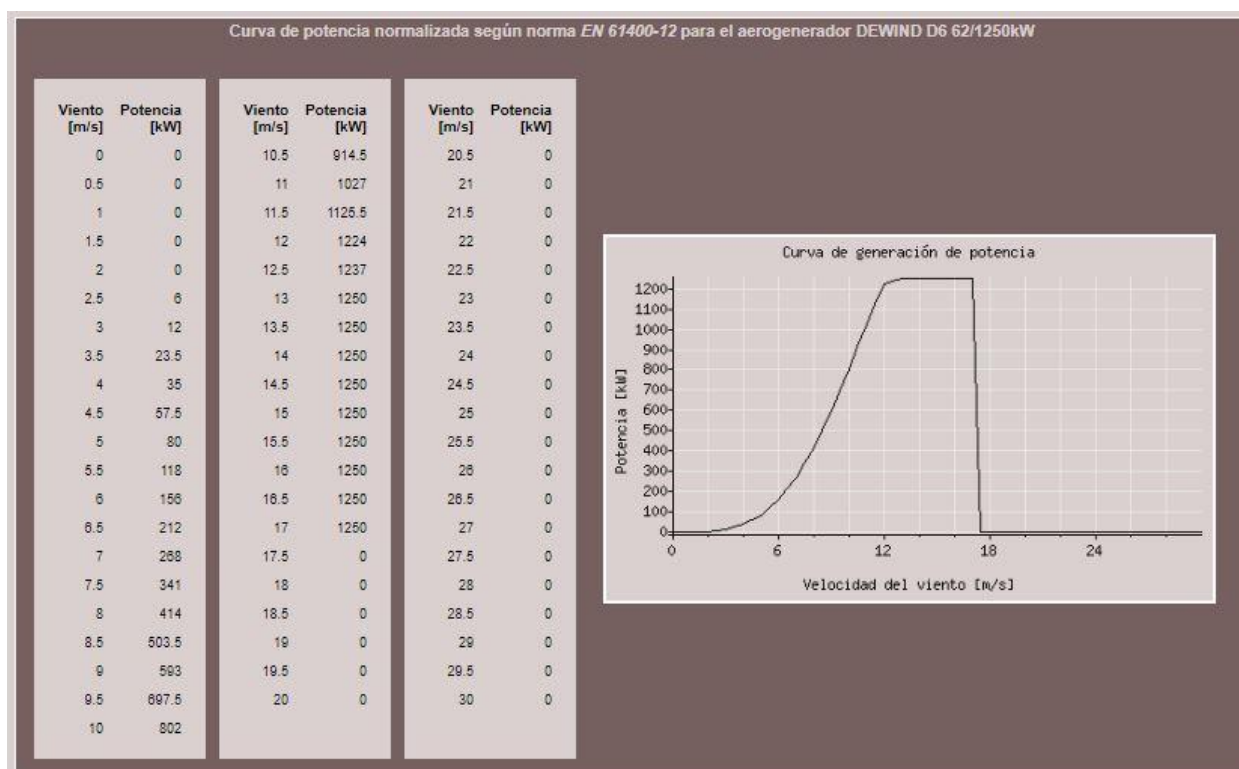


Figura 14: Curva de potencia del aerogenerador D6 62/1250kW de DeWind (Fuente: Aplicación online del ITC)



Figura 15: Imagen real del aerogenerador D6 62/1250kW de DeWind (Fuente: www.en.wind-turbine-models.com)

DATOS GENERALES		ROTOR	
Fabricante	DeWind (EEUU)	Velocidad máxima del rotor	26,1 vuelta/min
Turbina eólica	D6 62/1250	Velocidad de arranque	2,5 m/s
Potencia nominal	1250 kW	Velocidad nominal de viento	12,5 m/s
Diámetro	62,3 m	Velocidad de parada	25 m/s
Clase de viento	IEC II	Fabricante	LM Glasfiber
Compatible offshore	“No”	CAJA DE CAMBIOS	
Área de barrido	3049 m ²	Niveles	3
Densidad de potencia	2,44 m ² /kW	Ratio	54
Número de palas	3	Fabricante	Moventas
Limitación de potencia	Pitch	GENERADOR	
Puesta en servicio	2000	Tipo	ASYNCF
MASAS		Número	1
Masa de la góndola	44 toneladas	Velocidad de salida máxima	1000 vuelta/min
Masa de la torre	72 toneladas	Tensión de salida	690 V
Masa del rotor	33 toneladas	Fabricante	Loher
Masa total	149 toneladas	TORRE	
		Altura de la góndola	66 m

Tabla 7: Características principales del modelo de aerogenerador D6 62/1250kW de la empresa DeWind. (Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos de www.thewindpower.net)

Como se puede observar, la góndola del aerogenerador tendrá una altura de 66 metros, muy cercana a los 60 metros que empleamos en los cálculos con la aplicación online del ITC para obtener la generación de energía eléctrica del aerogenerador. Por lo tanto, daremos por buenos los resultados obtenidos.

Así, se abastecerá energéticamente a nuestra EDAM con 1 aerogenerador D6 62/1250kW de la empresa DeWind, con una producción energética anual de 4376492,8 kWh. De esta producción, quedará un exceso de 317874,8 kWh (un 7,3% del total).

La aplicación de este exceso de energía eléctrica y de su tratamiento se especificará en el Anexo V, en el cual se tratará el aprovechamiento de energía, la producción de hidrógeno y el aprovechamiento del rechazo de salmuera de la EDAM.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO V

**APROVECHAMIENTO DEL EXCESO DE
ENERGÍA EÓLICA Y DEL RECHAZO DE
SALMUERA DE OSMOSIS INVERSA**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO
CON ENERGÍA EÓLICA PARA ABASTECIMIENTO HUMANO
EN GRAN CANARIA**

AUTOR: Marvin Jozef González Van leeuwe

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE - ANEXO V

1. Introducción	1
2. Aprovechamiento de la energía eólica	2
2.1. Hidrógeno.....	2
2.2. Vertido a la red eléctrica.....	3
2.3. Bombeo reversible (elevación de agua)	4
2.4. Compresión de aire	4
2.5. Deslinear el aerogenerador	5
2.6. Otras opciones para casos donde haya déficit de energía eólica	5
3. Aprovechamiento de la salmuera.....	6

Índice de figuras – Anexo V

Figura 1: Célula de un electrolizador de Quintech (Fuente: Quintech)	2
Figura 2: Esquema de funcionamiento de una pila de combustible de hidrógeno (Fuente: Las ideas de Eugenio)	3
Figura 3: Sistema de bombeo reversible (Fuente: Universidad de Granada)	4
Figura 4: Agrupación de paneles fotovoltaicos (Fuente: www.pulso.cl)	5

1. Introducción

En este Anexo V se detallarán las posibles medidas que se podrán tomar en las instalaciones de la EDAM para lograr una adecuada gestión de la energía eléctrica y de la salmuera, y así no desperdiciar el potencial energético que ambos poseen. También se propondrán soluciones para aquellas situaciones en las que la energía generada por el aerogenerador sea insuficiente.

Por un lado, el aerogenerador seleccionado en el Anexo IV generará, en promedio, un exceso de energía eléctrica que no se consumirá y que debe ser destinado a otros usos o ser disipado (tal que no sea perjudicial para el medio ambiente y que cumpla con la normativa vigente).

Sin embargo, hay que tener en cuenta que durante el dimensionamiento del aerogenerador tan sólo se tuvo en cuenta el consumo energético del sistema de desalación de la EDAM. No se consideraron los consumos de las instalaciones de alumbrado, control, etc. que también deberían de ser considerados en el caso de ser éste un proyecto ejecutable. Para ello, se podría suponer cierto porcentaje del consumo actual de la EDAM como energía destinada a alimentar las instalaciones anteriormente mencionadas. Debido a que esta decisión podría dar lugar a varias imprecisiones (al no ser posible el cálculo aproximado del consumo energético de dichas instalaciones), se ha descartado esta opción.

En el caso de que este estudio tuviese un alcance ejecutable, es posible que el exceso de energía eléctrica del sistema eólico sería consumido por dichas instalaciones, totalmente necesarias en la planta, e incluso se podría dar el caso de requerirse aún más energía eléctrica, por lo que se tendría que seleccionar un aerogenerador con mayor producción de energía a partir de los estudiados en el Anexo IV. Como no es el caso, se toma la suposición de que tan sólo consumirán energía eléctrica el proceso de osmosis inversa y los sistemas de captación y distribución del agua, y que el exceso producido por el aerogenerador seleccionado tendrá que ser disipado o aprovechado de otra forma.

Por otro lado, también es posible aprovechar el rechazo de salmuera, la cual también podría tener cierto potencial energético. Debemos de tener en cuenta que ya se ha aprovechado la presión del rechazo para presurizar cierto porcentaje del caudal de alimentación de la EDAM. Esto se hizo dimensionando un intercambiador de presión en el Anexo II de este estudio, el cual actuará como recuperador de energía. Además de esta medida, se pueden aplicar otras que se estudiarán a continuación en este Anexo V.

Cabe destacar que en este documento no se realizarán cálculos referentes a las soluciones estudiadas, ni tampoco se hará un dimensionamiento específico con selección de máquinas, productos o materiales. El alcance de este Anexo V será informativo, con el objetivo de poner en conocimiento del lector las múltiples soluciones que se podrían tomar para aprovechar mejor la energía proveniente del viento y de la salmuera en una instalación de este tipo.

2. Aprovechamiento de la energía eólica

Para lidiar con el exceso de energía eólica que obtendremos del aerogenerador en algunos momentos durante el año, existen varias posibilidades. Éstas son el vertido de la energía eléctrica a la red, el bombeo reversible, la compresión de aire y la generación de hidrógeno. Esta última será la primera opción a escoger entre todas, ya que es la más viable y menos costosa.

Además, también se tendrán en cuenta aquellos casos en los que el aerogenerador no sea capaz de generar la energía necesaria para la EDAM, y sea necesario extraer la energía almacenada en las soluciones adoptadas durante los periodos de exceso de energía eólica, o generar energía mediante otras opciones.

2.1. Hidrógeno

Una de las opciones para aprovechar el exceso de energía eléctrica producida por el aerogenerador, es su empleo para la generación de hidrógeno. Posteriormente, durante aquellos periodos de tiempo en los que el aerogenerador no produzca la suficiente energía para el consumo de la EDAM, se aprovechará la energía almacenada en forma de hidrógeno.

Así, el uso de hidrógeno como método de aprovechamiento de energía en nuestras instalaciones, tendrá dos procesos diferenciados: la producción de hidrógeno, mediante un electrolizador; y la extracción de la energía almacenada en el hidrógeno, mediante una pila de combustión.

- **Generación de hidrógeno:** se realizará mediante un electrolizador (Figura 1), el cual efectuará una separación electrolítica de los componentes del agua, que son el hidrógeno y el oxígeno. Para ello, hará pasar la corriente eléctrica, que generó el aerogenerador en exceso, por el agua para lograr la disociación de su molécula. Este proceso tiene un coste elevado, pero se caracteriza por no producir emisiones. Un fabricante líder en el mercado de electrolizadores es Quintech. Para almacenar el hidrógeno generado, será necesaria la disponibilidad de un tanque apto para dicha función.



Figura 1: Célula de un electrolizador de Quintech (Fuente: Quintech)

- Extracción de energía del hidrógeno: se llevará a cabo este proceso mediante una pila de combustible (Figura 2), la cual se encargará de transformar energía química en energía eléctrica. La pila empleará dos reactivos: uno, el combustible (sería el hidrógeno); y dos, el comburente (sería el oxígeno). De esta reacción, resultarán agua, pérdidas de calor y electricidad en corriente continua.

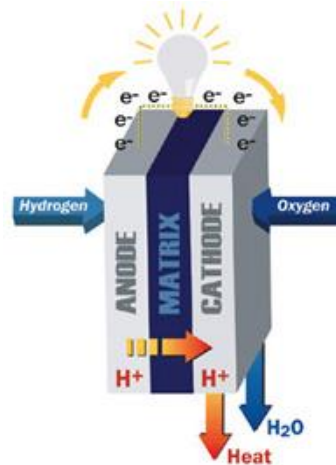


Figura 2: Esquema de funcionamiento de una pila de combustible de hidrógeno (Fuente: Las ideas de Eugenio)

Cabe destacar que el hidrógeno generado con el electrolizador no tiene por qué ser empleado posteriormente para la extracción de energía eléctrica. Existen varias opciones aparte de ésta que también pueden aportar numerosos beneficios a nuestro proyecto. Un ejemplo sería la venta directa del hidrógeno a industrias que lo empleen en sus procesos o que empleen el hidrógeno como combustible (por ejemplo, la industria del automóvil).

2.2. Vertido a la red eléctrica

Es la menos deseable de todas. Actualmente, el vertido de energía a la red eléctrica está regulado por la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico. Dicha normativa establece que, en cuanto al acceso a las redes de distribución y transporte de electricidad, tienen prioridad todos los vertidos provenientes de fuentes de energías renovables.

Sin embargo, el inconveniente radica en el hecho de que todo está sujeto a la demanda que tenga la red en el momento en el que se quiera verter el exceso de energía eólica. Hay muchas tecnologías, como por ejemplo el ciclo combinado, que se encuentra generando también energía eléctrica, y se priorizan según las necesidades. Si la demanda es baja, el vertido de electricidad desde el sistema eólico será restringido por el operador de la red. Debido a ello, se proponen más alternativas a esta situación.

Además, para optar por esta solución, se tendría que considerar también a qué precio la red nos compraría el kWh, y si con dicho precio se lograría amortizar el coste de las instalaciones destinadas al vertido a la red en el periodo de tiempo establecido para ello.

2.3. Bombeo reversible (elevación de agua)

Consiste en almacenar la energía eléctrica que sobre en forma de energía potencial. Se bombeará agua desde un embalse a otro que se halla a una mayor cota de altura que el primero. Así, se aumentará la energía potencial de la masa de agua que ha sido elevada mediante bombeo. Ésta se quedará en dicho embalse, hasta que llegue el momento en el que se precise de energía eléctrica que no pueda aportar el sistema eólico. Para ello, simplemente se deja caer el agua hacia el embalse inicial, pero pasando por una turbina, para generar energía eléctrica.

El inconveniente de esta medida consiste en una dependencia de la orografía del terreno, la cual debe de presentar grandes diferencias de altura desde un embalse al siguiente. Un esquema de la técnica de bombeo reversible se refleja en la Figura 3.

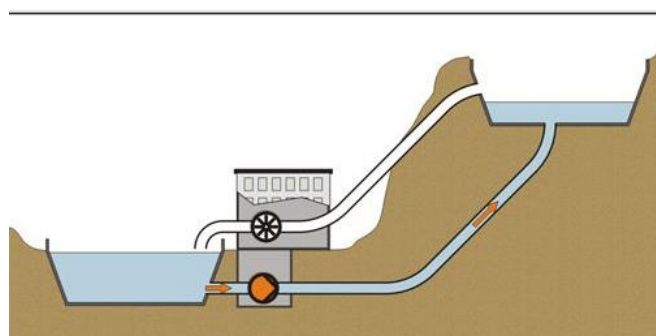


Figura 3: Sistema de bombeo reversible (Fuente: Universidad de Granada)

2.4. Compresión de aire

Se comprimirá aire mediante unos compresores. Una vez comprimido y dada la situación de requerirse cierta cantidad de energía eléctrica que no sea capaz de aportar el sistema eólico, se empleará el aire comprimido para poner en movimiento un sistema de turbinas. Éstos generarán energía eléctrica que será consumida por la EDAM. La capacidad del depósito de aire comprimido podría presentar una limitación para esta medida.

2.5. Desalinear el aerogenerador

En los periodos en los que el aerogenerador esté generando demasiado potencia, y no sea posible almacenarla o disiparla, se tendría la obligación de desalinear el aerogenerador.

En algunos modelos, se puede tener la opción de rotar las palas, para que el viento incida en menor medida sobre éstas y así el aerogenerador genere menos potencia.

En el caso de que el aerogenerador no disponga de esta tecnología, o que se necesite reducir aún más la potencia generada, se puede cambiar la orientación de la góndola, y con ella la de las palas, mediante la corona de orientación. Esta acción se conoce como el des-alineamiento del aerogenerador. Simplemente, consiste en cambiar su orientación según la dirección en la que sopla el viento, para que éste incida en menor medida y se genere menos potencia.

2.6. Otras opciones para casos donde haya déficit de energía eólica

Al igual que pueden darse situaciones en las que se genere un exceso de energía eólica, también puede darse el caso en el cual el aerogenerador no sea capaz de abastecer por completo los consumos de la EDAM y sus instalaciones. Para ello, se puede emplear la energía almacenada durante los procesos descritos en los apartados anteriores. Aparte de estos procesos, existen otras opciones que se podrían considerar, y son las que se describen a continuación.

- Consumo a partir de la red eléctrica: Se podría considerar la posibilidad de conectar la EDAM a la red eléctrica. Esto aseguraría el funcionamiento continuo de sus instalaciones, pero también aumentaría sus costes.
- Sistema fotovoltaico: Se puede instalar un sistema de paneles fotovoltaicos como sistema de apoyo para el aerogenerador. La energía que se generase en los paneles sería almacenada según las técnicas propias de esta opción. La ventaja de esta opción es la disponibilidad de dos fuentes independientes de energía renovable, lo cual aporta una mayor seguridad y autonomía a la EDAM. En la Figura 4 se representa una agrupación de paneles fotovoltaicos.



Figura 4: Agrupación de paneles fotovoltaicos (Fuente: www.pulso.cl)

3. Aprovechamiento de la salmuera

A modo indicativo, hay varias medidas que se pueden tomar para aprovechar el flujo de rechazo de salmuera tras su salida de la EDAM, en vez de verterla al mar y perderla. Algunas opciones serían:

- Como medio de transmisión de calor en los sistemas de refrigeración, siendo empleado como refrigerante secundario debido a su bajo punto de congelación.
- Para deshacer la nieve en las carreteras. Esta opción se descarta en nuestro caso, ya que no es una situación que suele darse en nuestro emplazamiento y sus alrededores.
- Un grupo de investigación de la Universidad Politécnica de Valencia propuso, en el 2016, el empleo de la salmuera de las desaladoras para la producción de zumos concentrados. El proceso consiste en que se vuelva a aplicar un proceso de osmosis. Se tendría una membrana entre la salmuera y el zumo, y el agua de éste último pasaría a la salmuera. Así, no sería necesaria la aplicación de calor para evaporar el agua del zumo (es el método que se emplea actualmente), y, por otro lado, la salmuera no tendría un impacto tan grave sobre el ambiente marino al ser vertido con un menor contenido de sal.