

ULL

Universidad  
de La Laguna

Escuela Superior de  
Ingeniería y Tecnología  
Sección de Ingeniería Industrial

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN Y DE PRODUCCIÓN DE  
HIDRÓGENO ALIMENTADO MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Antonia Nazaret Izquierdo Hernández

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 Y DE PRODUCCIÓN DE  
HIDRÓGENO ALIMENTADO MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Antonia Nazaret Izquierdo Hernández

Tutor: Vicente José Romero Ternero

## MEMORIA

1. Objeto.....	10
1.1 Abstract .....	10
2. Alcance .....	10
3. Antecedentes .....	11
3.1 Recursos hídricos.....	14
3.1.1 Recursos hídricos en Canarias.....	14
3.2 Desalación de agua de mar .....	16
3.2.1 Desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa .....	17
3.2.2 Desalación de agua de mar en Canarias.....	22
3.3 Energías renovables .....	24
3.3.1 Energía eólica .....	26
3.4 Hidrógeno.....	27
3.4.1 Pilas de combustible.....	28
4. Normas y referencias .....	29
4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas .....	29
4.2 Bibliografía .....	30
4.3 Programas de cálculo .....	32
5. Definiciones y abreviaturas.....	33
5.1 Definiciones.....	33
5.2 Abreviaturas .....	33
6. Requisitos de diseño .....	34
6.1 Datos del peticionario .....	34
6.2 Situación y emplazamiento .....	34
6.3 Datos de partida .....	44
7. Análisis de soluciones.....	46
7.1 Captación de agua de mar.....	46
7.2 Pretratamiento .....	48
7.2.1 Pretratamiento físico.....	48
7.2.2 Pretratamiento químico .....	49
7.3 Bastidor de ósmosis inversa .....	49
7.4 Recuperador de energía.....	50
7.5 Bombas de la instalación.....	52
7.5.1 Bomba de alta presión .....	52
7.5.2 Bomba Booster .....	52
7.5.3 Bombas de captación .....	52

7.5.4 Bomba de distribución .....	53
7.6 Postratamiento.....	54
7.7 Rechazo salmuera .....	54
7.8 Tuberías principales .....	55
7.9 Aerogenerador .....	55
7.9.1 Recurso eólico .....	56
7.9.2 Selección del aerogenerador.....	57
7.10 Aprovechamiento de energía.....	58
7.10.1 Sistema de generación de hidrógeno.....	59
7.10.2 Conexión a la red eléctrica .....	62
8. Resultados finales.....	63
8.1 Ubicación y finalidad de la planta .....	63
8.2 Sistema de desalación .....	63
8.2.1 Captación de agua .....	63
8.2.2 Núcleo de desalación .....	63
8.3 Aerogenerador .....	64
8.4 Sistema de aprovechamiento de energía.....	64
8.4.1 Electrolizador.....	64
8.4.2 Pila de combustible .....	64
9. Conclusiones.....	64
9.1 Conclusions.....	65

## ANEXOS

1. Dimensionado del sistema de desalación .....	8
1.1 Dimensionado del bastidor de membranas .....	8
1.1.1 Datos de agua de mar .....	8
1.1.2 Software de dimensionado de membranas .....	10
1.2 Dimensionado del intercambiador de presión.....	14
1.3 Dimensionado de las tuberías .....	16
1.3.1 Elección del material .....	16
1.3.2 Elección de la longitud .....	17
1.3.3 Elección del diámetro.....	22
1.3.4 Cálculo de las pérdidas de carga .....	23
1.4 Dimensionado de las bombas del sistema .....	27
1.4.1 Bomba de alta presión .....	27
1.4.2 Bomba Booster .....	31
1.4.3 Bombas de captación .....	34
1.4.4 Bomba de distribución .....	37
1.4.5 Bomba de rechazo.....	39
1.4.6 Resumen de bombas principales del proceso.....	39
1.5 Dimensionado del pretratamiento.....	39
1.5.1 Pretratamiento físico.....	40
1.5.2 Pretratamiento químico .....	40
1.6 Dimensionado del postratamiento .....	41
1.7 Dimensionado del consumo energético de la planta.....	41
2. Dimensionado del sistema eólico.....	44
2.1 Recurso eólico .....	44
2.2 Selección del aerogenerador.....	47
3. Aprovechamiento de energía.....	53
3.1 Balance energético .....	53
3.2 Sistema de generación y acumulación de energía en forma de hidrógeno.....	53
3.2.1 Electrolizadores .....	53
3.2.2 Pilas de combustible.....	54

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

# MEMORIA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN Y DE PRODUCCIÓN DE  
HIDRÓGENO ALIMENTADO MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Antonia Nazaret Izquierdo Hernández

Tutor: Vicente José Romero Ternero





## HOJA DE IDENTIFICACIÓN

### TÍTULO DEL PROYECTO

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN Y DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO ALIMENTADO MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES

### 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. CÓDIGO POSTAL 38200. SAN CRISTOBAL DE LA LAGUNA. SANTA CRUZ DE TENERIFE. ESPAÑA.

TELÉFONO: +34 922 845 059

E-MAIL: [esit@ull.es](mailto:esit@ull.es)

### DATOS DEL AUTOR

NOMBRE: ANTONIA NAZARET IZQUIERDO HERNÁNDEZ

NIF: 79061053W

TUTOR: VICENTE JOSÉ ROMERO TERNERO

### FECHA

JUNIO 2017



## ÍNDICE

1. Objeto.....	10
1.1 Abstract .....	10
2. Alcance .....	10
3. Antecedentes .....	11
3.1 Recursos hídricos.....	11
3.1.1 Recursos hídricos en Canarias.....	14
3.2 Desalación de agua de mar .....	16
3.2.1 Desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa .....	17
3.2.2 Desalación de agua de mar en Canarias.....	22
3.3 Energías renovables .....	24
3.3.1 Energía eólica .....	26
3.4 Hidrógeno.....	27
3.4.1 Pilas de combustible.....	28
4. Normas y referencias .....	29
4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas .....	29
4.2 Bibliografía .....	30
4.3 Programas de cálculo .....	32
5. Definiciones y abreviaturas .....	33
5.1 Definiciones.....	33
5.2 Abreviaturas .....	33
6. Requisitos de diseño .....	34
6.1 Datos del peticionario .....	34
6.2 Situación y emplazamiento .....	34
6.3 Datos de partida .....	44
7. Análisis de soluciones.....	46
7.1 Captación de agua de mar.....	46
7.2 Pretratamiento .....	48
7.2.1 Pretratamiento físico.....	48
7.2.2 Pretratamiento químico .....	49
7.3 Bastidor de ósmosis inversa .....	49
7.4 Recuperador de energía.....	50
7.5 Bombas de la instalación.....	52
7.5.1 Bomba de alta presión .....	52
7.5.2 Bomba Booster .....	52
7.5.3 Bombas de captación .....	52

7.5.4 Bomba de distribución .....	53
7.6 Postratamiento.....	54
7.7 Rechazo salmuera .....	54
7.8 Tuberías principales .....	55
7.9 Aerogenerador .....	55
7.9.1 Recurso eólico .....	56
7.9.2 Selección del aerogenerador.....	57
7.10 Aprovechamiento de energía.....	58
7.10.1 Sistema de generación de hidrógeno.....	59
7.10.2 Conexión a la red eléctrica .....	62
8. Resultados finales.....	63
8.1 Ubicación y finalidad de la planta .....	63
8.2 Sistema de desalación .....	63
8.2.1 Captación de agua .....	63
8.2.2 Núcleo de desalación .....	63
8.3 Aerogenerador .....	64
8.4 Sistema de aprovechamiento de energía.....	64
8.4.1 Electrolizador.....	64
8.4.2 Pila de combustible .....	64
9. Conclusiones.....	64
9.1 Conclusions.....	65

## Índice de figuras

Figura 1: Distribución del agua en La Tierra. (Fuente: FAO) .....	11
Figura 2: Grado de presión sobre los recursos hídricos. (Fuente: CONAGUA) .....	13
Figura 3: Mapa de esorrentía total media anual en mm, periodo 1940/41-1995/96. (Fuente: LBAE, 2000) .....	13
Figura 4: Evolución de la extracción de aguas subterráneas. (Fuente: PHT) .....	14
Figura 5: Evolución del consumo de abastecimiento. (Fuente: PHT).....	16
Figura 6: Evolución del consumo de riego. (Fuente: PHT) .....	16
Figura 7: Esquema de ósmosis vs ósmosis inversa. ....	17
Figura 8: Esquema básico de sistema de desalación por ósmosis inversa.....	18
Figura 9: Instalación de simple etapa.....	19
Figura 10: Instalación de dos etapas de salmuera. ....	19
Figura 11: Instalación de dos pasos de producto.....	20
Figura 12: Esquema de membrana de fibra hueca. ....	21
Figura 13: Esquema de membrana de arrollamiento en espiral.....	21
Figura 14: Evolución de la oferta de aguas en Canarias (hm <sup>3</sup> /año). (Fuente: Gobierno de Canarias).....	23
Figura 15: Plantas desalinizadoras por tamaño en Canarias. (Fuente: TAGUA) .....	23
Figura 16: Dependencia (%) del agua desalada para abastecimiento doméstico en Canarias. (Fuente: Gobierno de Canarias) .....	24
Figura 17: Fuentes de EERR vinculadas a la desalación. (Fuente).....	25
Figura 18: Combinaciones de desalación con EERR más extendidas. (Fuente: ITC) .....	25
Figura 19: Esquema de componentes de un aerogenerador.....	27
Figura 20: Principio de funcionamiento de una célula de combustible.....	29
Figura 21: Evolución de la población de derecho. Periodo 1991-2005. (Fuente: PHT) .....	34
Figura 22: Distribución de la población por altitud. Año 2005. (Fuente: PHT) .....	35
Figura 23: Distribución de las plazas turísticas por altitud. Año 2005. (Fuente: PHT) .....	35
Figura 24: Precipitación convencional media. Periodo 1944-2010. (Fuente: PHT) .....	36
Figura 25: Precipitación horizontal media. Periodo 1944-2010. (Fuente: PHT) .....	36
Figura 26: Isolíneas de temperatura media (°C). Periodo 1944/45-2004/2005. (Fuente: PHT) .	36
Figura 27: Evolución de la infiltración efectiva (mm). Periodo: 1944/45-2005/06. (Fuente: PHT) .....	37
Figura 28: Variación de la extracción de aguas subterráneas. Periodo 1985-2005. (Fuente: PHT) .....	38
Figura 29: Volúmenes de extracción de aguas subterráneas. Año 2005 (Fuente: PHT) .....	38
Figura 30: Evolución de la demanda conjunta de abastecimiento y riego. (Fuente: PHT) .....	39
Figura 31: Balance hidráulico. Año 2015. (Fuente: PHT).....	40
Figura 32: Balance hidráulico. Año 2015. (Fuente: PHT).....	40
Figura 33: Índices de potencial eólico. Año 2010. (Fuente: PIOT) .....	41
Figura 34: Mapa eólico. Año 2010. (Fuente: PIOT) .....	41
Figura 35: Evolución demográfica de Granadilla de Abona entre 1768 y 2015. (Fuente: INE)...	42
Figura 36: <i>Espacios naturales protegidos</i> (Fuente: PIOT).....	42
Figura 37: Plano general del polígono y del puerto. ....	43
Figura 38: Emplazamiento de la parcela seleccionada para la EDAM. (Fuente: Polgran).....	43
Figura 39: Esquema de los componentes principales de la EDAM. ....	46
Figura 40: Esquema simple de disposición de los pozos, tuberías de captación y de alimentación.....	48

Figura 41: Membranas recomendadas por el software de dimensionado IMSDesign.....	50
Figura 42: Tubo de presión con membranas SWC4MAX. ....	50
Figura 43: Esquema de instalación con turbocharger. (Fuente: Energy Recovery) .....	51
Figura 44: Esquema de instalación con intercambiador de presión. (Fuente: Energy Recovery) .....	51
Figura 45: Comparativa de consumo específico sin recuperador y entre recuperadores de energía.....	51
Figura 46: Imagen del depósito de abastecimiento. (Fuente: Google Maps).....	53
Figura 47: Distancia de tubería de rechazo (Fuente: ArcGIS) .....	54
Figura 48: Rosa de los vientos de frecuencias y velocidades en la ubicación de la EDAM. ....	56
Figura 49: Distribución de velocidades. ....	57
Figura 50: Sistema de generación y acumulación de hidrógeno y producción de energía.....	60

## Índice de tablas

Tabla 1: Distribución de los recursos hídricos mundiales. (Fuente: FAO).....	12
Tabla 2: Balance hídrico insular actual medio. (Fuente: PHT) .....	14
Tabla 3: Balance hídrico subterráneo. (Fuente: PHT) .....	15
Tabla 4: Clasificación de los procesos de desalación. ....	17
Tabla 5: Plantas desaladoras y producción de agua desalada en Canarias (2012). (Fuente: Gobierno de Canarias).....	23
Tabla 6: Características energéticas del hidrógeno. (Fuente: Asociación Española del Hidrógeno) .....	28
Tabla 7: Evolución de consumos. Años 1991–2005. (Fuente: PHT) .....	38
Tabla 8: Composición química del agua de captación. (Fuente: LABAQUA).....	45
Tabla 9: Parámetros físico-químicos del agua de captación. (Fuente: LABAQUA) .....	45
Tabla 10: Temperatura media mensual año 2014 (Fuente: Puertos del Estado). ....	45
Tabla 11: Valores límites para el agua de abastecimiento.....	46
Tabla 12: Comparativa entre filtros de arena y membranas de ultrafiltración. ....	48
Tabla 13: Datos significativos de las bombas de alta presión consideradas.....	52
Tabla 14: Datos significativos de las bombas Booster consideradas. ....	52
Tabla 15: Datos significativos de las bombas de captación consideradas. ....	53
Tabla 16: Datos del depósito de abastecimiento escogido (Fuente: PHT) .....	53
Tabla 17: Datos significativos de las bombas de distribución consideradas.....	53
Tabla 18: Dimensiones de las tuberías principales de la EDAM.....	55
Tabla 19: Potencia consumida por la planta. ....	55
Tabla 20: Consumo energético de la planta.....	55
Tabla 21: Datos eólicos a 80 m en punto más cercano a la EDAM. (Fuente: IDAE).....	56
Tabla 22: Modelos actuales de aerogeneradores. (Fuente: The Wind Power) .....	57
Tabla 23: Energía anual estimada para los distintos aerogeneradores estudiados. (Fuente: ITC) .....	58
Tabla 24: Criterio de calificación según el factor de carga.....	58
Tabla 25: Balance energético del sistema. ....	59
Tabla 26: Características de los distintos tipos de pilas de combustibles.....	61
Tabla 27: Ventajas, inconvenientes y aplicaciones de los distintos tipos de pilas de combustible. ....	61
Tabla 28: Datos técnicos pila de combustible Jupiter (Fuente: Quintech) .....	62

## 1. Objeto

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es la finalización del Grado en Ingeniería Mecánica de la Universidad de La Laguna, mediante este documento se pretende poner de manifiesto los conocimientos y competencias adquiridas durante los cuatro cursos de la titulación.

Por otro lado, el objeto de este proyecto es el diseño de una planta desaladora de agua de mar mediante ósmosis inversa alimentada mediante energías renovables, el diseño se centra en los elementos principales de la planta de desalación y en el estudio de los aerogeneradores necesarios para abastecer la planta ya que concretamente la energía renovable utilizada es la energía eólica; el agua producto de esta desalación se utiliza para abastecimiento de consumo humano. Asimismo, se realiza un estudio de aprovechamiento de la energía producida por el aerogenerador y que no es consumida por la planta desaladora, ya que podría ser utilizada en diversas alternativas.

### 1.1 Abstract

The objective of this Final Degree Project is the end of the degree in Mechanical Engineering of the University of La Laguna, this document aims to show the knowledge and skills acquired during the four courses of the degree.

On the other hand, the object of this project is the design of a seawater reverse osmosis desalination plant powered by renewable energies, the design focuses on the principal elements of desalination plant and on the design of the necessary windmills for the plant supply because specifically the renewable energy used is wind energy; the water product of this desalination is used to supply human consumption. Also, a study is carried out to take advantage of the energy produced by the windmill and that is not consumed by the desalination plant, because it could be used in several alternatives.

## 2. Alcance

Este proyecto está basado en el estudio de una planta de desalinización de agua de mar mediante ósmosis inversa y abastecida por aerogeneradores. Esta planta, ubicada en el municipio de Granadilla de Abona de Santa Cruz de Tenerife, tendrá una producción de agua potable de 5000 m<sup>3</sup>/día con el fin de abastecer a un sector de la población de este distrito.

Este estudio está centrado en el núcleo de desalación, además se realiza el estudio eólico necesario para el suministro energético y un estudio del aprovechamiento de la energía sobrante, a continuación se enumeran los apartados tratados en este proyecto.

En el núcleo de desalación, los apartados objeto de estudio son:

- Emplazamiento de la planta desaladora.
- Estudio y dimensionado del núcleo de desalación:
  - Elección de las membranas de ósmosis inversa.
  - Elección del sistema de recuperación de energía.
  - Elección de las bombas principales: captación, alta presión, booster, y distribución.
- Cálculo del consumo específico de la planta.



En el estudio eólico, los apartados tratados son:

- Estimación del recurso eólico disponible en la zona.
- Elección del aerogenerador que alimenta la planta.

En el estudio de aprovechamiento de energía, se tratan los siguientes puntos básicos:

- Balance energético entre la energía consumida y energía generada.
- Estudio básico de distintas alternativas en las que aprovechar la energía.

De este proyecto están excluidos los siguientes apartados:

- Estudio de seguridad y salud.
- Pliego de condiciones
- Presupuesto y mediciones.
- Planificación del proyecto.
- Obra civil del proyecto.
- Estudio geológico del suelo, de las mareas o de otros factores que puedan perturbar el proyecto.
- Instalaciones eléctricas, electrónicas, sistemas de automatización, control, climatización, saneamiento, contraincendios o cualquier otro sistema.
- Instalaciones de pretratamiento y postratamiento del agua.
- Instalaciones de control y distribución en las conducciones.
- Instalaciones de control de la salmuera de rechazo.

### 3. Antecedentes

#### 3.1 Recursos hídricos

El agua es el elemento más abundante en la naturaleza y el mayor constituyente de los seres vivos, en el conjunto de los seres vivos el agua constituye aproximadamente el 80% de sus componentes, lo que la hace imprescindible para los mismos.



Figura 1: Distribución del agua en La Tierra. (Fuente: FAO)

El agua, además de ser el recurso más abundante también es el más escaso, se estima que en el mundo existen 1400 millones de km<sup>3</sup> de agua, de los cuales solo un 2,5% son de agua dulce. El agua dulce se encuentra en su mayoría en capas polares, glaciares y acuíferos profundos, la cual no es utilizable, el agua dulce que puede ser utilizada procede básicamente de la escorrentía superficial del agua de lluvia.

	Volumen de agua (millones de km <sup>3</sup> )	Porcentaje de agua dulce	Porcentaje del total del agua
<b>Agua total</b>	1386		
<b>Agua dulce</b>	35	100	2,53
Glaciares y capa polares.	24,4	69,7	1,76
Agua subterránea.	10,5	30	0,76
Lagos, ríos y atmósfera.	0,1	0,3	0,01
<b>Agua salina</b>	1351		97,47

Tabla 1: Distribución de los recursos hídricos mundiales. (Fuente: FAO)

El promedio anual de precipitación sobre la tierra alcanza los 119000 km<sup>3</sup> de agua, de estos, 74000 km<sup>3</sup> se evaporan a la atmósfera como consecuencia del ciclo hidrológico y los 45000 km<sup>3</sup> restantes fluyen hacia embalses, lagos y cursos de agua o se infiltran en el suelo alimentando a los acuíferos, este volumen de agua es lo que se puede denominar convencionalmente como recursos hídricos, pero estos recursos no son utilizables en su totalidad; se estima que entre 9000 y 14000 km<sup>3</sup> son económicamente aprovechables por el ser humano, razón por la cual se dice que el agua es un bien limitado.

En La Tierra el agua está repartida de una manera heterogénea, existen zonas que están sometidas a sequía hasta el punto de imposibilitar la supervivencia de seres vivos mientras otras zonas están ampliamente abastecidas, por tanto la cantidad de agua disponible en los diversos países del mundo es enormemente variable.

Los usos a los que se destina el agua son elevados: consumo urbano, agricultura, ganadería, producción de energía, industria, etc., y la demanda está en continuo crecimiento. El porcentaje que representa el agua empleada en usos consuntivos respecto a la disponibilidad es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en un país o región, en la figura que se muestra a continuación se puede observar los valores que tomó este indicador en el año 2009 en diferentes países, se considera que si el porcentaje es mayor al 40% se ejerce una fuerte presión sobre el recurso.

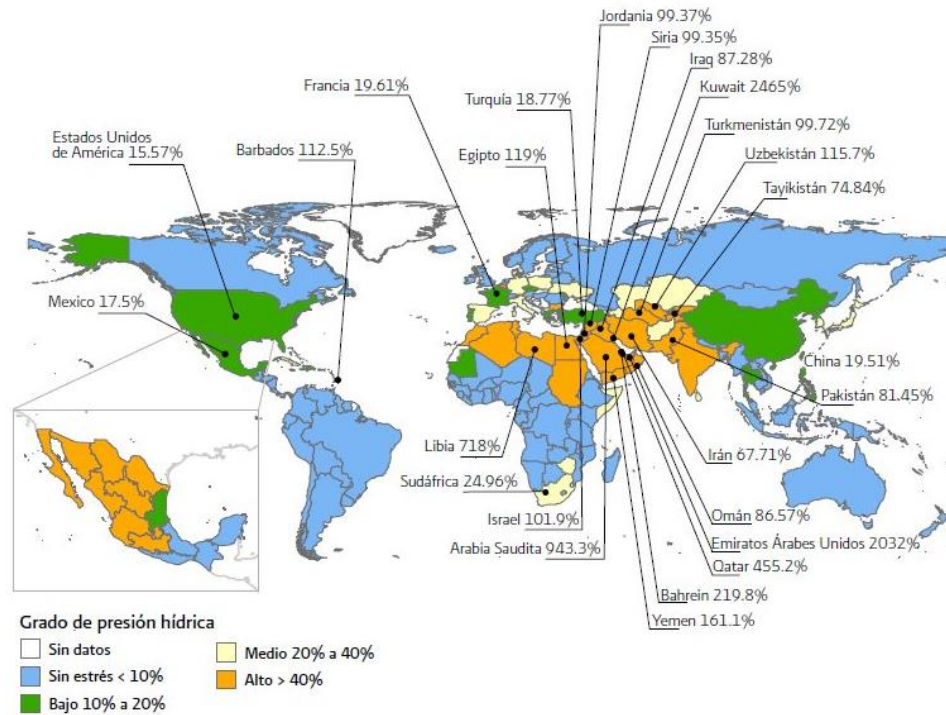


Figura 2: Grado de presión sobre los recursos hídricos. (Fuente: CONAGUA)

En el caso de España se observa que el grado de presión existente es medio, es decir entre un 20 y un 40%, pero España es un país de fuertes contrastes geográficos y climáticos que condicionan la distribución y disponibilidad de los recursos hídricos naturales, por lo que existe un claro gradiente geográfico entre las áreas con abundantes recursos hídricos del norte y noroeste y las áreas secas del sur y del este, esta irregularidad se puede apreciar en la siguiente figura.

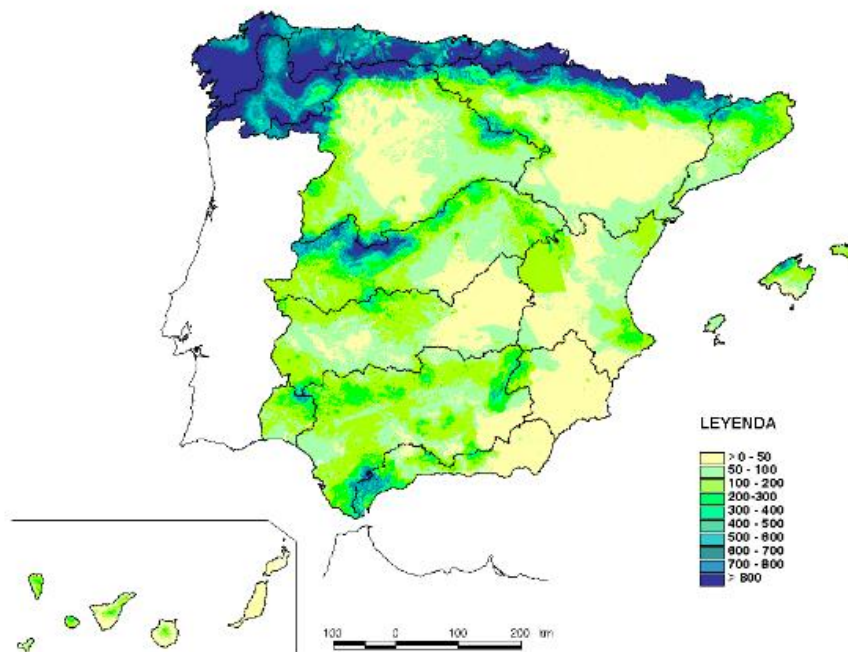


Figura 3: Mapa de escorrentía total media anual en mm, periodo 1940/41-1995/96. (Fuente: LBAE, 2000)

### 3.1.1 Recursos hídricos en Canarias

Las islas Canarias cuentan con una extensión superficial de 7447 km<sup>2</sup>, una población de 2,102 millones de habitantes en 2016 y una densidad de 284,46 hab/km<sup>2</sup>, además según datos del Plan Hidrológico de Tenerife en el año 2005 la dotación bruta media era de 264,8 l/hab/día; el estudio de los recursos hídricos se centra en la isla de Tenerife ya que es en esta donde está ubicada la planta desaladora estudio de este proyecto.

Para realizar un balance hídrico en la isla de los recursos superficiales terrestres se tienen en cuenta las siguientes variables: la precipitación de lluvia, que es un recurso atmosférico, pero no es susceptible de aprovechamiento directo; la evapotranspiración, que es la cantidad de agua que retorna a la atmósfera, tanto por transpiración de la vegetación como por evaporación desde el suelo o desde las copas de los árboles; el agua de infiltración que es la que supera la retención superficial y alcanza subsuelos más profundos conectando con acuíferos y la escorrentía superficial que es el agua que llega a alcanzar la costa más la que se capta o deriva en su camino para ser almacenada. El balance hídrico insular actual medio se presenta en el siguiente cuadro, en él se puede observar como ya se adelantaba que la precipitación que recibe la isla no es un recurso directo, más de la mitad de esta se devuelve a la atmósfera mediante la evapotranspiración.

1975/76-2005/06			
Magnitud hidrológica	mm/año	hm <sup>3</sup> /año	%
Precipitación	382,6	779	100,0
Evapotranspiración	224,5	457	58,7
Escorrentía	7,1	14	1,9
Infiltración	150,6	306	39,4
Incremento de reservas en el suelo	0,2	0,4	0,1
Derivado a embalses	0,4	0,8	0,2

Tabla 2: Balance hídrico insular actual medio. (Fuente: PHT)

En cuanto a los recursos subterráneos, en 2005, el caudal aportado por galerías y pozos era de 186 hm<sup>3</sup>/año lo cual supuso una disminución con respecto al año 1985 de un 10%.

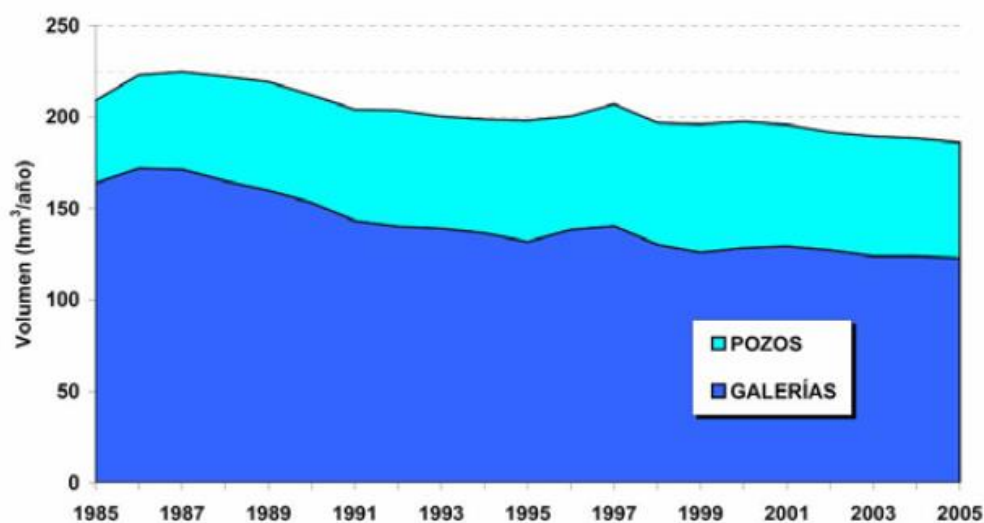


Figura 4: Evolución de la extracción de aguas subterráneas. (Fuente: PHT)

En Tenerife se puede establecer un balance hídrico subterráneo sencillo, el sistema recibe agua por infiltración de la lluvia y retorno de riegos y la pierde por salida subterránea al mar y extracción por pozos y galerías, el déficit se cubre por captura de aguas de reservas y el consiguiente descenso de niveles. En la tabla 3 se muestra el balance hídrico subterráneo insular para diferentes etapas, se puede observar que tras un periodo de elevadas extracciones, en el cual las salidas han superado a las entradas, el sistema evoluciona hacia una situación más equilibrada, como consecuencia de la reducción en las extracciones, que esta situación pueda alcanzarse depende obviamente de cuanto se reduzcan las salidas pero también de como varíe la infiltración en los próximos años; cabe destacar que el porcentaje que se muestra en la tabla es con respecto al total de agua que recibe el sistema.

<b>1971-1980</b>		<b>Entradas</b>			<b>Salidas</b>		<b>Variación de las reservas</b>
Magnitud hidrológica	Infiltración	Retorno de riegos	Total	Extracciones	Flujo al mar	Total	
hm <sup>3</sup> /año	338	93	431	218	399	617	-186
%	78%	22%	100%	51%	92%	143%	-43%
<b>1981-1990</b>		<b>Entradas</b>			<b>Salidas</b>		<b>Variación de las reservas</b>
Magnitud hidrológica	Infiltración	Retorno de riegos	Total	Extracciones	Flujo al mar	Total	
hm <sup>3</sup> /año	321	55	376	213	342	555	-179
%	85%	15%	100%	57%	91%	148%	-48%
<b>1991-2000</b>		<b>Entradas</b>			<b>Salidas</b>		<b>Variación de las reservas</b>
Magnitud hidrológica	Infiltración	Retorno de riegos	Total	Extracciones	Flujo al mar	Total	
hm <sup>3</sup> /año	235	38	273	205	294	498	-225
%	86%	14%	100%	75%	107%	182%	-82%
<b>2001-2006</b>		<b>Entradas</b>			<b>Salidas</b>		<b>Variación de las reservas</b>
Magnitud hidrológica	Infiltración	Retorno de riegos	Total	Extracciones	Flujo al mar	Total	
hm <sup>3</sup> /año	279	27	306	188	266	454	-148
%	91%	9%	100%	61%	87%	148%	-48%

Tabla 3: Balance hídrico subterráneo. (Fuente: PHT)

Hasta el año 1991, todas las demandas de agua se atendían mediante el aprovechamiento de los recursos superficiales y subterráneos disponibles, pero en el periodo comprendido entre 1991-2005, los recursos subterráneos se vieron reducidos en un 10% en términos relativos, 21,36 hm<sup>3</sup> de agua, mientras que el consumo de agua conjunto aumentó en 11,28 hm<sup>3</sup>. Para responder ante este incremento de la demanda insular en 2005, de los 218,58 hm<sup>3</sup> de agua requerida, 18,92 hm<sup>3</sup> procedieron de la desalación de agua de mar y 8,94 hm<sup>3</sup> de la reutilización de agua regenerada. En las figuras 5 y 6, se puede observar la evolución del consumo de abastecimiento y del consumo de riego, así como los recursos utilizados a lo largo del tiempo; se aprecia que para abastecer el incremento en la demanda de abastecimiento se ha optado en mayor medida por la desalación de agua de mar, en cambio para el consumo de riego la opción ha sido la reutilización de aguas regeneradas.

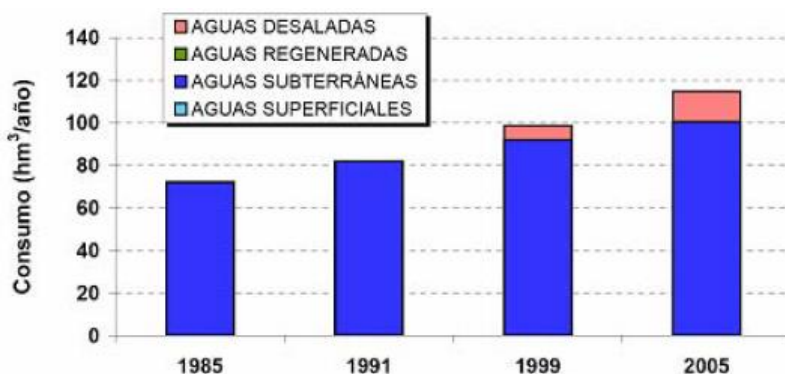


Figura 5: Evolución del consumo de abastecimiento. (Fuente: PHT)

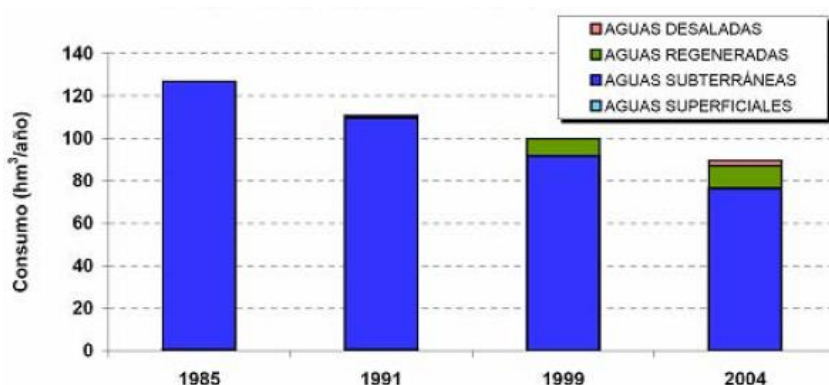


Figura 6: Evolución del consumo de riego. (Fuente: PHT)

### 3.2 Desalación de agua de mar

La desalación de agua de mar en sentido amplio es un proceso por el cual se lleva a cabo la separación de las sales de una solución, este proceso necesita energía para poder realizarse y la forma en la que se aplica esta energía precisamente es lo que hace que se diferencien varios procesos.

Los procesos que utilizan vapor como fuente principal se conocen comúnmente como destilación y las tres tecnologías principales son: Destilación Súbita Multietapa (MSF), Destilación Multiefecto (MED), y Compresión de Vapor (CV), en otros casos la energía utiliza es la carga eléctrica, de este tipo es la Electrodialisis (ED) y por último, el método más divulgado que utiliza presión es la Ósmosis Inversa (OI); en la tabla 4 se muestra una clasificación de los procesos de desalación según la energía utilizada, la información recogida en este apartado es proveniente del libro de *Desalación de aguas salobres y de mar, ósmosis inversa* de José Antonio Medina San Juan.

Como breve comparación entre las principales tecnologías se puede decir que la destilación tiene un elevado consumo energético, requiere una elevada inversión inicial, precisa de una extensión de terreno importante, su eficiencia es baja, no depende de la salinidad del agua, necesita una fuente de vapor, produce un agua de calidad casi pura y que puede acoplarse a una central eléctrica productora de energía. En cuanto a la ósmosis inversa tiene el menor consumo energético, se puede utilizar en agua salobre y de mar, la inversión por lo general es menor a la de otros sistemas, precisa de pretratamientos físico-químicos, la extensión de terreno necesaria es media, necesita una fuente exterior de energía, además de iones separa bacterias y virus por lo que también se aplica como método de desinfección, sus posibles aplicaciones eficientes se ven limitadas por la presencia de iones específicos y su

manejo se dificulta en función de las características físico-químicas del agua. Finalmente, en la electrodiálisis su aplicación está limitada para aguas salobres, tiene un consumo energético de tipo medio, necesita menores tratamientos químicos que otros sistemas, sus necesidades de espacio e inversión son intermedias, su coste de instalación es superior a sistemas de ósmosis inversa, la calidad del agua producto es inferior a la de las otras tecnologías, su consumo de reactivos es menor que en otros sistemas y su manejo es sencillo.

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

Tabla 4: Clasificación de los procesos de desalación.

### 3.2.1 Desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa

La tecnología de ósmosis inversa se basa en el proceso de ósmosis que es un fenómeno natural por el cual dos soluciones de distinta concentración salina puestas en contacto a través de una membrana semipermeable tienden a igualar sus concentraciones, para ello se produce un movimiento desde la solución más diluida hacia la más concentrada y la fuerza que provoca ese movimiento se conoce como presión osmótica; si se invierte el proceso aplicando una presión en la solución más concentrada el movimiento se produce desde esta hacia la más diluida alcanzando finalmente una posición de equilibrio, este proceso es lo que constituye la ósmosis inversa.

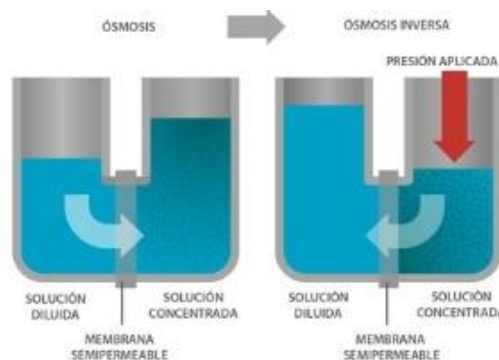


Figura 7: Esquema de ósmosis vs ósmosis inversa.

Un sistema de ósmosis inversa simplificado está formado por una o varias bombas de captación de agua, que conducen el agua hacia una zona de pretratamiento físico-químico; por una bomba de alta presión, conduce el agua al bastidor donde se encuentran los tubos de presión que alojan las membranas de ósmosis inversa; y por un conjunto de tuberías, por un lado las que constituyen la línea de permeado, que es la disolución que consigue atravesar la membrana semipermeable, la cual se dirige a una zona de postratamiento, y por otro lado la línea de evacuación del concentrado o rechazo, que es la disolución que no consigue atravesar la membrana (más rica en sal que la alimentación).

La salmuera o rechazo a la salida de los tubos tiene aún mucha presión, ya que la pérdida de carga en el interior de los módulos de ósmosis inversa es pequeña; con el fin de utilizar esta energía, se conduce la salmuera a un sistema de recuperación de energía, el cual generalmente puede ser una bomba invertida, una turbina hidráulica del tipo Pelton o Francis o unas cámaras de intercambio de presión, de forma que se aproveche el salto entre la presión de la salmuera a la salida de las membranas y la presión atmosférica, con ello, la energía necesaria para llevar a cabo el proceso se reduce sensiblemente.

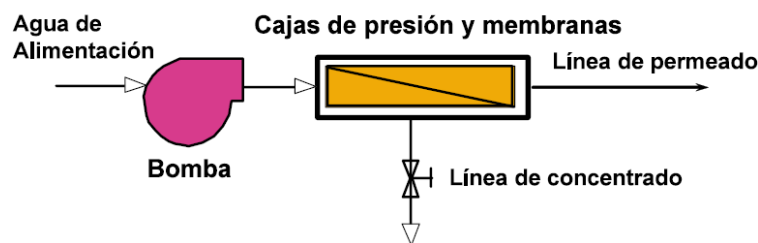


Figura 8: Esquema básico de sistema de desalación por ósmosis inversa.

Las membranas tienen una superficie y una producción determinada, además el porcentaje de recuperación es relativamente pequeño y con un solo elemento en una instalación sería desperdiciado una gran parte del caudal de alimentación como salmuera; por esta razón, se colocan varias membranas en serie en los tubos de presión para que el rechazo de una membrana sea utilizado como alimentación de la siguiente. Los módulos de tubos de presión con capacidad para diversas membranas mejoran la recuperación, pero aun así, su capacidad sigue siendo limitada y se necesita la colocación de distintos módulos en paralelo. De esto surgen distintos tipos de estructuras de producción en que se colocan las membranas, los cuales se explican a continuación.

Una etapa de una instalación de ósmosis inversa es cada una de las unidades de producción que son alimentadas desde una fuente única, si para aumentar la eficiencia de la instalación, el rechazo de los tubos de presión que salen a una presión determinada se introducen en otros tubos de presión constituyen otra etapa; al aumentar el número de etapas se aumenta el caudal de agua producto pero también empeora su calidad. Por otro lado, si el caudal de agua producto o el caudal de rechazo es rebombado mediante otra bomba elevando su anterior presión para alimentar a otro conjunto de membranas se considera un paso. Conociendo esto, se estudian las principales estructuras de producción en los sistemas de ósmosis inversa:

- Instalación de simple etapa:

Es un conjunto de membranas individuales o tubos de presión colocados en paralelo alimentados desde una bomba, es una estructura que debido a la alta concentración de sales



que contiene el agua de mar, no permite una conversión elevada con la tecnología actual de membranas, de igual modo, tiene diversos usos como instalaciones de agua de mar o instalaciones experimentales.

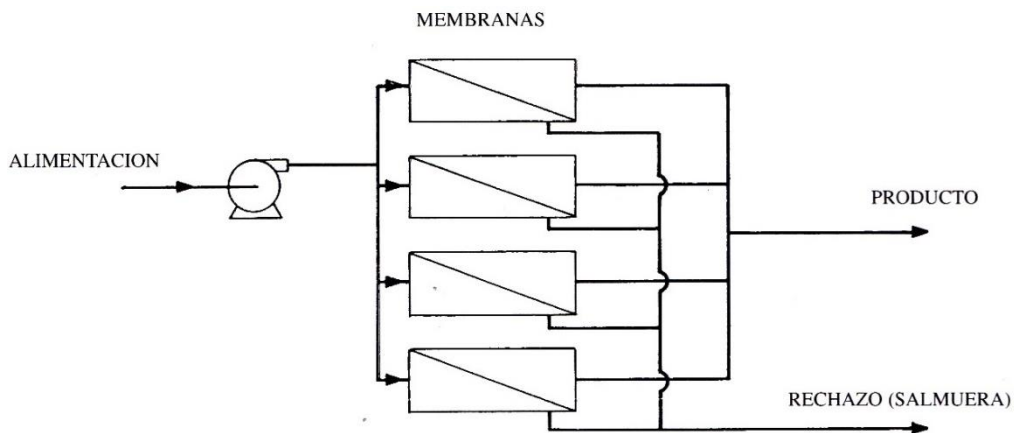


Figura 9: Instalación de simple etapa.

- Etapas de salmuera:

Con esta configuración, típica de aguas salobres, en cada etapa se recupera una parte de producto y el caudal de salmuera que llega a la siguiente etapa es menor que el inicial, y por consiguiente el número de tubos es menor. Debido a las características de recuperación de la membrana el porcentaje máximo de recuperación por tubo de presión de 6 elementos es del 50 %, por lo que el número máximo de etapas que se puede colocar son tres, con un total de 87,5 % de recuperación (50 % en la primera etapa, 25 % en la segunda y 12,5 % en la tercera), recuperaciones superiores son difíciles generalmente y no se justificaría una cuarta etapa, pero de todos modos el diseño de una instalación y la cantidad de etapas depende del proyectista, el porcentaje de agua que se necesita recuperar y en mayor medida de la composición química del agua.

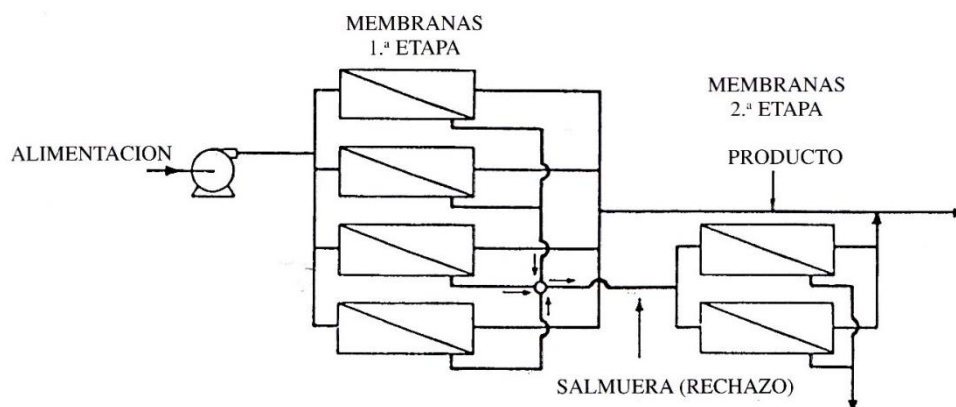


Figura 10: Instalación de dos etapas de salmuera.

- Etapas de producto:

Esta configuración se suele emplear cuando se necesita una buena calidad del agua producto y para ello se pasa de nuevo por otro conjunto de membranas, utilizando una bomba independiente. Su aplicación actual, debido a la aparición de membranas de agua de mar con

un elevado rechazo que permiten tener agua potable con un solo paso, se ha hecho innecesaria, aunque se siguen utilizando en algunos casos en la industria o en otras instalaciones.

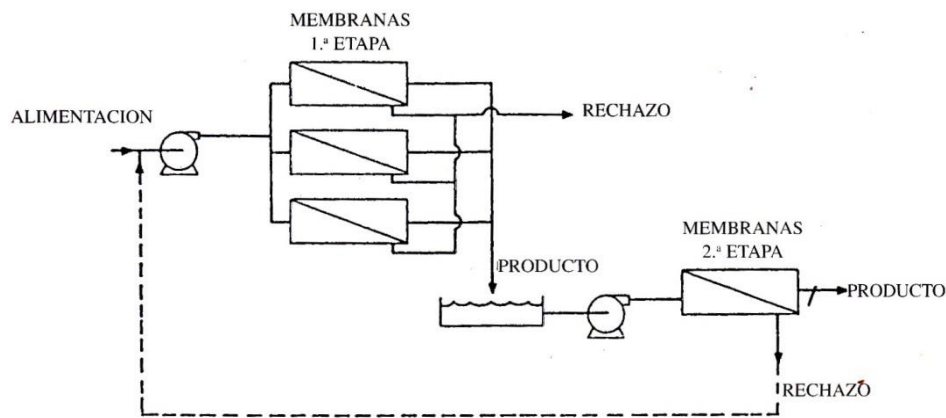


Figura 11: Instalación de dos pasos de producto.

Además de estos diversos estilos de configuraciones, existen diferentes tipos de membranas, y diferentes criterios por los cual clasificarlas, el más común podría ser su forma, según esto se tienen cuatro tipos principales.

- Membranas planas:

Están constituidas por una lámina que se coloca dentro de un marco, circular o rectangular, el cual actúa como soporte de la membrana y le confiere rigidez y resistencia. Actualmente son poco usadas ya que presentan un área de contacto pequeña y una baja capacidad productiva, para utilizarlas en instalaciones de tamaño medio se requieren numerosas membranas, como ventaja se podría mencionar la amplia separación entre membranas, esto hace que se obstruyan menos que otras y que su limpieza se pueda ejecutar de forma fácil y eficaz.

- Membranas tubulares:

La membrana o membranas, van alojadas en el interior de un tubo, el cual soporta la presión del proceso y está provisto de los orificios necesarios para la entrada y salida de los flujos de agua. En la actualidad sus aplicaciones se limitan al campo de la industria ya que, aunque son más compactas que las anteriores y mantienen las ventajas de dificultad de ensuciamiento y fácil limpieza, siguen siendo demasiado voluminosas en relación con su capacidad productiva

- Membranas de fibra hueca:

Estas membranas están constituidas por un haz de millones de tubos capilares con un diámetro inferior a  $0,1 \mu\text{m}$ , esta delgadez permite su empaquetamiento en poco espacio, dentro de un tubo cilíndrico que constituye la carcasa protectora y permite la circulación de la solución a desalar, pero también estas membranas presentan grandes posibilidades de obstrucción, solo se usan con aguas sometidas a pretratamiento y con bajo contenido de sólidos en suspensión.

- Membranas de arrollamiento en espiral:

Están formadas por varias láminas rectangulares, que constituyen las membranas propiamente dichas, enrolladas alrededor de un eje cilíndrico provisto de perforaciones que permiten recoger el agua producto; para este enrollamiento se intercalan un separador impermeable que permite aislar el caudal producto de la salmuera, y una malla, que determina los canales hidráulicos por los que circula el agua a tratar y que debido a su forma cuadrículada garantiza un régimen de funcionamiento turbulento. Este enrollamiento permite introducir una gran superficie de membrana en un espacio reducido, aunque también requieren de un tratamiento previo.

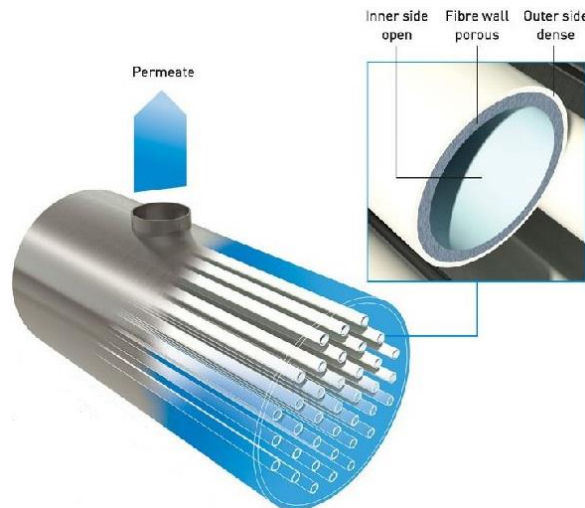


Figura 12: Esquema de membrana de fibra hueca.

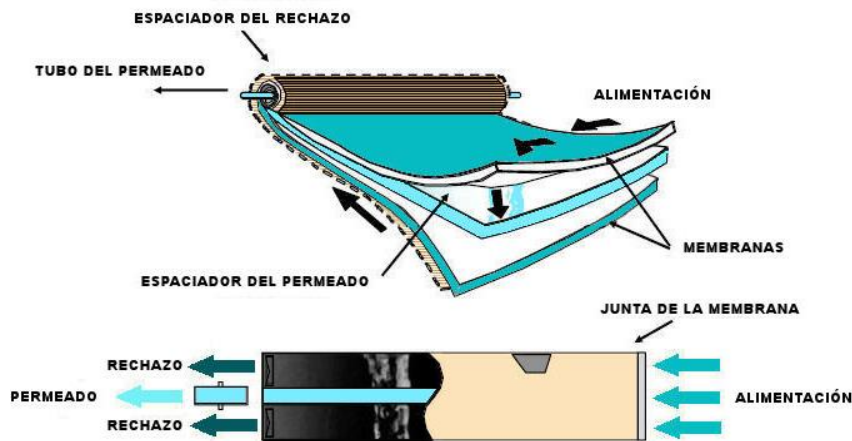


Figura 13: Esquema de membrana de arrollamiento en espiral.

En los tratamientos de desalación de aguas para abastecimientos urbanos y agrícolas solo se emplean esos dos últimos tipos de membranas. Además de esta clasificación, se pueden diferenciar por su composición química:

- Membranas orgánicas:

Su capa activa está fabricada a partir de un polímero orgánico. Tienen un costo bajo y un buen procesado, pero una corta vida de operación además de verse afectadas normalmente por la temperatura, el pH y gran variedad de sustancias químicas.

- Membranas inorgánicas:

Están fabricadas por cerámicas (alúmina), vidrios, fosfacenos o estructuras de carbono. Son bioinertes y tienen una mejor resistencia mecánica, térmica y química, lo que les confiere una larga vida de operación, aunque por otro lado tienen una mayor fragilidad.

Además las membranas se pueden clasificar según su presión de trabajo, según este criterio, existen membranas de muy baja presión, de 5 a 10 bar, usadas para tratar aguas de baja salinidad, membranas de baja presión, de 10 a 20 bar, para aguas de salinidad media, membranas de media presión, entre 20 y 40 bar, para numerosas aplicaciones y membranas de alta presión, 50 a 80 bar, para la desalación de agua de mar.

### 3.2.2 Desalación de agua de mar en Canarias

La primera experiencia de planta desaladora en Canarias se llevó a cabo en Lanzarote, en el año 1964, donde se construyó una unidad de evaporación súbita multietapa de 2300 m<sup>3</sup>/día; cinco años más tarde, entró en servicio en Las Palmas de Gran Canaria una planta, también de evaporación súbita multietapa, con una producción de 20000 m<sup>3</sup>/día, esta planta fue en su momento una de las más grandes del mundo. La isla de Fuerteventura se incorporó al uso de la desalación en 1970 con una planta con la misma tecnología que las anteriores y con una producción de 2000 m<sup>3</sup>/día; además, en esta misma isla, se comienzan a instalar módulos desaladores con una nueva tecnología, destilación por compresión de vapor, esta tecnología, que tiene un gran atractivo para el sector hotelero e industrial, ha tenido un gran desarrollo en Canarias en contraposición con otras zonas del mundo, que no ha tenido mucha expansión.

En cuanto a la desalación por membrana, la pionera de la tecnología de ósmosis inversa en Canarias, fue una planta de desalación de aguas salobres instalada en 1979, en una finca del Servicio Agrícola de la Caja Insular de Ahorros de Gran Canaria; luego entre los años 1982 y 1983 se construyó la primera planta de ósmosis inversa para agua de mar en Canarias en Arrecife, Lanzarote. En 1986 se introdujo una nueva tecnología, la electrodiálisis, con lo que se completaba la gama comercial de procesos de membrana existentes, la primera planta instalada fue en Maspalomas, Gran Canaria, con una producción de 22000 m<sup>3</sup>/día.

La figura 14 muestra la explotación de los diferentes tipos de recursos a lo largo del periodo comprendido entre 1978 y 2012, como se puede observar, la producción de agua mediante tecnologías como la desalación o reutilización ha sufrido un notable crecimiento; en contraposición con la obtención de agua mediante recursos subterráneos o superficiales que ha ido mermando a lo largo de los años. Actualmente la desalación es una tecnología absolutamente implantada en Canarias y forma parte integrante del panorama de los recursos hídricos.

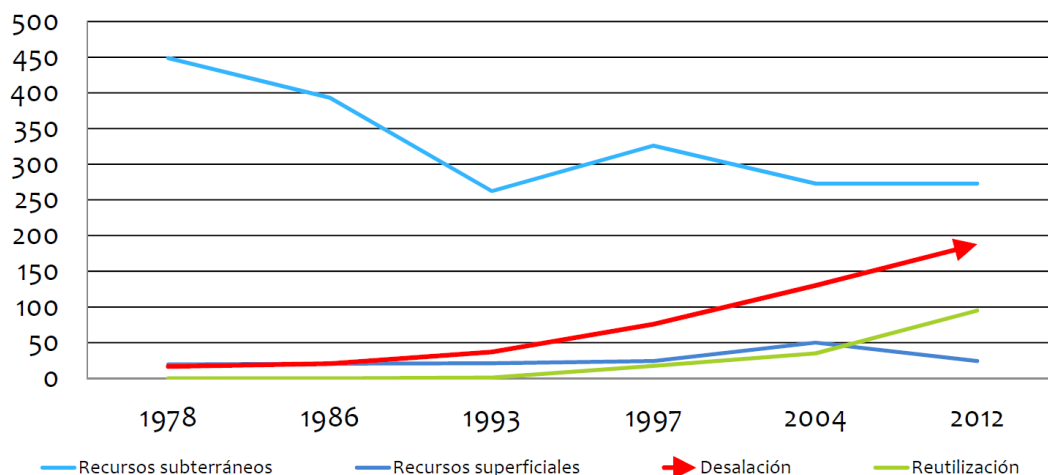


Figura 14: Evolución de la oferta de aguas en Canarias (hm³/año). (Fuente: Gobierno de Canarias)

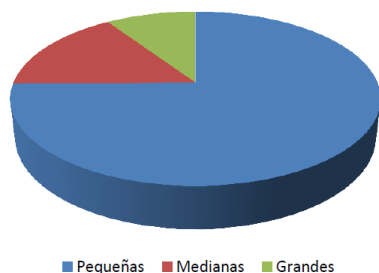
La producción de agua desalada en Canarias se situaba en 210 hm³ en el año 2004 y en 188 hm³ en el año 2012, habiendo una capacidad instalada de producción que supera los 600000 m³/día, entre plantas públicas y privadas. La capacidad de producción instalada en las diferentes islas en 2012 se muestra en la tabla 5, cabe señalar que debido a las construcciones recientes el volumen de agua producido actualmente puede ser diferente ya que las cifras son variables.

	Nº desaladoras	Nº Públicas	Nº Privadas	Producción (m³)
<b>Gran Canaria</b>	137	11	126	336195
<b>Tenerife</b>	44	5	36	118143
<b>Fuerteventura</b>	64	4	60	65049
<b>Lanzarote</b>	85	5	80	62570
<b>La Gomera</b>	1	0	1	4100
<b>El Hierro</b>	4	4	0	2000
<b>La Palma</b>	0	0	0	0

Tabla 5: Plantas desaladoras y producción de agua desalada en Canarias (2012). (Fuente: Gobierno de Canarias)

Atendiendo a la clasificación por tamaño, mediante la cual se consideran plantas pequeñas cuando no superan los 2000 m³/día, plantas medianas cuando su producción está entre 2000 y 5000 m³/día y grandes a partir de 5000 m³/día; en Canarias, aproximadamente el 75 % del número de plantas son pequeñas, un 16 % son medianas y solo un 9 % son de gran tamaño.

Distribución por unidades instaladas



Distribución por capacidad productiva

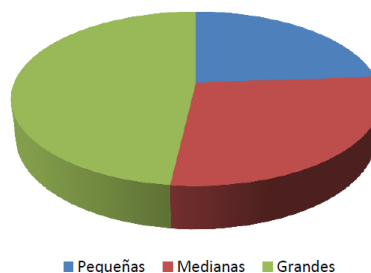


Figura 15: Plantas desalinizadoras por tamaño en Canarias. (Fuente: TAGUA)

Por tanto, en la actualidad sólo las islas de La Gomera y La Palma no dependen del agua desalada de mar, de hecho no cuentan con plantas desaladoras públicas, y el suministro de agua de abastecimiento público está garantizado a través de la extracción de agua subterránea captada a través de pozos y galerías. La dependencia relativa de la producción de agua desalada de mar para garantizar el abastecimiento público en cada una de las islas se refleja en la figura 16, en esta se puede observar que la dependencia de la desalación de aguas en las islas es elevada por lo general, solo las dos islas mencionadas anteriormente no dependen de esta tecnología pero de resto todas tienen cierta dependencia, destacando Lanzarote y Fuerteventura que tienen una dependencia total; esto pone de manifiesto la importancia que tiene la desalación de aguas en las islas.

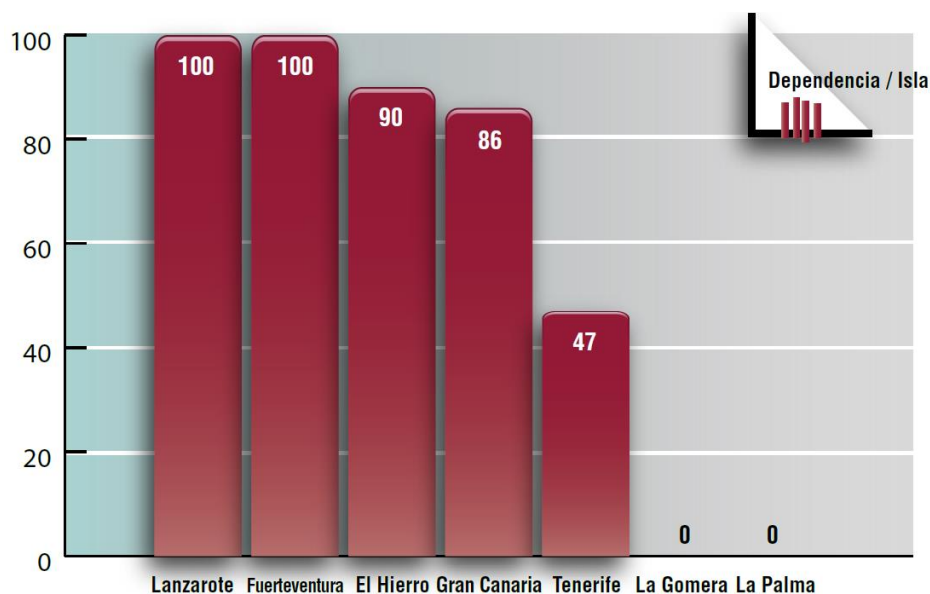


Figura 16: Dependencia (%) del agua desalada para abastecimiento doméstico en Canarias. (Fuente: Gobierno de Canarias)

### 3.3 Energías renovables

La desalación cubre la demanda de agua actual gracias a un suministro de energía que, por lo general, es de origen fósil, en el año 2013, la capacidad de desalación asociada a energías renovables representaba menos del 1% de la capacidad mundial de desalación, y ante la próxima era de petróleo insuficiente y de coste elevado las energías renovables cuentan con un papel fundamental no solo en la desalación sino en sus diversas aplicaciones. Las principales energías renovables vinculadas a la desalación son: la energía eólica, la energía solar térmica y fotovoltaica, la biomasa, la energía de origen geotérmico y la energía mareomotriz y undimotriz, se utiliza una u otra dependiendo del tipo de tecnología utilizada para la desalación y de si esta necesita energía en forma de calor o electricidad. La principal tecnología de desalación que se combina con EERR es la ósmosis inversa, seguida por la evaporación súbita multietapa y la evaporación multiefecto.

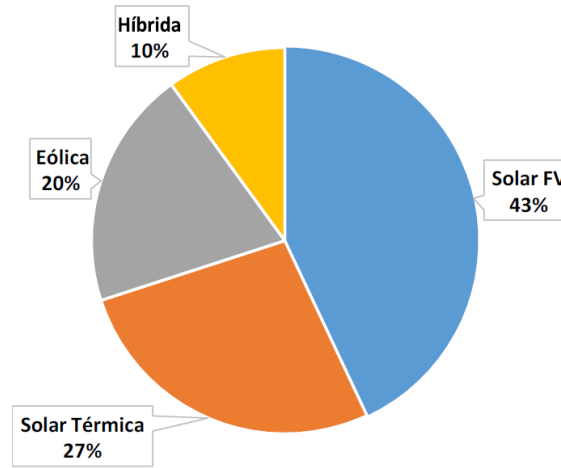


Figura 17: Fuentes de EERR vinculadas a la desalación. (Fuente<sup>1</sup>)

En el uso de las energías renovables para procesos de desalación se puede distinguir el uso de EERR aisladas de una red eléctrica, que se utiliza cuando la capacidad de la planta desaladora es pequeña o mediana; en este sistema, por lo general, se necesita almacenamiento de agua y/o energía para superar la variabilidad del recurso energético, las inversiones son altas y dependen del volumen de agua producido, requiere un sistema de control para optimizar el aprovechamiento del recurso energético y se puede hibridar y/o combinar con diésel. Por otro lado, está la opción de combinar EERR conectadas a la red eléctrica, realizando un autoconsumo o balance neto, se suele utilizar en plantas con capacidades de producción medianas y grandes, requiere habitualmente de un almacenamiento de agua para dar respuesta a la demanda y de un sistema de control para gestionar la carga eléctrica, se puede realizar la venta de energía, lo que conlleva una cierta viabilidad económica del proyecto por venta del recurso pero existen diversas limitaciones en las normativas locales existentes que necesitan de un estudio exhaustivo.

A continuación, en el gráfico 17, se muestran las combinaciones más habituales entre tecnología de desalación y energía renovable empleada. A pequeña escala la combinación más extendida es la ósmosis inversa con solar fotovoltaica, seguida de electrodiálisis reversible con fotovoltaica y ósmosis inversa con eólica, en cambio, a gran escala la más prometedora es la eólica con ósmosis inversa y la solar térmica con evaporación multiefecto.

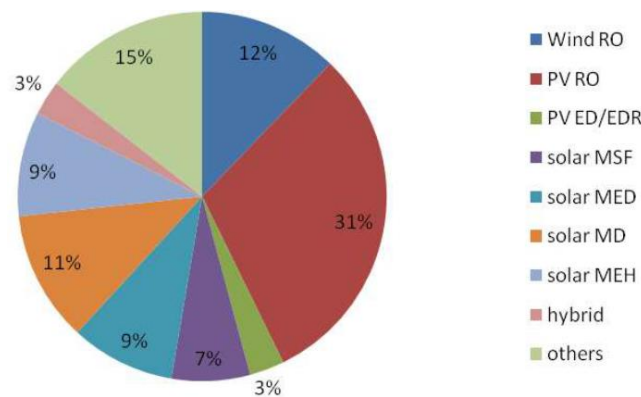


Figura 18: Combinaciones de desalación con EERR más extendidas. (Fuente: ITC)

<sup>1</sup> K. Quteishat and Abu-Arabi, "Promotion of Solar Desalination in the MENA Region" Middle East Desalination Research Center, Muscat, Oman, 2012

En este proyecto se realiza el diseño de una planta desaladora de agua de mar mediante ósmosis inversa alimentada mediante energía eólica, un ejemplo real de una planta similar en régimen de autoconsumo eólico es la planta de la empresa Soslares Canarias. S.L. ubicada en Vargas, Gran Canaria, que tiene una producción diaria de 5000 m<sup>3</sup>, unos 1,5 millones m<sup>3</sup>/año, cuenta con cuatro aerogeneradores cada uno de 660 kW, la salinidad media del agua es de 400 ppm, tiene un consumo específico de 3,7 kWh/m<sup>3</sup> a pie de finca y evita la emisión de 6000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año.

### 3.3.1 Energía eólica

Todos los cuerpos en movimiento desarrollan una energía, el viento es aire en movimiento, por lo que la energía eólica se puede definir como la energía desarrollada por el viento. El aire es una mezcla de gases y otras sustancias en suspensión, de los cuales el nitrógeno es el componente principal; la generación del viento se puede esquematizar en la siguiente explicación: el sol calienta la tierra y el aire frío que viene del mar, al pasar por la tierra aumenta su temperatura, como el aire caliente pesa menos, asciende y, según los obstáculos que se encuentre, puede tener mayores o menores turbulencias; se conoce que entre un 1-2 % de la energía del sol que incide en nuestro planeta se transforma en viento.

La energía del viento es captada por los aerogeneradores, al girar las palas de este y mover el generador convierte la energía eólica en energía eléctrica. Por lo general, los aerogeneradores se agrupan, formando los denominados parques eólicos, en zonas con una alta incidencia del viento; normalmente, los aerogeneradores suelen estar sobre una torre de varios metros, ya que la velocidad del viento aumenta con la altura y además se consigue alejar las turbulencias del viento inferior. La energía eólica, por tanto, es una energía renovable, esta presenta diversas ventajas e inconvenientes, tales como:

- Es una energía limpia, no contamina y no daña el suelo ni sus fines agrícolas.
- Su impacto ambiental es bajo, además aprovecha las zonas áridas o no cultivables por su topografía.
- Es segura y confiable, garantiza autonomía por más de 80 horas, sin conexión a redes de suministro.
- Es una energía económica, ahorra gasto de combustible en centrales térmicas y/o hidroeléctricas.
- No es almacenable.
- Es discontinua, su intensidad y dirección cambian repentinamente, además la fluctuación en la intensidad puede provocar apagones y daños.
- Produce contaminación sónica y causa un choque visual y paisajístico, aparte de afectar a muchas rutas migratorias de aves.
- Presentan varios inconvenientes de carácter técnico en su producción y requiere cables de alta tensión muy gruesos para evacuar la producción.

En orden de producción, y a fecha de 2010, los países que lideraban el manejo de la energía eólica eran Estados Unidos, Alemania, China, España e India, como se puede observar, España es un país puntero en esta tecnología y, a pesar de las críticas provenientes de algunos sectores científicos y ecologistas, se evidencia un notable incremento de la demanda, y cada vez más países se muestran interesados en aplicar esta alternativa.



### Aerogeneradores

Los aerogeneradores son los encargados de transformar la energía eólica en energía eléctrica, el funcionamiento de este es explicado a continuación con la ayuda del esquema de la figura 19. El viento (1) hace mover la hélice o rotor (2), la cual suele estar compuesta por dos o tres paletas orientables con diámetro variable, estas palas hacen girar el eje de pequeña velocidad (4), este a su vez mueve una caja de engranajes (5), alcanzando una velocidad mayor suficiente para producir electricidad, la rueda dentada (6) mueve a otra rueda menor aumentando de tal manera la velocidad en el generador (7) del eje de alta velocidad (8); un anemómetro (9) mide la velocidad del viento, dato que es transmitido a un equipo de control (10) que regula el proceso; estos componentes van alojados en un bastidor (11) para su protección. El freno (12) se utiliza para detener el rotor en caso de emergencia, la veleta (13) informa de la dirección del viento y se comunica con el sistema de giro (14) que va provisto de un motor (15), para orientar adecuadamente el aerogenerador al viento. El aerogenerador, mediante el equipo de control, entra en funcionamiento cuando la velocidad del viento pasa de un mínimo determinado y se detiene cuando la velocidad supera un máximo ya que cuando los vientos son muy fuertes hay que detener el aerogenerador para evitar roturas o accidentes.

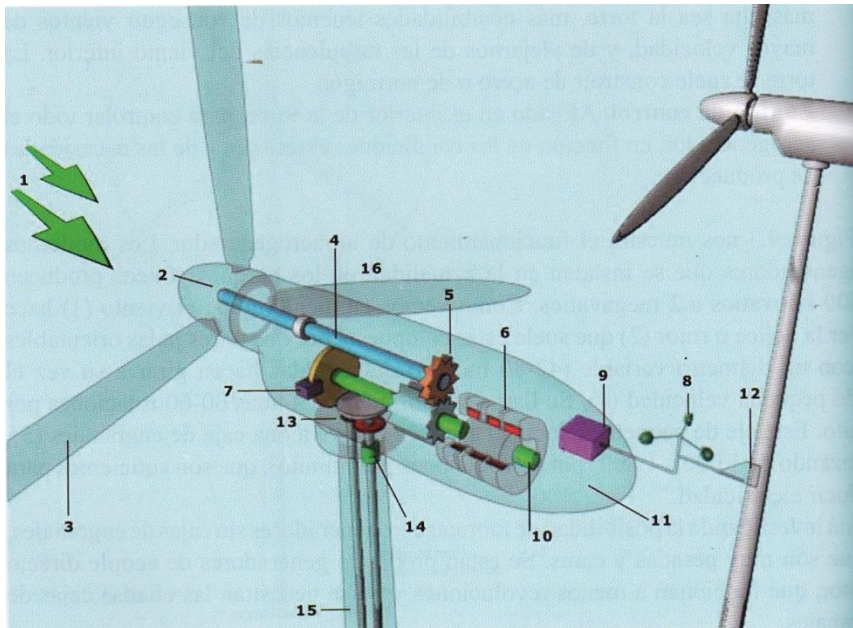


Figura 19: Esquema de componentes de un aerogenerador.

### 3.4 Hidrógeno

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, en condiciones normales es un gas, insípido, incoloro e inodoro. En la Tierra es muy abundante, pero se encuentra combinado con otros elementos, por tanto, no es un combustible que pueda tomarse directamente de la naturaleza, sino que se tiene que fabricar. Los ejemplos más comunes de hidrógeno ligado a otros elementos están en el agua ( $H_2O$ ), dos átomos de hidrógeno se combinan con uno de oxígeno, en el gas metano ( $CH_4$ ), el carbono y el hidrógeno se combinan en la naturaleza formando largas cadenas que son la base de la materia viva, y en el carbono y el petróleo, el carbón y los hidrocarburos formados a lo largo de millones de años, contiene carbón e hidrógeno.

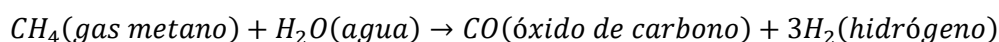
En la tabla 6 se exponen algunas de las características importantes que tiene el hidrógeno desde el punto de vista energético, estos datos están basados en el poder calorífico inferior del hidrógeno.

Masa del H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> en estado gaseoso (Nm <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> en estado líquido (litros)	Energía (MJ)	Energía (kW-h)
<b>1</b>	11,2	14,12	120	33,33
<b>0,0899</b>	1	1,270	10,8	3,00
<b>0,0708</b>	0,788	1	8,495	2,359
<b>0,00833</b>	0,0926	0,1177	1	0,278
<b>0,0300</b>	0,333	0,424	3,6	1

Tabla 6: Características energéticas del hidrógeno. (Fuente: Asociación Española del Hidrógeno)

Los métodos empleados para obtener hidrógeno ya sea a partir del agua, de los combustibles fósiles o de la materia orgánica (biomasa) son:

- Reformado con vapor: Mediante una corriente de vapor de agua sobre gas metano a una temperatura de 700-1100 °C, se produce la siguiente reacción:



Normalmente se realiza a una presión alta ya que el hidrógeno es más manejable y fácil de comercializar, la desventaja de este método es que el gas metano es un combustible fósil y como tal desprende gases de efecto invernadero cuando se quema.

- Electrolisis: Se basa en la separación electrolítica de los componentes del agua, esta técnica tiene la ventaja de no producir emisiones, pero por otro lado, tiene el inconveniente de tener un coste elevado.
- Síntesis biológica: Muchos microorganismos de metabolismo anaeróbico se alimentan de materia orgánica que descomponen, dando hidrógeno gaseoso como subproducto de su proceso de digestión.

El hidrógeno puede ser uno de los grandes recursos energéticos del futuro, en la actualidad ya se utiliza para diversos propósitos tales como: el refinado de combustibles fósiles, la obtención de amoníaco, el tratamiento de metales, la producción de metanol y ácido clorhídrico, en la industria alimentaria y en la industria automovilística. En varias partes del mundo ya circulan vehículos movidos por hidrógeno, particularmente en California (USA) y Japón circulan autobuses y automóviles con motores eléctricos que llevan una pila de combustible que convierte el hidrógeno en electricidad, aunque el problema con los que se encuentran estos vehículos es que apenas existen estaciones de servicio para recargar hidrógeno; para solucionar esto se ha pensado en que los usuarios tengan su propio generador de H<sub>2</sub> o la posibilidad de quemar directamente el hidrógeno para mover el vehículo, lo cual no origina contaminación; el problema de las pilas de combustible es que aún son muy caras, pero como todas estas tecnologías modernas, el ritmo de investigación es alto y el abaratamiento de los costes está en crecimiento.

### 3.4.1 Pilas de combustible

Una pila de combustible, también llamada célula o celda de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma de forma directa la energía química en eléctrica. Parte de unos reactivos, un combustible (generalmente hidrógeno) y de un comburente (oxígeno) para producir agua, electricidad en forma de corriente continua y calor.

En la figura 20 se muestra el principio de funcionamiento de una célula de combustible, una pila de combustible está formada por 45 o más células. En primer lugar, a través de unas placas, se hace llegar el combustible de hidrógeno hasta el ánodo y oxígeno del aire al cátodo, en el ánodo cada átomo de hidrógeno se divide en un electrón y un protón, esta separación es catalizada por la presencia de platino en el ánodo. El electrolito permite únicamente el paso de los protones hasta llegar al cátodo, sin embargo, los electrones son forzados hacia un circuito externo hasta que también alcanzan el cátodo, en el viaje de circulación desde el ánodo hasta el cátodo los electrones crean una corriente eléctrica. En el cátodo, se produce la combinación de los electrones y protones de hidrógeno con el oxígeno del aire, formando agua que sale en forma de vapor, además, si el gas de partida es metano, que tiene carbono en su composición, además de agua saldrá  $\text{CO}_2$ .

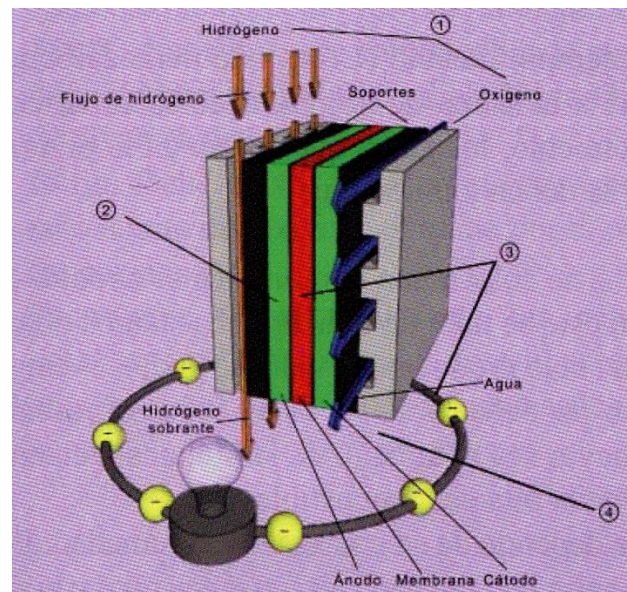


Figura 20: Principio de funcionamiento de una célula de combustible.

## 4. Normas y referencias

### 4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas

- UNE 157001:2002. Criterios generales para la elaboración de proyectos.
- UNE 50-132:94. Numeraciones de las divisiones y subdivisiones de los documentos escritos.
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.
- Real Decreto 482/1985, de 6 de marzo, sobre traspaso de funciones y servicios de la Administración del Estado a la Comunidad Autónoma de Canarias en materia de obras hidráulicas.
- Ley 12/1990, de 26 de julio, de Aguas de Canarias
- Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial (modificación BOE-A-2011-19242).
- Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.
- Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.

- Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.
- Decreto 6/2015, de 30 de enero, por el que se aprueba el Reglamento que regula la instalación y explotación de los Parques Eólicos en Canarias.
- Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano. Ministerio de sanidad y política social.
- Plan Hidrológico de Tenerife. Cabildo de Tenerife.
- Plan Insular de Ordenación del Territorio de Tenerife. Cabildo de Tenerife.
- Reglamento y normas de presentación de los trabajos de fin de grado de la Escuela Superior de Ingeniería Civil e Industrial de la Universidad de La Laguna.

#### 4.2 Bibliografía

- Agüera Soriano, José (2002). Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas. Madrid: Editorial Ciencia.
- Medina San Juan, José Antonio (1999). Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis Inversa. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Veza, José Miguel (2002). Introducción a la Desalación de Aguas. Gran Canaria: Servicio de publicaciones y producción documental de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Madrid Vicente, Antonio (2009). Energías renovables (fundamentos, tecnologías y aplicaciones) (primera edición). Madrid: AMV Ediciones, Mundi-Prensa.
- Villarrubia López, Miguel (2011). Ingeniería de la energía eólica (primera edición). Barcelona: Marcombo, S.A.
- López Hernández, Irina Amparo (2016). Estudio de una planta de desalación alimentada mediante energía eólica. Trabajo de fin de grado, Ingeniería Mecánica, Universidad de La Laguna, Tenerife.
- Delgado Trujillo, Eduardo José (2016). Estudio de una planta de desalación alimentada mediante energía eólica. Trabajo de fin de grado, Ingeniería Mecánica, Universidad de La Laguna, Tenerife.
- López Hernández, Irina Amparo (2016). Estudio de una planta de desalación alimentada mediante energía eólica. Trabajo de fin de grado, Ingeniería Mecánica, Universidad de La Laguna, Tenerife.
- González Fariña, Diego (2015). Estudio de una planta desaladora abastecida por energías renovables. Trabajo de fin de grado, Ingeniería Mecánica, Universidad de La Laguna, Tenerife.
- Romero González, Juan Francisco. Estudio y optimización de una planta de ósmosis inversa de tratamiento de agua para una industria alimentaria. Trabajo de fin de grado, Escuela Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Gutiérrez López, Belén (2012). Recuperación de energía de la salmuera. Tesis doctoral, Ingeniería Química, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Muelas Expósito, Álvaro (2011). Manual de utilización del software “rosa” para simulación de unidades de ósmosis inversa. Trabajo de fin de grado, Ingeniería Química Industrial, Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- Pino Priego, Antonio (2009). Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. el caso de la producción de hidrógeno. Proyecto fin de carrera, Ingeniería de Organización Industrial, Universidad de Sevilla, Sevilla.
-

- Pérez Talavera, José Luis (Febrero 2017). Avances en la investigación e ingeniería de las técnicas e instalaciones de desalación de agua de mar en las Islas Canarias, [en línea]. Tenerife: Fundación General de la Universidad de La Laguna. Disponible en: <http://campus.fg.ull.es/>
- Peñate Suarez, Baltasar (Febrero 2017). Desalación con uso exclusivo de energías renovables: de la pequeña a la gran escala, [en línea]. Tenerife: Fundación General de la Universidad de La Laguna. Disponible en: <http://campus.fg.ull.es/>
- Vera Machín, Iván (Febrero 2017). Gestión de plantas desalinizadoras de pequeño y mediano tamaño, [en línea]. Tenerife: Fundación General de la Universidad de La Laguna. Disponible en: <http://campus.fg.ull.es/>
- Santana, Carmelo (Febrero 2017). Sistema de gestión, seguimiento y control de las instalaciones desaladoras y redes de distribución en alta del CIAGC, [en línea]. Tenerife: Fundación General de la Universidad de La Laguna. Disponible en: <http://campus.fg.ull.es/>
- Peñate Suarez, Baltasar (2013). Plan de ecogestión en la producción y distribución de agua de Canarias, [en línea]. Canarias: Instituto Tecnológico de Canarias. Disponible en: [http://oic.itccanarias.org/files/PLAN\\_ECOGESTION\\_DEL\\_AGUA.pdf](http://oic.itccanarias.org/files/PLAN_ECOGESTION_DEL_AGUA.pdf)
- Peñate Suarez, Baltasar (2013). La importancia de los sistemas de recuperación de energía en la desalación de aguas en Canarias, [en línea]. Disponible en: <http://www.iagua.es/blogs/baltasar-penate-suarez/importancia-sistemas-recuperacion-energia-desalacion-aguas-canarias>
- Hydranautics, Nitto Group Company (2015). IMSDesign-2015: User Guide, [en línea]. Disponible en: <http://www.hydranauticsprojections.net/imsd/downloads/IMSD-UserGuide.pdf>
- Mehta Komal y Patel A.S. (2014). Reverse osmosis design with hydranautics design software for industrial waste water reuse [en línea]. Gujarat (India). Disponible en: <file:///C:/Users/Nazaret/AppData/Local/Temp/JeradDLId0421vol009issue002-1.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (1998). Libro blanco del agua (documento de síntesis), [en línea]. Disponible en: <http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/libro-blanco-del-agua/#>
- Ministerio de Medio Ambiente. La desalación de agua de mar y el vertido de la salmuera, [en línea]. Disponible en: <http://www.chguadalquivir.es/documents/10182/41484/DesalacionAguaMar.pdf/108df051-41dd-4d88-82b8-1ea9af162a03>
- K. Quteishat y Abu-Arabi (2012). Promotion of Solar Desalination in the MENA Region [en línea]. Oman: Middle East Desalination Research Center. Disponible en: [http://www.sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/QUTEISHAT%20and%20ABUARABI%202004%20Promotion%20of%20Solar%20Desalination%20in%20the%20MENA%20Region.pdf](http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/QUTEISHAT%20and%20ABUARABI%202004%20Promotion%20of%20Solar%20Desalination%20in%20the%20MENA%20Region.pdf)
- Repositorio Institucional Universidad de La Laguna: [www.riull.ull.es/](http://www.riull.ull.es/)
- Consejo Insular de Aguas de Tenerife: [www.aguastenerife.org/](http://www.aguastenerife.org/)
- Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria: [www.aguasgrancanaria.com/](http://www.aguasgrancanaria.com/)
- Comisión Nacional del Agua: [www.conagua.gob](http://www.conagua.gob)
- Centro Canario del Agua: [www.fcca.es](http://www.fcca.es)
- Instituto Nacional de Estadística: [www.ine.es](http://www.ine.es)
- Instituto Canario de Estadística: [www.gobiernodecanarias.org/istac/](http://www.gobiernodecanarias.org/istac/)

- Polígono Industrial de Granadilla S.A.: [www.polgran.com](http://www.polgran.com)
- Cartográfica de Canarias S.A.: [www.grafcan.es](http://www.grafcan.es)
- Acuamed: [www.acuamed.es](http://www.acuamed.es)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations: [www.fao.org](http://www.fao.org)
- Puertos del Estado: [www.puertos.es/](http://www.puertos.es/)
- Instituto Tecnológico de Canarias: [www.itccanarias.org](http://www.itccanarias.org)
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía: [www.idae.es](http://www.idae.es)
- National Renewable Energy Laboratory: [www.nrel.gov/](http://www.nrel.gov/)
- Sistema Español de Información sobre el Agua: [hispagua.cedex.es/](http://hispagua.cedex.es/)
- Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos: [www.asetub.es/](http://www.asetub.es/)
- Hydranautics: [www.membranes.com](http://www.membranes.com)
- Batimetría: [www.arcgis.com/](http://www.arcgis.com/)
- Tagua S.L.: [www.tagua.es](http://www.tagua.es)
- KSB: [www.ksb.com](http://www.ksb.com)
- Energy Recovery: [www.energyrecovery.com](http://www.energyrecovery.com)
- Sulzer: [www.sulzer.com](http://www.sulzer.com)
- Lowara: [www.lowara.com](http://www.lowara.com)
- Goolzoom: [www.goolzoom.com](http://www.goolzoom.com)
- Amiantit: [www.amiantit.eu/](http://www.amiantit.eu/)
- Flowtite: [www.flowtite.com](http://www.flowtite.com)
- Future Pipe Industries: [www.futurepipe.com/](http://www.futurepipe.com/)
- Prefabricados Delta: [www.prefabricadosdelta.com](http://www.prefabricadosdelta.com)
- Escuela de Organización Industrial: [www.eoi.es](http://www.eoi.es)
- Gamesa: [www.gamesacorp.com](http://www.gamesacorp.com)
- The Wind Power: [www.thewindpower.net/](http://www.thewindpower.net/)
- Proton On-Site: [www.protononsite.com](http://www.protononsite.com)
- Quintech: [www.quintech.de](http://www.quintech.de)
- GETC Asia: [www.getcasia.com](http://www.getcasia.com)
- Etecnología: [www.etechnologia.com/](http://www.etechnologia.com/)
- Twenergy – El portal de eficiencia energética de Endesa: [www.twenergy.com/](http://www.twenergy.com/)
- Energías Renovables: [www.energiasrenovablesinfo.com](http://www.energiasrenovablesinfo.com)
- Parque Eólico Experimental Sotavento: [www.sotaventogalicia.com](http://www.sotaventogalicia.com)
- Centro Nacional de Energías Renovables: [www.cener.com](http://www.cener.com)
- Centro Nacional del Hidrógeno: [www.cnh2.es](http://www.cnh2.es)

#### 4.3 Programas de cálculo

- Software para el dimensionado de membranas IMSDesign.
- Software para el dimensionado del intercambiador de presión: hoja Excel ofrecido por Energy Recovery.
- Microsoft Office Word 2010.
- Microsoft Office Excel 2010.
- Aplicación online para la selección de bombas del fabricante Sulzer.
- Aplicación online para la selección de bombas del fabricante KSB.
- Aplicación online para la selección de bombas del fabricante Lowara.
- Aplicación online para la estimación de la energía producida por un aerogenerador del Instituto Tecnológico de Canarias.

## 5. Definiciones y abreviaturas

El presente apartado trata de definir los conceptos y abreviaturas más relevantes en la redacción de este documento con el fin de que estén claros y no puedan llevar a equívoco.

### 5.1 Definiciones

- Permeado: Caudal de agua producto (agua desalada) a la salida de los bastidores de membranas.
- Salmuera: Caudal de agua de rechazo, este es rechazado por las membranas y tiene un contenido alto en sales.
- Conversión: Porcentaje que relaciona el caudal de agua producto con el caudal de alimentación, es decir, el agua que es capaz de desalar a partir de un cierto caudal de entrada.
- Paso de sales: Cociente entre la concentración de sales en el permeado con respecto al promedio de concentración de sales en la alimentación.
- Eficiencia: parámetro que relaciona la potencia que sería capaz de producir un equipo en condiciones ideales y la potencia que produce realmente.
- Curvas características de una bomba: La relación entre los distintos valores del caudal proporcionado por una bomba con otros parámetros como la altura manométrica, el rendimiento hidráulico, la potencia requerida y la altura de aspiración, que están en función del tamaño, diseño y construcción de la misma, y que especifica cómo será su comportamiento hidráulico.
- Consumo específico: parámetro que relaciona el consumo de energía externa de la planta desaladora con el agua que es capaz de producir.

### 5.2 Abreviaturas

- EDAM: Estación Desaladora de Agua de Mar.
- EERR: Energías Renovables.
- OI: Ósmosis Inversa.
- MSF: Destilación Súbita Multietapa.
- MED: Destilación Multiefecto.
- CV: Compresión de Vapor.
- ED: Electrodialisis.
- SDI: Índice de Densidad de Sedimentos.
- TDS: Sólidos Totales Disueltos.
- PEM: Membrana de Intercambio Protónico.
- PHT: Plan Hidrológico de Tenerife.
- PIOT: Plan Insular de Ordenación de Tenerife.
- PGO: Plan General de Ordenación.
- ITC: Instituto Tecnológico de Tenerife.
- FCCA: Fundación Centro Canario del Agua.
- IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía.
- FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- MAGRAMA: Ministerio de Agricultura y Medioambiente

## 6. Requisitos de diseño

En este apartado se establecen las bases del presente proyecto y los datos de partida necesarios para el diseño, estos parámetros son constituidos a partir de las necesidades del peticionario del proyecto y los que derivan de la normativa aplicable, del emplazamiento seleccionado y de los estudios realizados encaminados a la definición de la solución adoptada.

### 6.1 Datos del peticionario

El peticionario de este proyecto encarga la realización del estudio de un sistema de desalación y de producción de hidrógeno alimentado mediante energías renovables, por tanto, partiendo de esta petición se establecen las siguientes consideraciones iniciales:

- La planta desaladora de agua utilizará como tecnología de desalación la ósmosis inversa.
- La energía con la que se alimenta la planta será la energía eólica.
- La producción de hidrógeno en este proyecto será solo un estudio básico de las diferentes alternativas existentes.

### 6.2 Situación y emplazamiento

Para la elección del emplazamiento de la EDAM se deben tener en cuenta varias premisas, en primer lugar, se deben buscar zonas con necesidades hídricas convencionales y con disponibilidad de recurso eólico, en segundo lugar debe localizarse lo más cercano a la costa posible para disminuir los consumos y por último, la planta debe ubicarse en un lugar en el que se permita su construcción.

Para la búsqueda de zonas con necesidades hídricas se estudia la población, el repartimiento de la población sobre el territorio es heterogéneo y con distintos ritmos de crecimiento, debido, esencialmente, a que existe mayor actividad turística en el sur de la isla que en el norte. Ello ha propiciado desequilibrios importantes de la estructura demográfica, que se encuentra asimismo caracterizada por un elevado nivel de dispersión; en la figura 21 se pone de manifiesto el porcentaje de crecimiento demográfico en las distintas áreas de Tenerife.

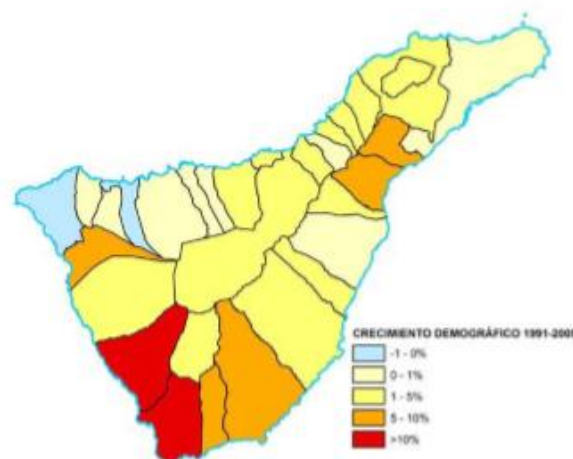


Figura 21: Evolución de la población de derecho. Periodo 1991-2005. (Fuente: PHT)



La superficie de Tenerife es de 2.033 km<sup>2</sup> y debido a su orografía cuenta con una pendiente muy elevada. Atendiendo a la localización de los habitantes por altitud, el 80 % se establece por debajo de los 500 m, en cuanto a las plazas turísticas, la gran mayoría (88,3%) se sitúan a cotas inferiores a los 100 m, y prácticamente la totalidad de ellas por debajo de los 300 m; por tanto las zonas costeras de la isla son las más pobladas.

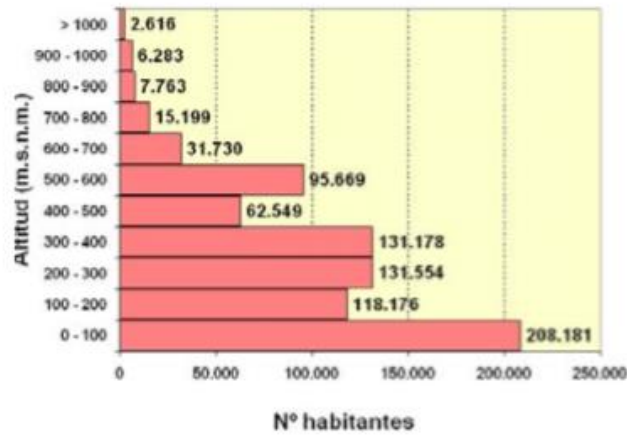


Figura 22: Distribución de la población por altitud. Año 2005. (Fuente: PHT)

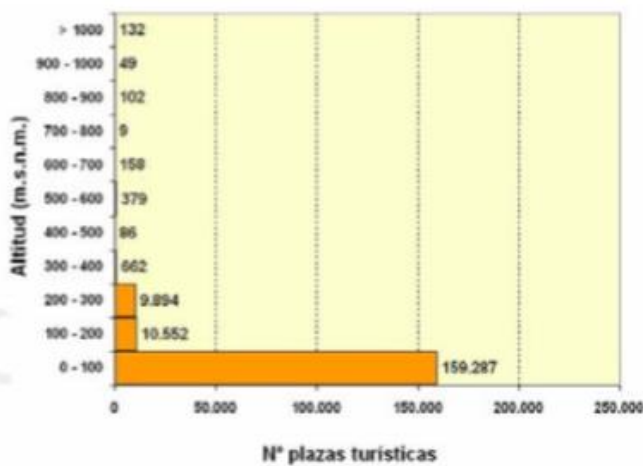


Figura 23: Distribución de las plazas turísticas por altitud. Año 2005. (Fuente: PHT)

En segundo lugar se estudian los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Para conocer los recursos hídricos superficiales, se comienza por estudiar la variación de las condiciones climáticas en las diferentes zonas de la isla.

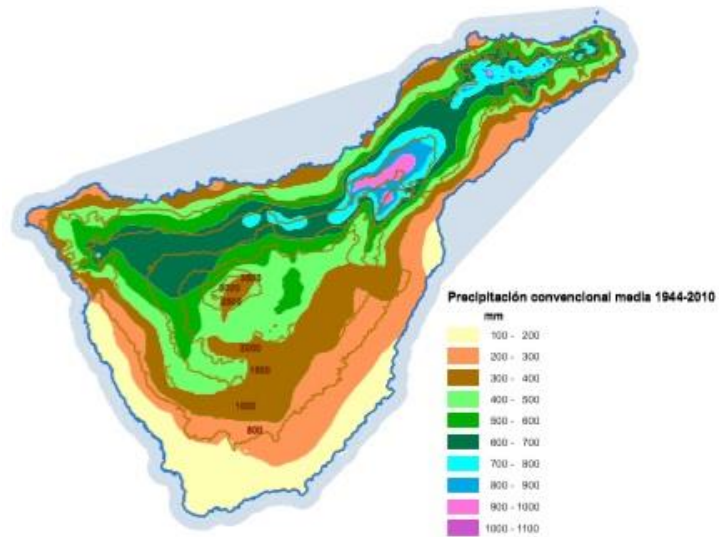


Figura 24: Precipitación convencional media. Periodo 1944-2010. (Fuente: PHT)

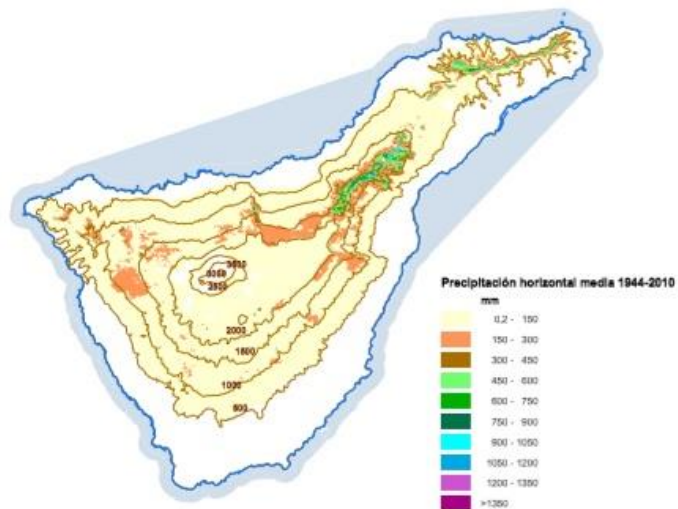


Figura 25: Precipitación horizontal media. Periodo 1944-2010. (Fuente: PHT)

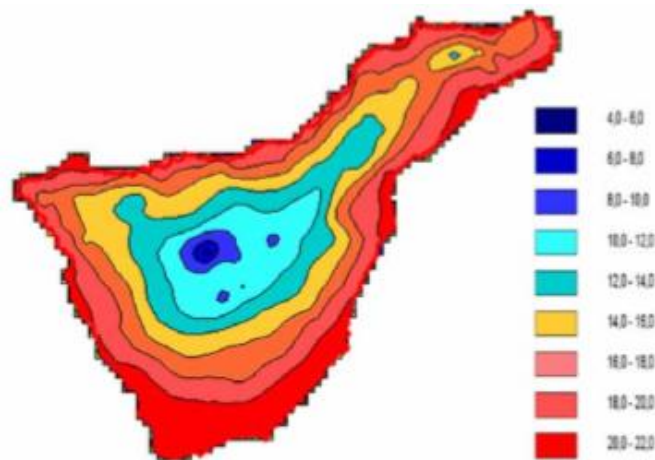


Figura 26: Isolíneas de temperatura media (°C). Periodo 1944/45-2004/2005. (Fuente: PHT)

Durante el periodo comprendido entre 1944 y 2010 se observa que la vertiente sur de la isla es la zona con más escasez de precipitación convencional, y que la precipitación horizontal es por lo general escasa en gran parte de la isla. Geográficamente, la zona de costa del sur es la más calurosa, ya que tiene una temperatura media anual de 20,5°C y la zona de menor temperatura es el Pico del Teide. Como se comprueba en el figura 26 la temperatura varía con la altitud, pero esta variabilidad no es constante debido al mar de nubes que se forma en la isla, sobre todo en la zona norte; en particular, en el Valle de La Orotava, entre la costa y los 800 m la temperatura disminuye a razón de 1°C cada 100 m, a partir de esta altura el gradiente se reduce a 0,2°C/100m, análogo al que se produce en el sur. Otro parámetro a contemplar ligado a la precipitación es la infiltración en el subsuelo, en la distribución territorial de esta se pone de manifiesto la diversidad geológica en la isla que da lugar a evidentes contrastes del umbral de infiltración, siendo las zonas costeras y sur de la isla las franjas con menor penetración de la lluvia en el subsuelo.

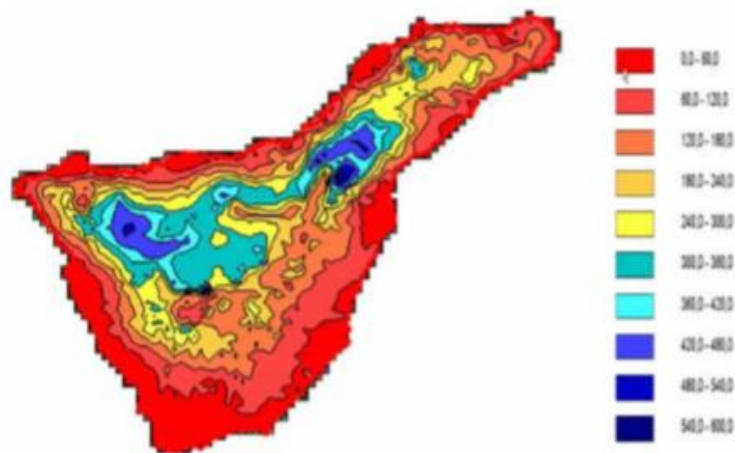


Figura 27: Evolución de la infiltración efectiva (mm). Periodo: 1944/45-2005/06. (Fuente: PHT)

En cuanto a los recursos hídricos subterráneos, durante el periodo comprendido entre los años 1985-2005, por lo general, el caudal de las galerías sufrió una reducción de un 25%, y el de los pozos incrementó en un 40%, pero existen variaciones territoriales bastantes significativas, ya que en algunos municipios, como Icod o La Guancha, se han visto acrecentadas levemente las extracciones pero en otros, como Fasnia, Güímar, Garachico y Tacoronte, se han experimentado disminuciones del 60, 58, 57 y 70%, respectivamente.

Los caudales aprovechados por los pozos han incrementado debido a nuevas obras de tipo sondeo, entre los años 1985 y 2005 aumentó el número de sondeos de 31 a 108; todas estas nuevas captaciones se sitúan por encima de los 400 m y se reúnen mayoritariamente en la vertiente sur y en menor medida en el entorno de La Laguna, La Esperanza, Tacoronte y en la franja costera de los valles de Icod y La Orotava. El incremento en las extracciones si ha estado mejor repartido, y salvo excepciones (Puerto de La Cruz) la tendencia generalizada ha sido al aumento.

En las figuras siguientes se muestra la distribución territorial de la evolución de extracción de aguas subterráneas, así como la extracción de aguas subterráneas en el año 2005.

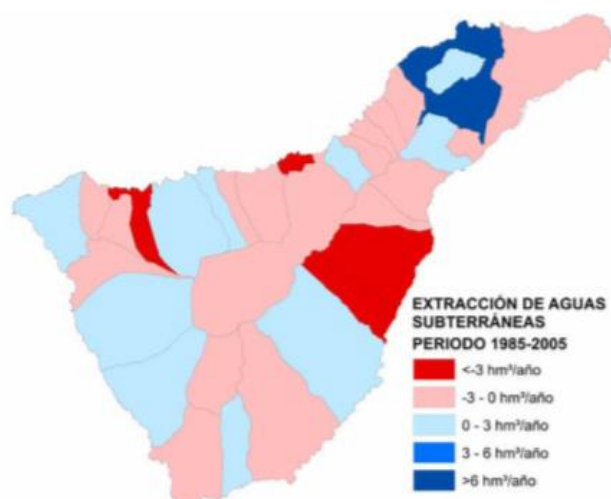


Figura 28: Variación de la extracción de aguas subterráneas. Periodo 1985-2005. (Fuente: PHT)

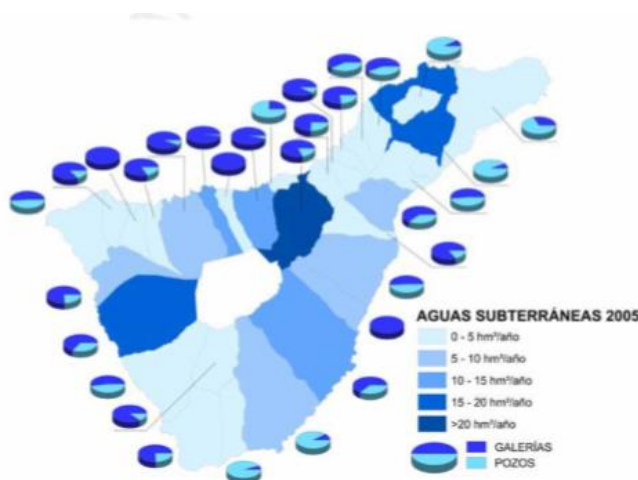


Figura 29: Volúmenes de extracción de aguas subterráneas. Año 2005 (Fuente: PHT)

Desde un enfoque cuantitativo, el Plan Hidrológico de Tenerife distingue dos usos realmente consuntivos: el abastecimiento y el riego. El abastecimiento está conformado por los siguientes grupos de consumo: urbano, turístico, industrial, de servicios y agropecuario (usos ganaderos) y el riego está constituido principalmente por el riego agrícola y de campos de golf. A continuación, en la tabla 7, se puede observar los volúmenes anuales consumidos por el conjunto de abastecimiento y riego, incluido los recursos no aprovechados, en el periodo de 1991 a 2005, constatándose la importancia que ha ido adquiriendo el abastecimiento dentro del conjunto insular y el descenso del riego agrícola.

	Consumo (hm³/año)		Consumo (%)		Tasa anual crecimiento 1991 – 2005
	1991	2005	1991	2005	
ABASTECIMIENTO	82,10	114,90	39,6%	53,3%	3,3%
RIEGO	109,20	89,65	52,7%	41,6%	-1,5%
RECURSOS NO UTILIZADOS	16,00	14,03	7,7%	6,5%	-1,0%
TOTAL	207,30	218,58	100,0%	101,5%	0,5%

Tabla 7: Evolución de consumos. Años 1991–2005. (Fuente: PHT)

El crecimiento de la demanda de abastecimiento se prevé que se vea acompañada por el mantenimiento de la demanda de riego. Con ello, la demanda conjunta según el PHT se situaría en los 228,6 hm<sup>3</sup> en 2015 y alrededor de 244 hm<sup>3</sup> en 2025 frente a los 218,6 hm<sup>3</sup> en 2005.

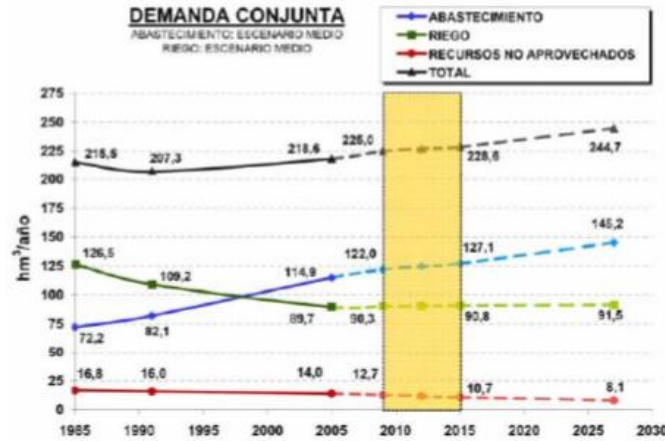


Figura 30: Evolución de la demanda conjunta de abastecimiento y riego. (Fuente: PHT)

Por último, tras el análisis de los recursos y demandas se pueden determinar los siguientes balances, en las figuras 31 y 32. En el año 2005 existían varias zonas donde la demanda era mayor que los recursos (zona III, V, VII, VIII), en este año para dar respuesta al crecimiento de la demanda insular ante una reducción de la disponibilidad de recursos subterráneos (190,73 hm<sup>3</sup>) se utilizaron 27,86 hm<sup>3</sup> de agua procedente de la desalación de agua de mar y reutilización de agua regenerada (18,92 y 8,94 hm<sup>3</sup>, respectivamente).

En el año 2015 siguen existiendo diferentes zonas (zona III, V, VII) donde la demanda de agua es mayor a los recursos disponibles, por tanto estas zonas son las candidatas para ubicar la EDAM objeto de este proyecto.

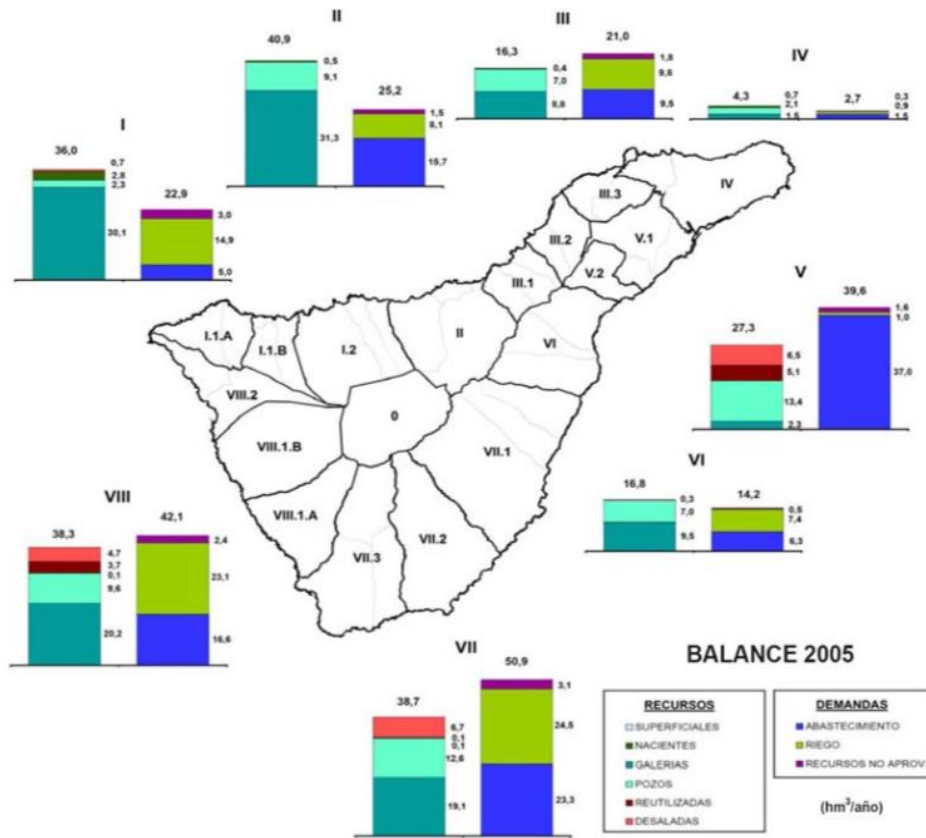


Figura 31: Balance hídrico. Año 2015. (Fuente: PHT)

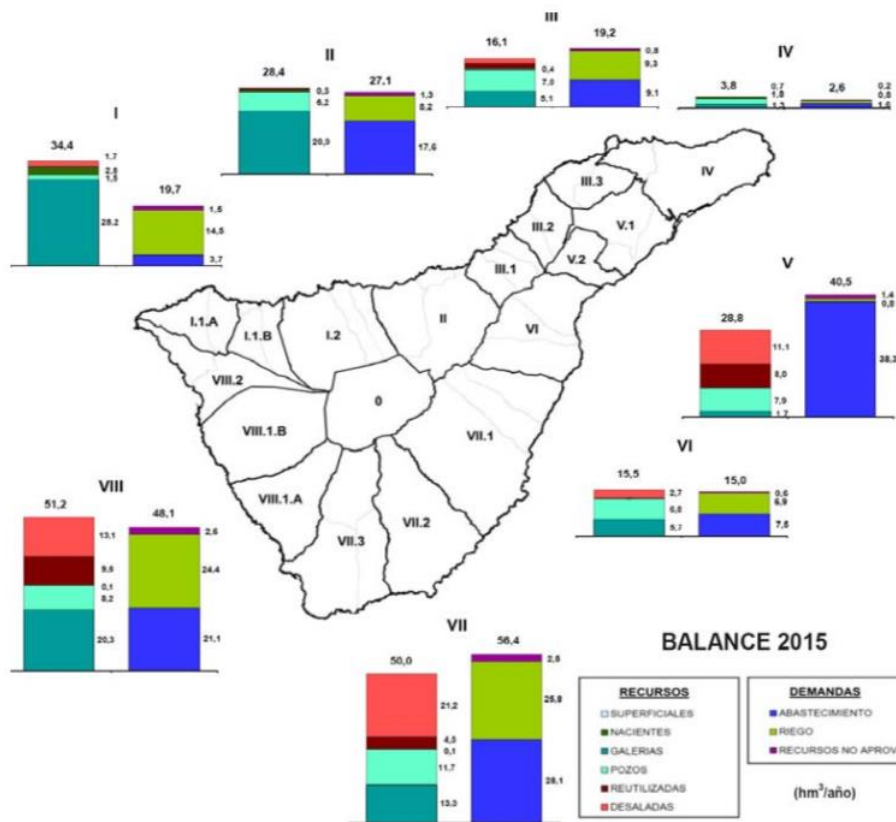


Figura 32: Balance hídrico. Año 2015. (Fuente: PHT)

Ahora, ya que esta EDAM estará alimentada mediante el aprovechamiento del recurso eólico se deberá buscar una zona que sea compatible con este requisito, para ello se consulta el Plan Insular de Ordenación de Tenerife, concretamente los índices de potencial eólico y el mapa eólico de la isla de Tenerife, mostrados en las figuras 33 y 34.

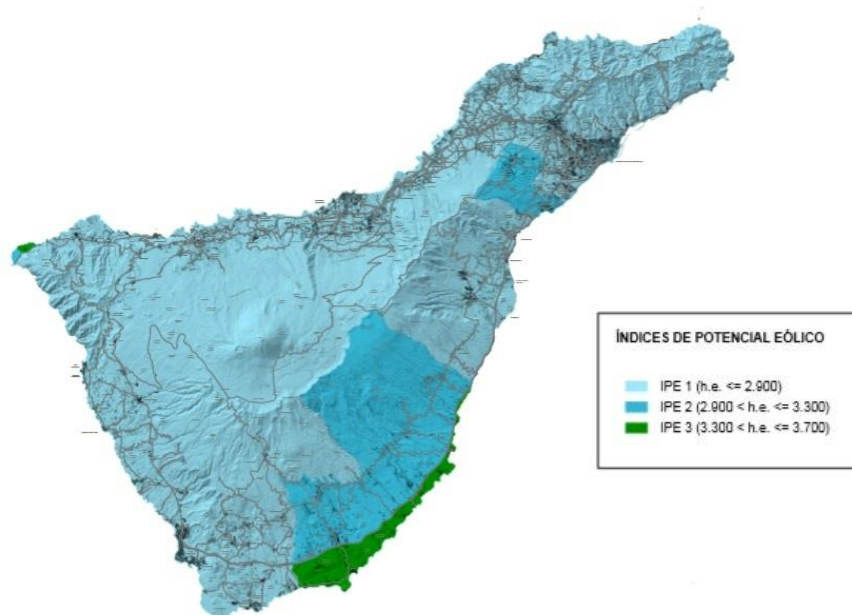


Figura 33: Índices de potencial eólico. Año 2010. (Fuente: PIOT)

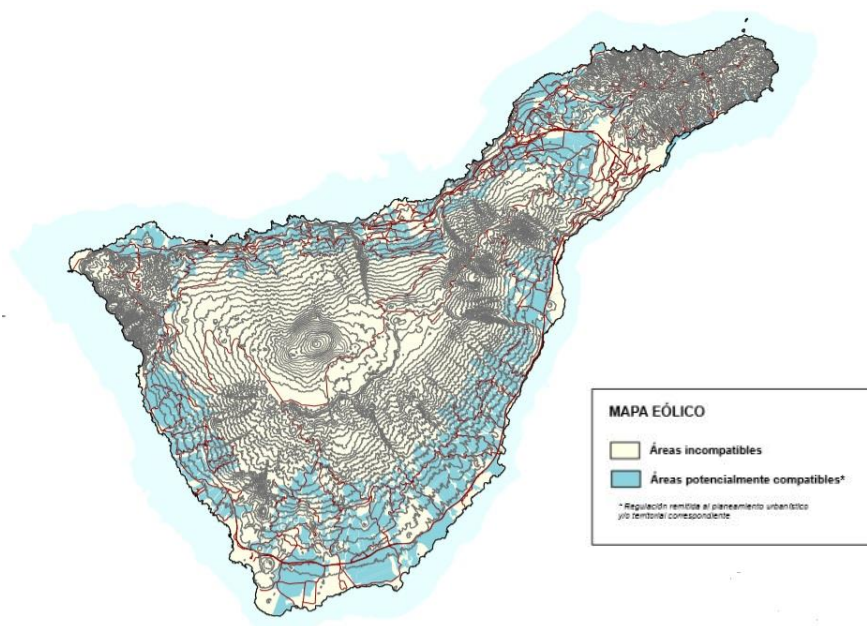


Figura 34: Mapa eólico. Año 2010. (Fuente: PIOT)

En los mapas anteriores se pueden observar los índices de potencial eólico y las áreas compatibles e incompatibles según la regulación remitida al planteamiento urbanístico y/o territorial correspondiente. Los mayores índices de potencial eólico (IPE 3, con unas horas equivalentes entre 3300 y 3700) se encuentran en el norte en el municipio de Buenavista del Norte y en el sur en los municipios de Fasnia, Arico y Granadilla de Abona. Según el mapa eólico, de estos municipios son compatibles los del litoral sur de la isla, quedando excluido por tanto, Buenavista del Norte.

Las zonas por tanto que cumplen con el requisito de necesidad hídrica y que cuente con recursos eólicos, son los municipios de Fasnia, Arico y Granadilla de Abona. De estos se ha elegido el municipio de Granadilla, ya que este ha experimentado un gran crecimiento demográfico en los últimos años, lo que va ligado a un aumento en el consumo de agua, además se está llevando a cabo el proyecto del puerto de Granadilla, con esto se incrementará la actividad del polígono industrial y por consecuente también el gasto hídrico.

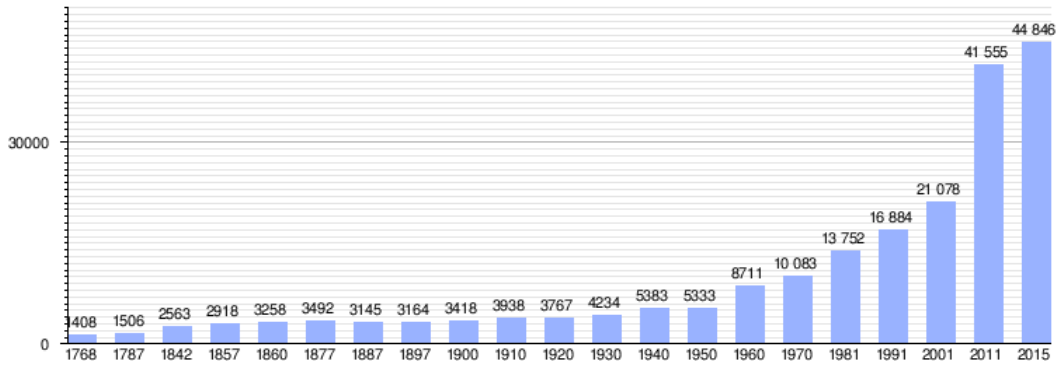


Figura 35: Evolución demográfica de Granadilla de Abona entre 1768 y 2015. (Fuente: INE)

Dentro de este municipio, se deben respetar los espacios en los cuales no se pueden albergar instalaciones de este tipo, los seis espacios naturales protegidos del municipio son el Parque Nacional del Teide y Parque Natural de la Corona Forestal, la Reserva Natural Especial de Montaña Roja, el Monumento Natural de Los Derriscaderos, el Monumento Natural de las Montañas de Ifara y Los Riscos, el Monumento Natural de Montaña Pelada, el Monumento Natural de Montaña Colorada, además de Otros Espacios Naturales: Los Escuriales “El Paisaje Lunar”.

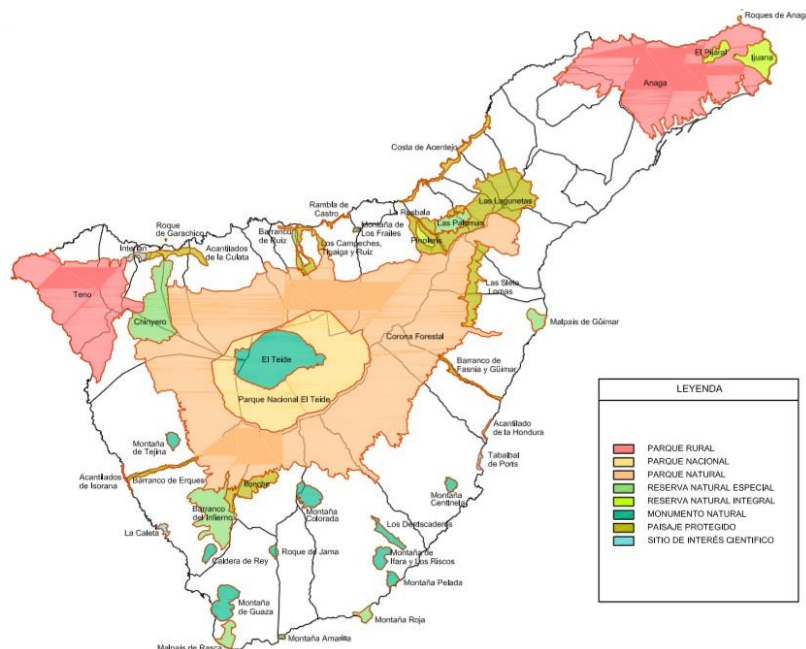


Figura 36: Espacios naturales protegidos (Fuente: PIOT)

La ubicación de la EDAM por tanto, por las razones comentadas anteriormente, será el polígono industrial de Granadilla de Abona.





Figura 37: Plano general del polígono y del puerto.

Los sectores de planeamiento del Polígono Industrial de Granadilla, tal y como constan en el plano general, son las áreas de actividades energéticas, el sector del Instituto Tecnológico de Energías Renovables así como otros sectores ya urbanizados y en proceso de urbanización tales como el sector central, el sector del Parque Tecnológico de Tenerife y el sector litoral del Puerto de Granadilla. Este último, el sector litoral del Puerto de Granadilla (SP3) es el seleccionado para la ubicación de la EDAM ya que de esta manera se localiza lo más próximo a la costa y se disminuyen los consumos; dentro de este sector se selecciona la parcela que se considera adecuada (figura 38) consultando la disponibilidad de los terrenos.

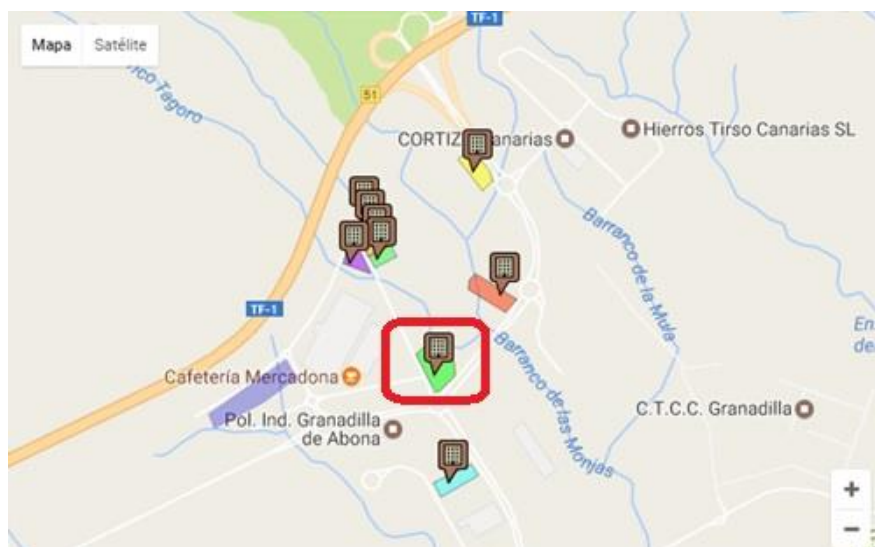


Figura 38: Emplazamiento de la parcela seleccionada para la EDAM. (Fuente: Polgran)

### 6.3 Datos de partida

Existen algunos datos tanto del agua que se va a desalar como del agua ya desalada que tienen relevancia en el modo de ejecutar el diseño. En primer lugar, es importante los parámetros químicos del agua a desalar ya que de estos depende su salinidad, además es de importancia conocer el pH del agua, ya que afecta a la solubilidad de las sales en el agua y se debe tener controlado, un pH demasiado bajo favorece la corrosión pero un pH alto favorece las incrustaciones de sales.

Por otro lado, se debe conocer la temperatura a la que se encuentra el agua de captación, esta tiene cierta relevancia porque afecta especialmente al crecimiento biológico de los microorganismos lo cual tiene un efecto en el funcionamiento de la planta, se deben estudiar las variaciones de temperatura ya que, incluso en Canarias, con temperaturas relativamente estables, el desarrollo de la biomasa es diferente y se debe ajustar el pretratamiento.

Por último cabe destacar que la cantidad de sólidos presentes en el agua de captación está relacionada con el tipo de captación de agua de mar, si es una toma abierta el agua mantiene un contenido alto de sólidos en suspensión, en cambio si la captación es mediante un pozo el propio terreno permeable actúa como prefiltración, por lo que el agua obtenida tiene mucho menor contenido en sólidos y biomasa. Para estimar la tendencia al ensuciamiento de membranas se usa el denominado "Índice de ensuciamiento" (SDI), los valores aceptables en membranas de ósmosis inversa son menores de 5, y preferentemente menores de 3.

En la tabla 8 y 9 se recogen los parámetros químicos y físico-químicos más relevantes, estos datos se obtienen de un análisis químico del agua de captación elaborado por el laboratorio LABAQUA.

<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA</b>	<b>mg/L</b>
Calcio (Ca)	431
Magnesio (Mg)	1470
Potasio (K)	451
Sílice (Si)	1,1
Sodio (Na)	11870
Bromo (Br)	0,5
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	141,5
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	21280
Fluoruros (F <sup>-</sup> )	0,862
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0,7
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	3148
Bario (Ba)	0,017
Boro (B)	5,23
Cobalto (Co)	0,002
Cobre (Cu)	0,002
Cromo (Cr)	0,006
Estroncio (Sr)	10
Hierro (Fe)	0,025
Manganeso (Mn)	0,003

Tabla 8: Composición química del agua de captación. (Fuente: LABAQUA)

<b>PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS</b>	
Conductividad a 25°C (μS/cm)	54767
pH	8
Sólidos en suspensión (SDI) (mg/L)	4

Tabla 9: Parámetros físico-químicos del agua de captación. (Fuente: LABAQUA)

Para la temperatura del agua de captación, se consulta la base de datos de la página web de Puertos del Estado, concretamente los datos de temperatura del punto de medición que se encuentra más cercano a la EDAM y del que se tiene disponibilidad de datos. En la tabla 10 se muestra la temperatura media mensual del agua del año 2014, que son los datos más recientes que se obtienen mediante esta aplicación. La temperatura promedio en este año es de 21,28°C, por lo que, aproximando, la temperatura que se utilizará para los cálculos es 21°C.

<b>TEMPERATURAS</b>	<b>AÑO 2014</b>
Enero	19,64
Febrero	18,57
Marzo	18,00
Abril	18,92
Mayo	19,7
Junio	20,8
Julio	22,41
Agosto	23,42
Septiembre	24,9
Octubre	24,38
Noviembre	23,42
Diciembre	21,2

Tabla 10: Temperatura media mensual año 2014 (Fuente: Puertos del Estado).

La EDAM se busca que tenga un tamaño mediano, que son plantas con un caudal de entre 2000 y 5000 m<sup>3</sup>/día, por tanto se establece que el agua producto, el agua desalada por la planta, tendrá un caudal de 5000 m<sup>3</sup>/día. Las propiedades que debe cumplir están reguladas en el real decreto 140/2003, este real decreto contempla los límites establecidos para el agua de consumo humano, en la tabla 11 se resumen las características físico-químicas y relativas a sustancias no deseables en el agua potable.

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

Tabla 11: Valores límites para el agua de abastecimiento.

## 7. Análisis de soluciones

Este apartado está dedicado al estudio de las distintas alternativas de los apartados más relevantes de este proyecto, además se indica la solución finalmente elegida y su justificación.

En la figura 39 se muestra un esquema de los componentes principales de la EDAM, los componentes objeto de estudio en este apartado.

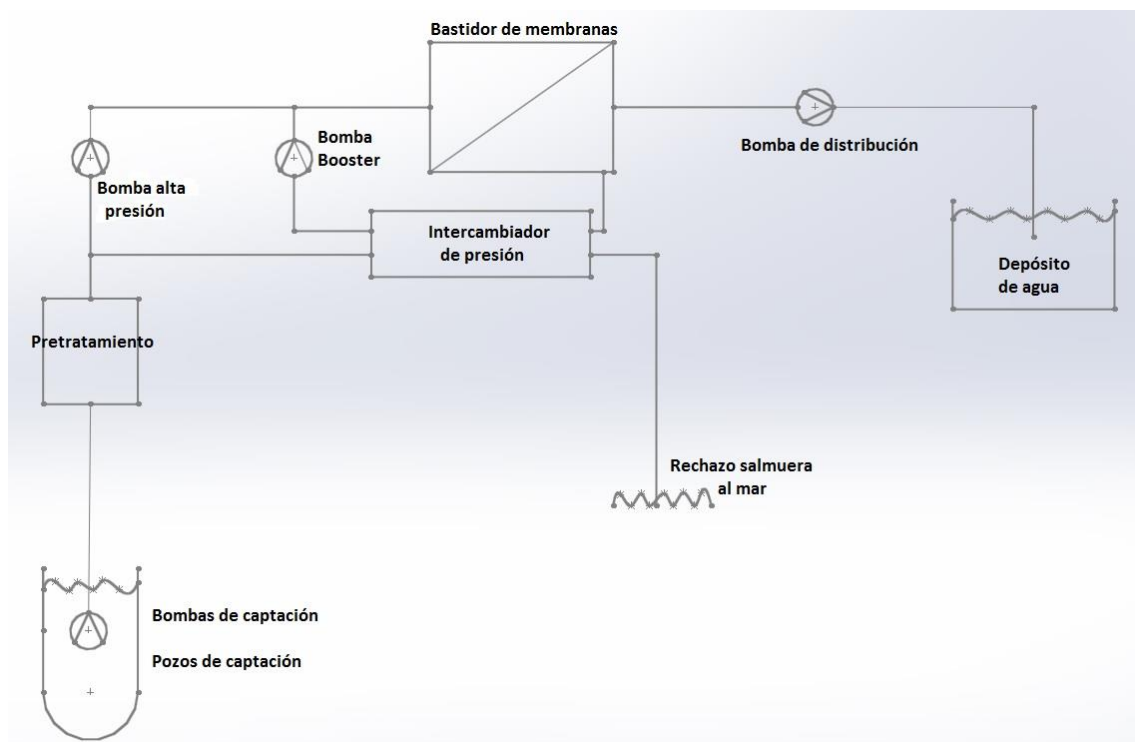


Figura 39: Esquema de los componentes principales de la EDAM.

### 7.1 Captación de agua de mar

Para la captación del agua de mar se pueden distinguir esencialmente dos procesos: captación cerrada y captación abierta.

- Captación cerrada.

Con este tipo de captación y debido a la acción filtrante del terreno el agua recogida suele ser limpia, además de presentar una actividad orgánica o biológica mínima, una concentración de oxígeno disuelto baja, temperaturas estables y concentraciones químicas también estables, aunque con posibles variaciones temporales o estacionales. En cambio, es posible que existan concentraciones de hierro, manganeso, sílice y aluminio altas, además de contaminación por nitratos y plaguicidas. La captación cerrada se da en pozos profundos o playeros, cántaras, drenes horizontales, etc.

- Captación abierta.

En la captación abierta, el agua no es tan limpia, tiene un contenido de sólidos en suspensión elevado y variable y una mayor exposición a gran variedad de contaminantes, además de significativas concentraciones de oxígeno y actividades biológicas y orgánicas. Su temperatura y composición química son variables. Este modo de captación está presente en captación en superficie, torres sumergidas, escollera, etc.

En conclusión, las captaciones cerradas son preferibles a las abiertas, las cuales se emplean cuando las primeras son imposibles de llevar a cabo.

En el diseño de esta EDAM se decide colocar tres pozos de captación, dos de ellos trabajando de manera continua y el tercero de reserva; así se evitan paradas en la planta o variaciones en la producción de la misma lo que puede producir daños en algunos de los equipos, además con esta solución también se evita que el sistema dependa de una sola bomba de captación y la sobreexplotación de un único pozo. Los pozos, con una profundidad de 55 m, se disponen simétricamente en forma de cruz, con una separación de 15 metros con la finalidad de que la separación entre pozos sea suficiente; todos ellos se unen en un colector común desde el cual se conduce a la entrada de la EDAM mediante la tubería de alimentación considerada de 20 m, pero pasando por un tratamiento previo. Seguidamente en la figura 40 se muestra un esquema simple de la disposición de los pozos.

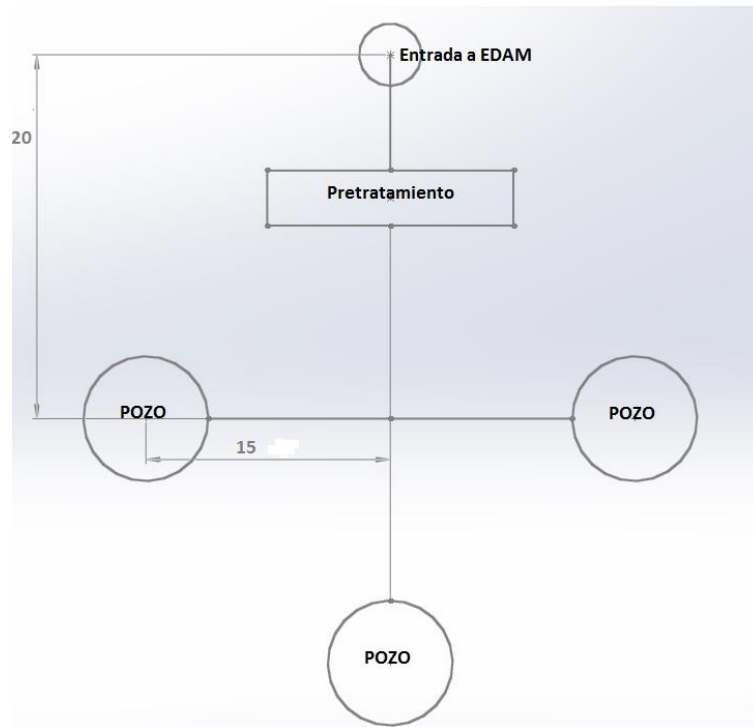


Figura 40: Esquema simple de disposición de los pozos, tuberías de captación y de alimentación.

## 7.2 Pretratamiento

El principal objetivo de esta etapa es impedir el deterioro precoz de los equipos de la EDAM, para ello se deben ajustar las características físicas, químicas y biológicas del agua, para impedir entre otras cosas la formación de incrustaciones o la corrosión. Por tanto, el pretratamiento puede diferenciarse en: pretratamiento físico y químico, en este proyecto el dimensionado del pretratamiento no se realiza de forma exhaustiva ya que este queda fuera del ámbito del proyecto, pero si se nombran las fases que se deben tener en cuenta.

### 7.2.1 Pretratamiento físico

Para la primera fase del pretratamiento físico existen dos opciones: el uso de filtros de arena o de membranas de ultrafiltración; por lo general en los últimos tiempos se ha ido imponiendo el uso de esta última frente a los filtros de arena. En este apartado se realiza un estudio comparativo entre ambos para conocer las ventajas e inconvenientes de cada uno.

	<b>Filtros de arena</b>	<b>Ultrafiltración</b>
<b>Vida útil</b>	6 meses aprox.	Entre 1-2 meses
<b>SDI del agua filtrada</b>	Menor a 2	Entre 2,5-3
<b>Ensuciamiento de membranas de OI</b>	Suele necesitar un lavado una vez al año	Necesario lavarlas entre 1-2 meses
<b>Filtro previo</b>	No lo necesita	Si necesita un filtro de 100-300µ
<b>Productos químicos</b>	No los necesita	Necesita varios
<b>Reposición</b>	Filtros baratos	Membranas caras

Tabla 12: Comparativa entre filtros de arena y membranas de ultrafiltración.

Por tanto, tras el estudio de la tabla anterior y a pesar de que la ultrafiltración en principio pueda parecer más eficiente se decide elegir filtros de arena como primera etapa del

pretratamiento físico. En la segunda etapa en la preparación del agua, imprescindible en procesos con membranas de ósmosis inversa, se deben colocar filtros de cartucho.

### 7.2.2 Pretratamiento químico

El pretratamiento químico está destinado a evitar la precipitación de óxidos metálicos o sales minerales en las membranas.

En primer lugar se efectúa una corrección del pH para ajustarlo a las necesidades del tratamiento, esto se realiza mediante la dosificación de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) con una concentración del 100% antes del filtro de cartucho con la finalidad de que se realice una acidificación del agua de mar, con esto además se evita la precipitación del carbonato cálcico ya que la disminución del pH aumenta la solubilidad de esta sal.

Además, se debe controlar otros valores tales como la saturación de sulfato de bario ( $BaSO_4$ ) y fluoruro cálcico ( $CaF_2$ ), estas sales son poco solubles por lo que se considera necesario recurrir a un dispersante para impedir su precipitación.

### 7.3 Bastidor de ósmosis inversa

El bastidor de ósmosis inversa recibe el agua pretratada, en este, el agua pasa a través de las membranas que van alojadas en el interior de los tubos de presión. Existen diversas empresas fabricantes de membranas tales como Hydranautics, General Electric, Toray y Dow Filmtec, en este proyecto para el dimensionamiento de membranas se ha utilizado el software IMSDesign, desarrollado por la empresa Hydranautics por lo que las membranas utilizadas serán las de esta compañía.

Esta empresa es uno de los líderes mundiales en tecnología de membranas. Para la desalación de agua de mar se usan las membranas SWC, que son una gama para diferentes grados de salinidad de agua de mar, dentro de la cual existen diferentes modelos: SWC4-LD, SWC4 MAX, SWC4B-LD, SWC4B MAX, SWC5-LD, SWC5 MAX, SWC6-LD, SWC6 MAX. Las membranas con denominación SWC4 presentan el mayor rechazo y producen niveles bajos de sólidos totales disueltos, se suelen utilizar en tratamientos de agua de mar y aguas con TDS alto; las membranas SWC4B son similares a las anteriores tienen la misma composición y ofrecen el mayor rechazo también incluyendo el boro; las membranas SWC5 serían la selección óptima cuando se necesitan presiones de alimentación y TDS bajos, estas ofrecen la más alta eficiencia energética a coste bajo y se utilizan en plantas de desalinización grandes; y por último, las membranas SWC6 se usan cuando las temperaturas del agua de mar son más bajas de lo normal por lo que requieren presiones de alimentación altas. Todas las membranas con el sufijo LD adicionalmente están diseñadas para minimizar el ensuciamiento coloidal, utilizan un separador de alimentación específico que evita incrustaciones y aumenta la eficacia de la limpieza de la membrana. Las membranas con el sufijo MAX tienen un área de superficie activa mayor, SWC4 MAX se utiliza cuando se necesitan rechazos excepcionales de sal y boro, SWC4B MAX se utiliza como membrana pretratamiento para conseguir concentraciones de boro más bajas en el permeado, la membrana SWC5 MAX proporciona un rechazo de sal alto y una alta eficiencia energética y la SWC6 MAX ofrece un ahorro de costes y de energía significativo.

En el software IMSDesign las membranas recomendadas son las que aparecen en la siguiente figura 39, por lo que, tras el estudio de las características de cada una de las membranas se escoge como más adecuada entre las opciones del programa, la membrana SWC4 MAX, que ofrece una buena calidad de agua para consumo humano.

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

Figura 41: Membranas recomendadas por el software de dimensionado IMSDesign.

La instalación de una planta desaladora de agua, como ya se ha visto en el apartado de antecedentes, puede constar de una o varias etapas, para esta EDAM se ha optado por un diseño de instalación de simple etapa ya que las configuraciones de varias etapas se suelen usar cuando se necesita un caudal de agua producto elevado, porque a mayor número de etapas, aumenta el caudal recuperado, pero también empeora la calidad.

Pues, tras realizar los cálculos mediante el software de dimensionado de membranas IMSDesign, el bastidor de membranas cuenta con una etapa con 51 tubos de presión y en cada uno de los tubos van alojadas 6 membranas cuyo modelo es SWC4 MAX.

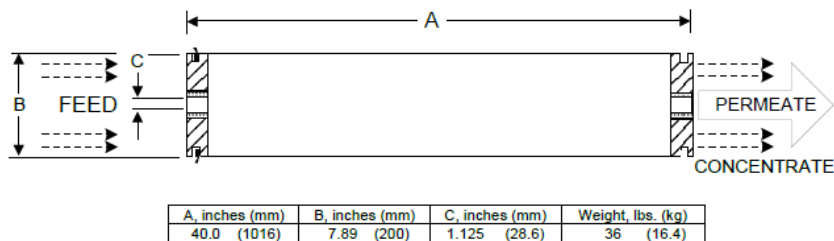


Figura 42: Tubo de presión con membranas SWC4MAX.

### 7.4 Recuperador de energía

El objetivo de un recuperador de energía en las instalaciones de plantas desaladoras de aguas es aprovechar la energía en forma de presión que tiene el caudal de rechazo a la salida del bastidor de ósmosis inversa, para ello, se transfiere esta energía al agua de alimentación del sistema. Esto constituye una mejora en el diseño de plantas de ósmosis inversa, desde el punto de vista de optimización del consumo de energía del proceso.

Para la recuperación de energía en sistemas de desalación existen o han existido diferentes opciones. Por ejemplo, las plantas con sistemas de turbina Francis, actualmente es una tecnología obsoleta ya que los valores de consumo específico no eran deseables ni los valores de rendimiento, que eran relativamente bajos, por otro lado, las turbinas Pelton también han sido desplazadas por otras tecnologías en la actualidad, debido también a los bajos valores de rendimiento. Las opciones que se tienen en cuenta para este proyecto son sistemas con un equipo turbocharger o con intercambiadores de presión.



Con un equipo turbocharger que normalmente se instala entre la descarga de la bomba de alta presión y las membranas, donde actúa como una bomba booster de alta presión y como recuperador centrífugo de la energía proveniente del rechazo, no existe la necesidad de prever un motor de accionamiento eléctrico debido a su funcionamiento hidráulico lo cual constituye una gran ventaja.

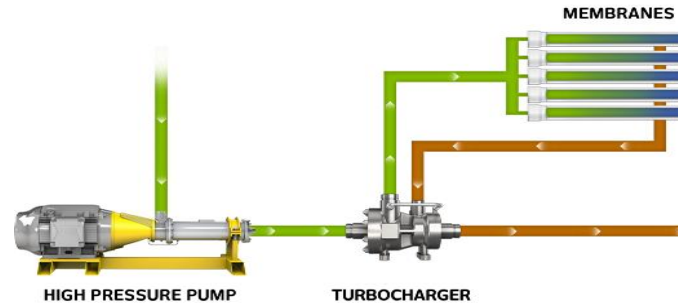


Figura 43: Esquema de instalación con turbocharger. (Fuente: Energy Recovery)

Los recuperadores de tipo isobárico como son los intercambiadores de presión transfieren directamente la presión del agua de rechazo de las membranas al agua de alimentación que proviene de la bomba de alta presión. Las ventajas que presenta este tipo de recuperador a parte de su alto rendimiento son que el caudal de la bomba de alta presión y permeado son prácticamente los mismos, la bomba de alta presión y los sistemas de recuperación de energía se pueden alimentar independientemente y además este sistema permite dar flexibilidad y trabajar con conversión variable en la operación.

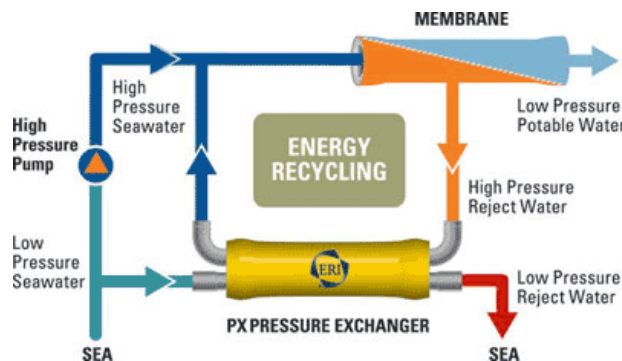


Figura 44: Esquema de instalación con intercambiador de presión. (Fuente: Energy Recovery)

La elección entre estos dos tipos de recuperadores se hace en función del consumo específico que tendría la planta, para conocer estos valores se hace uso del software IMSDesign.

Recuperador de energía	Consumo específico [kWh/m <sup>3</sup> ]
Sin recuperación	5,4
Turbocharger	3,24
Intercambiador de presión	2,59

Figura 45: Comparativa de consumo específico sin recuperador y entre recuperadores de energía.

A la vista de estos resultados, la recuperación de energía en este proyecto se realizará mediante un intercambiador de presión, el cual se seleccionará a continuación. Los principales fabricantes de intercambiadores de presión son Energy Recovery y Flowserve, se selecciona esta primera empresa para la recuperación de energía, en su página web se proporciona una hoja de cálculo Excel mediante la cual se puede realizar el dimensionado del intercambiador de

energía. Tras el dimensionado se obtiene que lo más adecuado para esta planta sea que cuente con 5 intercambiadores de presión del modelo PX-Q300, este dispositivo es el más eficiente que ha diseñado esta marca actualmente, además tiene la ventaja de ser más silencioso que otros intercambiadores del mercado.

## 7.5 Bombas de la instalación

Para la elección de las diversas bombas necesarias en la instalación, se consultan varios fabricantes de maquinaria industrial, tales como KSB, Sulzer y Lowara. A través de las páginas web de estos fabricantes, se puede hacer una selección de la bomba adecuada con los datos del caudal que va a suministrar la bomba y la altura manométrica que debe proporcionar. Una vez estudiadas las múltiples bombas ofrecidas por los fabricantes, se elige el modelo de bomba que presente mejores valores de eficiencia y consumo específico, además de confirmar que el modelo de bomba escogido no produce cavitación.

### 7.5.1 Bomba de alta presión

La bomba de alta presión tiene la misión de elevar la presión del agua de alimentación, agua que ya ha sido anteriormente tratada, a las condiciones requeridas para la entrada en el bastidor de membranas. Esta bomba tiene que ser capaz de proporcionar 675,84 m a un caudal de 211 m<sup>3</sup>/h, para estos datos se obtienen las siguientes bombas:

Fabricante	Modelo	Eficiencia
<b>KSB</b>	Multitec A 125/6-9.1 27.167	75,9%
<b>Sulzer</b>	MSD 4x6x10.5C	79,3%
<b>Lowara</b>	MPE 125.1 / 7--	76,8%

Tabla 13: Datos significativos de las bombas de alta presión consideradas.

Tras el estudio de estas tres alternativas, la bomba de alta presión escogida es el modelo MSD 4x6x10.5C del fabricante Sulzer.

### 7.5.2 Bomba Booster

La bomba booster es la encargada de suplir la diferencia de presión que existe entre la presión que tiene el agua de mar a la salida del intercambiador de presión y la presión que debe tener a la entrada del bastidor de membranas. Esta bomba tiene que ser capaz de proporcionar 17,33 m a un caudal de 252 m<sup>3</sup>/h, para estos datos se obtienen las siguientes bombas.

Fabricante	Modelo	Eficiencia
<b>KSB</b>	Etanorm 150-125-250	85,8%
<b>Sulzer</b>	ZE 200-250	81,2%
<b>Lowara</b>	ICP 200-150-400	82,5%

Tabla 14: Datos significativos de las bombas Booster consideradas.

Tras el estudio de estas tres alternativas, la bomba Booster escogida es el modelo Etanorm 150-125-250 del fabricante KSB.

### 7.5.3 Bombas de captación

El tipo de bomba que se utiliza en la captación de este sistema es sumergible y van ubicadas en los pozos de captación, como ya se ha comentado se ha decidido colocar tres pozos de captación, dos de ellos trabajando de manera continua y el tercero de reserva; por tanto con este diseño existirán dos bombas de captación trabajando simultáneamente.

Estas bombas tienen que ser capaces de proporcionar 101 m a un caudal de 231,48 m<sup>3</sup>/h, cada una, para estos datos se obtienen las siguientes bombas.

Fabricante	Modelo	Eficiencia
KSB	UPA 250C-250/4d	80,3%
Sulzer	SJT-11LC	81,3%
Lowara	Z10275 4/3A-L8W	81,3%

Tabla 15: Datos significativos de las bombas de captación consideradas.

Tras el estudio de estas tres alternativas, las bombas de captación escogidas son el modelo SJT-11LC del fabricante Sulzer.

#### 7.5.4 Bomba de distribución

La bomba de distribución del caudal de permeado es la encargada de elevar este caudal a un depósito situado a mayor cota. Para elegir el depósito al cual se quiere conducir el permeado se consulta el catálogo de infraestructuras hidráulicas existentes del Plan Hidrológico de Tenerife, en este aparece un listado de los depósitos de abastecimiento, se opta por el depósito del Polígono Industrial de Granadilla, cuyos datos son los mostrados en la tabla 16, además se muestra una imagen del depósito seleccionado el cual se encuentra a una longitud aproximada de la EDAM de 1,5 km.

Tipo de infraestructura	Depósito abastecimiento
Denominación	Polígono Industrial de Granadilla
Dato técnico	Capacidad 4500 m <sup>3</sup>
Coordenadas UTM	(X,Y) = 352.093, 3.108.9121018
Cota	101
Municipio	Granadilla de Abona

Tabla 16: Datos del depósito de abastecimiento escogido (Fuente: PHT)



Figura 46: Imagen del depósito de abastecimiento. (Fuente: Google Maps).

Esta bomba tiene que ser capaz de proporcionar 53,89 m a un caudal de 208,33 m<sup>3</sup>/h, para estos datos se obtienen las siguientes bombas.

Fabricante	Modelo	Eficiencia
KSB	Omega 100-375 A	75,8%
Sulzer	A21-80 O	78,5 %
Lowara	MP 125.2/1B-A-5502	73,3%

Tabla 17: Datos significativos de las bombas de distribución consideradas.

Tras el estudio de estas tres alternativas, la bomba de distribución escogida es el modelo A21-80 O del fabricante Sulzer.

## 7.6 Postratamiento

El agua para consumo humano según la normativa vigente debe tener un valor de pH comprendido entre 6,5 y 9,5, el agua de permeado resultado de la planta desaladora tiene un pH bajo de 5,3 y que no cumple con estos valores por lo que este debe ser reajustado. Además el agua puede tener un nivel de calcio bajo y baja alcalinidad, debido al elevado rechazo de estos iones por las membranas, por tanto, es un agua desequilibrada, su estabilización puede conseguirse mediante varios procedimientos:

- Descarbonatación: con este método se consigue reducir el  $\text{CO}_2$  y el pH queda en 6-6,5.
- Adición de productos químicos: se suele emplear cal,  $\text{CO}_3\text{Ca}$ ,  $\text{NaOH}$  o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , aunque con los dos últimos, se estabiliza el pH pero por la ausencia de calcio no se garantiza que el agua no sea corrosiva.
- Mezclas con otras aguas: donde el agua desalada suponga al menos un 10% de la composición.

Esta última opción resulta el método más idóneo, ya que solo se necesita combinar el agua desalada con otra, pero se debe conocer más sobre las necesidades de esta fase para poder adoptar la solución más adecuada.

## 7.7 Rechazo salmuera

Para realizar el rechazo de la salmuera se considera necesario la colocación de un emisario submarino, este se decide colocar en la isobata -11 a una distancia de 1550 m de la EDAM con un trazado principalmente recto, esta distancia se ha medido con la ayuda de un mapa generado por ArcGIS un plataforma web de representación cartográfica. Esta isobata es seleccionada por considerarse que está lo suficientemente lejos de la costa y que de este modo no interfiere en la salinidad del agua de captación; pero es tan solo un punto orientativo, porque para la elección de este se deben estudiar más parámetros referentes a las aguas superficiales y subterráneas, sus ecosistemas, etc. Además, se comprueba que no es necesaria la colocación de una bomba, ya que con la diferencia de cota es suficiente.

### Batimetría de las Islas Canarias

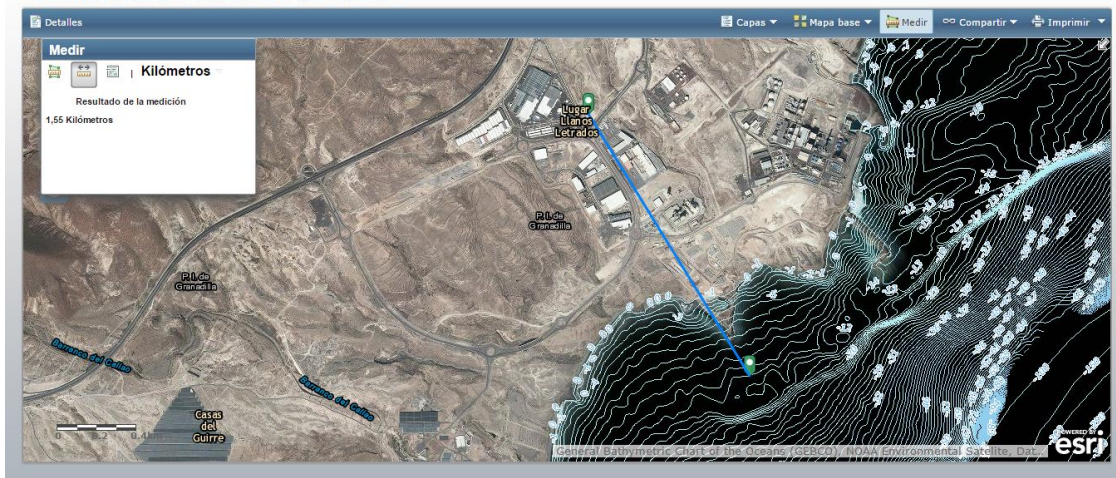


Figura 47: Distancia de tubería de rechazo (Fuente: ArcGIS)

## 7.8 Tuberías principales

En este apartado se realiza un análisis del material de las tuberías, así como del fabricante escogido para estas, las tuberías consideradas son: la tubería de captación, la tubería de alimentación, la tubería de distribución y la tubería de rechazo de salmuera.

El material escogido para todas las tuberías supuestas es Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) ya que presenta una serie de ventajas importantes, son tuberías más ligeras en comparación con otros materiales y tienen una elevada resistencia mecánica y a la corrosión y por consiguiente una larga vida útil. Para seleccionar el fabricante se consulta la página web del Grupo Sectorial AseTUB (Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos); en esta página web se agrupa y representa a los fabricantes de tubos y accesorios plásticos en sus múltiples aplicaciones, de este modo se encuentran tres empresas que se dedican a la producción de los tubos requeridos. Tras el estudio de estas empresas se escoge la empresa Amiantit que trabaja con productos del fabricante Flowtite, el distribuidor líder a nivel mundial de tuberías de este material y generalmente, la alternativa con reducidos costes de operación y con menor coste global.

A continuación en la tabla 18, se muestran las dimensiones de cada tubería, es decir su longitud y su diámetro, los cuales han sido calculados previamente en función de los requisitos de cada una.

	Longitud (m)	Diámetro nominal (mm)
<b>Tubería de alimentación</b>	20	400
<b>Tubería de captación</b>	70	300
<b>Tubería de distribución</b>	1500	300
<b>Tubería de rechazo</b>	1550	300

Tabla 18: Dimensiones de las tuberías principales de la EDAM.

## 7.9 Aerogenerador

La EDAM está alimentada mediante aerogeneradores, este aerogenerador o aerogeneradores deben ser capaces de producir como mínimo un valor igual al consumo de la planta, el consumo de la planta se puede estimar como el sumatorio del consumo de las bombas principales de esta.

Consumo de la planta	Potencia (kW)
Bomba de alta presión	489
Bomba Booster	13,88
Bombas de captación	157,02
Bomba de distribución	38,89
<b>Potencia consumida total</b>	<b>698,79</b>

Tabla 19: Potencia consumida por la planta.

El consumo energético de la planta para diversos intervalos de tiempo se muestra en la siguiente tabla 20.

<b>Energía total en una hora</b>	698,79 kWh
<b>Energía total al día</b>	16770,96 kWh/día
<b>Energía total al año</b>	6121400,4 kWh/año

Tabla 20: Consumo energético de la planta.

### 7.9.1 Recurso eólico

Primeramente, se estudia las condiciones eólicas que se tienen en la ubicación de la EDAM, para ello se consulta la página web del Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). Se obtienen datos direccionales, en concreto: la frecuencia anual (porcentaje de horas que el viento sopla en una dirección), velocidad media (como una fracción de la velocidad media en todas las direcciones), potencia media y parámetros C y K de Weibull, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Dirección	Frecuencia (%)	Velocidad (m/s)	Potencia (%)	Weibull C (m/s)	Weibull K
N	4,24	7,882	7,03	9,054	2,195
NNE	15,08	8,466	26,46	9,287	2,246
NE	31,22	8,167	43,95	8,908	2,562
ENE	21,39	6,461	15,69	7,079	2,416
E	8,73	3,977	1,43	4,374	2,645
ESE	4,47	3,287	0,41	3,638	2,729
SE	2,73	2,749	0,16	3,018	2,253
SSE	1,91	2,543	0,1	2,88	2,34
S	1,39	2,696	0,08	3,018	2,261
SSW	1,23	3,101	0,13	3,477	1,963
SW	1,08	4,037	0,28	4,469	1,754
WSW	1,52	5,272	0,9	5,817	1,694
W	2,07	6,872	2	7,538	2,161
WNW	1,68	6,089	1,27	6,751	1,98
NW	0,67	3,101	0,06	3,346	1,993
NNW	0,6	2,55	0,04	2,843	1,84

Tabla 21: Datos eólicos a 80 m en punto más cercano a la EDAM. (Fuente: IDAE)

A partir de estos datos se construye un diagrama de coordenadas polares, rosa de los vientos, en este se representa la frecuencia con la que sopla el viento en cada dirección y la velocidad que predomina en cada una de ellas, a través de este estudio se puede determinar la orientación más adecuada para los aerogeneradores. En este caso, es la dirección Noreste, es la dirección de aprovechamiento óptimo del recurso eólico hacia donde se orienta el aerogenerador.

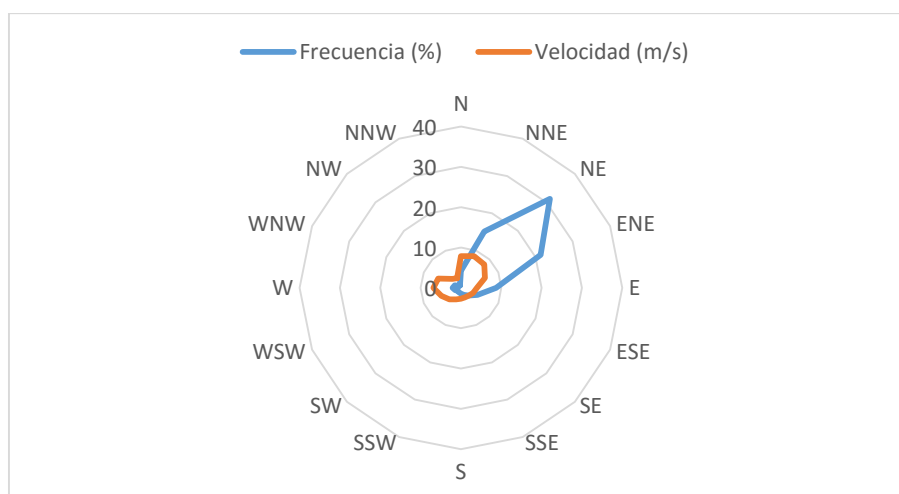


Figura 48: Rosa de los vientos de frecuencias y velocidades en la ubicación de la EDAM.

Además se estudia la distribución de probabilidades, es decir, la probabilidad de que la velocidad esté en un rango determinado de velocidades, se hace a través de la distribución de Weibull  $f(v)$  y en este caso para facilitar los cálculos se realiza mediante una hoja Excel. La figura 49 representa gráficamente la distribución de velocidades, como se puede observar los vientos que se generan con mayor frecuencia en este punto tienen una velocidad de 2 m/s aproximadamente.

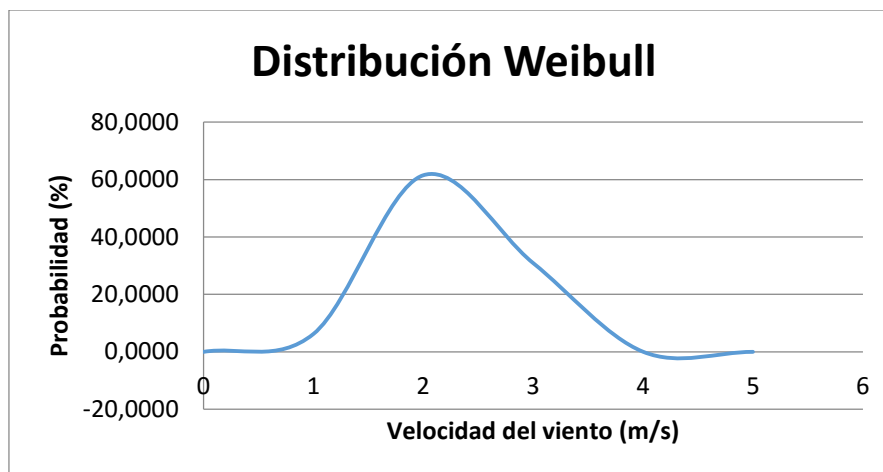


Figura 49: Distribución de velocidades.

### 7.9.2 Selección del aerogenerador

Para la selección del aerogenerador se utiliza la herramienta web proporcionada por el Instituto Tecnológico de Canarias, a través de ella se puede conocer la energía anual estimada producida por los diferentes aerogeneradores que tiene en su base de datos mediante sus curvas de potencia. Actualmente no todos los modelos de aerogeneradores que ofrece la herramienta del ITC están disponibles, por eso se consulta la página web The Wind Power, una base de datos mundial sobre turbinas eólicas y parques eólicos mediante la cual es posible detectar que modelos que aparecen en la página del ITC son modelos antiguos o en baja producción y cuales se fabrican en la actualidad.

Fabricante	Modelo
Enercon	E101/3050
	E48/800
	E82/2000
	E70/2300
Gamesa	G80/2000
	G87/2000
	G90/2000
Nordex	N90/2500
Siemens	SWT-3.0-101
Turbowind	T600-48
Vestas	V90/2000
	V90/3000

Tabla 22: Modelos actuales de aerogeneradores. (Fuente: The Wind Power)

Una vez conocidos los modelos actuales de aerogeneradores se estudian estos mediante la aplicación del ITC para conocer la energía anual estimada que son capaces de generar a una altura de 80 m, los resultados para cada uno de ellos se muestran en esta tabla.

Fabricante	Modelo	Energía anual estimada (kWh)
Enercon	E101/3050	10385514,6
	E48/800	2564163,7
	E82/2000	7002223,6
	E70/2300	6144865,4
Gamesa	G80/2000	6130380,5
	G87/2000	6849948,6
	G90/2000	7150779,1
Nordex	N90/2500	7797926,4
Siemens	SWT-3.0-101	9994897,3
Turbowind	T600-48	1963741,8
Vestas	V90/2000	7112866
	V90/3000	8396890,1

Tabla 23: Energía anual estimada para los distintos aerogeneradores estudiados. (Fuente: ITC)

Por tanto, los aerogeneradores cuya producción se ajusta mejor al consumo de la planta son el modelo G80/2000 de la marca Gamesa y el modelo E70/2300 de la marca Enercon, ya que la energía consumida por la planta anualmente es 6121,4 MWh.

Para elegir entre estas dos opciones, se estudia un segundo criterio, el factor de carga, que es el cociente entre la energía real generada durante un período, generalmente anual y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante ese mismo período, conforme a los valores nominales de los equipos, es un indicador de la utilización de la capacidad de la planta en el tiempo, en función del valor de este factor se puede clasificar el comportamiento de un aerogenerador, este criterio de calificación se muestra en la siguiente tabla.

Factor de carga	Calificación
Menor al 20%	Inaceptable
Entre 20%-25%	Aceptable
Entre 25%-30%	Bueno
Entre 30%-40%	Muy bueno
Entre 40%-50%	Excelente
Mayor al 50%	Extraordinario

Tabla 24: Criterio de calificación según el factor de carga.

El factor de carga para los dos modelos de aerogeneradores anteriores, Gamesa G80/2000 y Enercon E70/2300 son, 34,99 % y 30,5 % respectivamente, por lo que el aerogenerador seleccionado para abastecer a la EDAM es el modelo G80/2000 de la marca Gamesa.

### 7.10 Aprovechamiento de energía

Por último se estudian las alternativas de aprovechamiento de energía que se consideran más factibles, este estudio es tan solo una primera aproximación, en el caso de elegir alguna de las iniciativas se deberá realizar un análisis más exhaustivo; para esto se debe conocer la energía disponible para este aprovechamiento.



	Energía consumida por la planta	Energía producida por el aerogenerador	Energía sobrante
Por hora (kWh)	698,79	699,82	1,03
Por día (kWh/día)	16770,96	16795,56	24,6
Por año (kWh/año)	6121400,4	6130380,5	8980,1

Tabla 25: Balance energético del sistema.

### 7.10.1 Sistema de generación de hidrógeno

Un método para acumular la energía eléctrica consiste en transformarla en hidrógeno. La energía eléctrica que se desea almacenar se deriva hacia un electrolizador, en este se descompone el agua en sus dos componentes: hidrógeno (H<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>). El hidrógeno adquirido se comprime para facilitar su almacenamiento hasta el momento en el que deba emplearse, por otra parte, el oxígeno se libera a la atmósfera, ya que no tiene contenido energético en este proceso.

En este caso, se ha decidido liberar a la atmósfera el oxígeno producido, pero si se deseara se podría realizar un estudio de la demanda de oxígeno y de su posibilidad de aprovechamiento ya que este tiene diversos usos tales como:

- Atención sanitaria.
- Soldadura y corte.
- Tratamiento de aguas.
- Industria farmacéutica y biotecnología.
- Producción de metales ferrosos y no ferrosos.
- Aplicaciones aeroespaciales y aeronáuticas.

#### Electrolizadores

Los tipos de electrolizadores tradicionales que se encuentran en el mercado son los electrolizadores alcalinos y de membrana polimérica (PEM), aunque también existen otras técnicas como la electrólisis de bromuro de hidrógeno, la electrólisis de vapor o la fotoelectrólisis pero que no están muy desarrolladas aun.

Los electrolizadores alcalinos utilizan una disolución acuosa de NaOH o de KOH con la finalidad de que exista una conductividad iónica alta, su efectividad ha llegado a alcanzar el 80 % y se suelen usar a gran escala ya que esta tecnología funciona bien en esta magnitud; en cambio, los electrolizadores PEM utilizan una membrana polimérica que hace las funciones de electrolito, su efectividad puede ser bastante elevada, en torno al 94% y actualmente son ideales para aplicaciones de pequeña o mediana escala como pueden ser la alimentación de vehículos o sistemas de energías renovables donde el suministro de energía es variable.

Por tanto, ante esta información, de forma clara se puede establecer que en esta aplicación la mejor opción es utilizar electrolizadores tipo PEM. El fabricante Quintech ofrece diversos modelos de este tipo de electrolizadores, el que mejor se adecua a las necesidades de este sistema es el electrolizador QT-HG-3000.

Una vez obtenido el hidrógeno las opciones que se plantean son volver a producir electricidad mediante pilas de combustible o el comercio de este.

### Pilas de combustible

Cuando exista la necesidad de generar electricidad, el hidrógeno almacenado se utiliza como carburante en pilas de combustible, este proceso se puede esquematizar de forma similar a la figura 50, donde el motor de hidrógeno y generador son la pila de combustible.

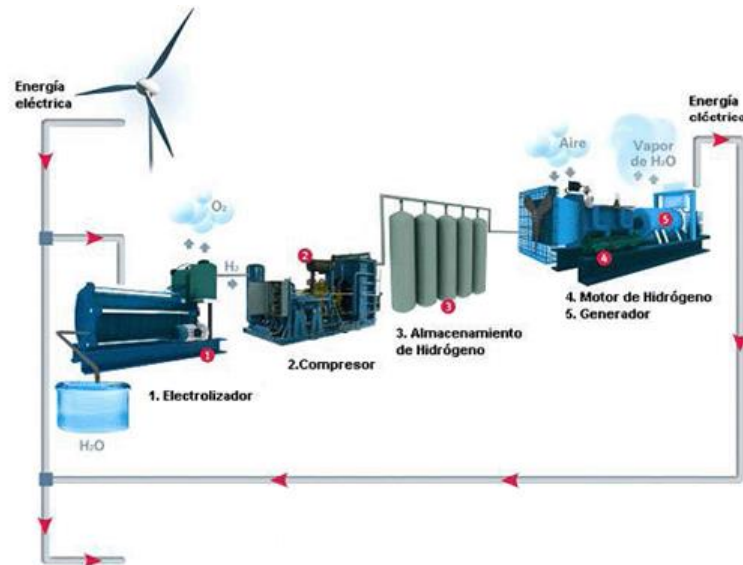


Figura 50: Sistema de generación y acumulación de hidrógeno y producción de energía.

Existen diversos tipos de pilas de combustibles los cuales dependen de sus electrolitos y aplicaciones, aunque el principio básico de funcionamiento es igual para cada una de ellas, a continuación se muestran dos tablas (tablas 26 y 27) con las características, ventajas, desventajas y aplicaciones de estas.

Una vez estudiados los diferentes ejemplares de pilas de combustible que existen actualmente se concluye que para este proyecto la que mejor encaja con las necesidades son las pilas de membrana de intercambio protónico ya que pueden variar rápidamente su producción para satisfacer la demanda de energía.

Tras el estudio de diversos fabricantes, una pila apta para este proyecto podría ser la pila Jupiter del productor Quintech ya que su potencia entra dentro del rango que se necesita, los datos técnicos de esta pila se encuentra en la tabla 28.

<b>Tipos de pilas</b>	<b>Electrolito</b>	<b>Potencia</b>	<b>Temperatura</b>
<b>Combustible de ácido fosfórico (PAFC)</b>	Ácido fosfórico en una matriz porosa	200 kW o superior	150-200 °C
<b>Membrana de intercambio de protones (PEM)</b>	Polímero de membrana	50 a 250 kW	50-120 °C
<b>Combustible alcalinas (AFC)</b>	Solución alcalina de hidróxido de potasio	0,3 a 5 kW	150-200 °C
<b>Combustible de óxido sólido (SOFC)</b>	Óxido de circonio sólido o material cerámico	Por célula 100 kW (pueden alcanzar potencias muy altas)	Hasta casi 1000 °C
<b>Combustible de mezcla de carbonatos (MCFC)</b>	Solución líquida de litio y carbonatos (sódicos y potásicos) contenidos en una estructura porosa.	10 kW a 2 MW	600-700 °C
<b>Combustible de metanol (DMFC)</b>	Utilizan membrana pero el electrolito es metanol.	Baja o media potencia.	50-100 °C

**Tabla 26: Características de los distintos tipos de pilas de combustibles.**

<b>Tipos de pilas</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b>Combustible de ácido fosfórico</b>	Funciona con H <sub>2</sub> impuro. Tecnología estudiada e implantada.	Utiliza platino como catalizador (coste elevado). Producen intensidad y potencias inferiores a otras pilas.	Estaciones de producción de energía en hoteles, hospitales, edificios
<b>Membrana de intercambio de protones</b>	Se adaptan muy bien a los cambios en la demanda de producción. Pocos problemas de corrosión.	Necesita alimentarse de combustibles con muy pocas impurezas.	Alimentación de vehículos. Estaciones de producción de energía.
<b>Combustible alcalinas</b>	Elevada eficiencia.	Elevado coste. Uso comercial poco extendido.	Misiones espaciales. Fuente de energía portátil.
<b>Combustible de óxido sólido</b>	Eficiencias muy altas, superiores aun cuando se emplean en sistemas de cogeneración.	Están en fase de desarrollo.	Aplicaciones industriales de grandes potencias. Automóviles.
<b>Combustible de mezcla de carbonatos</b>	Se pueden emplear varios combustibles. Buen rendimiento.	Se pueden ocasionar problemas en materiales (corrosión).	Instalaciones medianas o grandes de producción de energía.
<b>Combustible de metanol</b>	No necesitan que el combustible pase por el reformador.	Aún están en desarrollo.	Alimentación de dispositivos electrónicos.

**Tabla 27: Ventajas, inconvenientes y aplicaciones de los distintos tipos de pilas de combustible.**

<b>Fuel cell type:</b>	PEM
<b>Nominal voltage:</b>	48,0 VDC
<b>Voltage range:</b>	40,5 VDC to 57,0 VDC
<b>Max. power:</b>	up to 50 kW peak
<b>Nominal current:</b>	up to 1000 A
<b>Response time:</b>	uninterrupted
<b>Energy storage:</b>	customer specific
<b>Fuel:</b>	hydrogen 99,9%
<b>Fuel consumption:</b>	11 slpm/kW
<b>Hydrogen supply pressure:</b>	10 bar
<b>Cooling:</b>	air
<b>Environmental temperature:</b>	0 °C to 45 °C
<b>Operating life:</b>	> 3000 h
<b>Max. altitude:</b>	4000 m
<b>Service interface:</b>	Ethernet, Modem
<b>Standards:</b>	designed to meet ETSI 300 019-1-3 class, ETSI 300 132-2
<b>Certification:</b>	EC-2
<b>Certification:</b>	CE
<b>Rectifier:</b>	optional
<b>Inverter:</b>	optional
<b>Smart grid functionality:</b>	optional
<b>Off grid functionality:</b>	optional
<b>Outdoor configuration:</b>	optional

Tabla 28: Datos técnicos pila de combustible Jupiter (Fuente: Quintech)

Esta alternativa de aprovechamiento de energía no parece viable ya que la inversión que resultaría de implantar el sistema de generación de hidrógeno, almacenamiento y producción de electricidad es muy elevada en relación con la cantidad de energía que se quiere aprovechar. Según el Centro Nacional de Energías Renovables el coste del electrolizador ronda entre 300-1100 \$/kW, es decir hasta 1000 €/kW aproximadamente, y esto solo supone una parte del sistema completo.

### Comercio del hidrógeno

En cuanto al uso del hidrógeno como tal, y a pesar de que son varias las aplicaciones que puede tener este tanto en la industria química, petrolífera o automovilística como en otras aplicaciones, a nivel nacional la situación actual del hidrógeno no está muy desarrollada, existen diversos grupos consolidados en mayor o menor medida de investigación básica y también varios proyectos interesantes, pero son pocas las infraestructuras reales y hay pocas empresas que desarrollen productos relacionados con la tecnología del hidrógeno; particularmente en Canarias, solo existe un vehículo en circulación que use hidrógeno como combustible según el Instituto Canario de Estadística.

#### 7.10.2 Conexión a la red eléctrica

La otra alternativa que se presenta es verter a la red eléctrica la energía sobrante, y cobrar estos vertidos en el caso de que fuese posible. Las condiciones técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo se regulan en el Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, pero cada comunidad autónoma, en el ámbito de sus competencias, tiene sus propias normas para adaptar e implementar su aplicación; por lo que para determinar la viabilidad de esta alternativa se debe hacer un estudio de estas normas.

## 8. Resultados finales

En este penúltimo apartado de la memoria se describe las características definitorias de la planta de desalación de agua de mar alimentada mediante energía eólica.

### 8.1 Ubicación y finalidad de la planta

La EDAM estará ubicada en el polígono industrial de Granadilla de Abona, este emplazamiento ha sido elegido ya que cumple con las condiciones de previsión de necesidades hídricas y de existencia de recurso eólico suficiente.

El caudal de agua producido será de 5000 m<sup>3</sup>/día los cuales se destinan para el abastecimiento de consumo humano.

### 8.2 Sistema de desalación

#### 8.2.1 Captación de agua

La captación del agua de mar se realiza mediante captación cerrada, a través de tres pozos, de 55 m de profundidad, dos de ellos trabajando de manera continua y el tercero de reserva, en cada pozo se coloca una bomba sumergible.

#### 8.2.2 Núcleo de desalación

##### *Pretratamiento*

Para el pretratamiento físico del agua en esta planta se utilizan filtros de arena como primer paso y filtros de cartucho en segundo lugar. Existen diversos fabricantes de estos filtros, algunos tales como: Lenntech, 3M, Pure Aqua, etc. Para un completo dimensionado de esta fase se debería elegir el modelo de cartuchos adecuado y la cantidad de estos, lo cual dependerá de las exigencias del fabricante de las membranas.

En el caso del pretratamiento químico, en primer lugar se efectúa una corrección del pH para ajustarlo a las necesidades del tratamiento, esto se realiza mediante la dosificación de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) con una concentración del 100% antes del filtro de cartucho, además, se debe controlar otros parámetros del agua por lo que se podría hacer necesario recurrir a un dispersante, a la dosificación de coagulantes o de antiincrustantes, estos productos químicos son ofertados por diversos fabricantes como los nombrados en el pretratamiento físico.

##### *Bastidor de ósmosis inversa*

Para esta EDAM se ha optado por un diseño de instalación de simple etapa formado por un bastidor de membranas con 51 tubos de presión y en cada uno de los tubos 6 membranas. El modelo de membranas es SWC4 MAX del fabricante Hydranautics.

##### *Recuperador de energía*

La recuperación de energía en este proyecto se realizará mediante intercambiador de presión, el sistema contará con cinco unidades de intercambiadores de presión del modelo PX-Q300 del fabricante Energy Recovery.

### *Bombas principales*

La bomba de alta presión escogida es el modelo MSD 4x6x10.5C, una bomba multietapa de cámara partida axialmente del fabricante Sulzer, la bomba Booster escogida es una bomba de carcasa horizontal, el modelo Etanorm 150-125-250 del fabricante KSB, la bomba de distribución escogida es el modelo A21-80 O del fabricante Sulzer y las bombas de captación son bombas sumergibles del modelo SJT-11LC del fabricante Sulzer.

### *Postratamiento*

Con el fin de elevar el pH del agua para que sea apta para consumo humano se considera adecuada la opción de mezclar el agua producto con otras aguas, donde el agua desalada suponga al menos un 10% de la composición.

### *Rechazo de salmuera*

Para realizar el rechazo de la salmuera se considera necesaria la colocación de un emisario submarino en la isobata -11 suficientemente alejada de la costa, el trasvase de agua se realiza debido a la diferencia de cota.

## 8.3 Aerogenerador

El aerogenerador seleccionado para abastecer a la EDAM es el modelo G80/2000 de la marca Gamesa, este deberá estar orientado en la dirección Noreste, dirección de aprovechamiento óptimo del recurso eólico.

## 8.4 Sistema de aprovechamiento de energía

### 8.4.1 Electrolizador

El fabricante Quintech ofrece diversos modelos de electrolizadores, el que mejor se podría adecuar a las necesidades de este sistema es el modelo QT-HG-3000 que es un electrolizador tipo PEM.

### 8.4.2 Pila de combustible

Tras el estudio de diversos fabricantes, una pila apta para este proyecto podría ser la pila tipo PEM Jupiter del productor Quintech

## 9. Conclusiones

La combinación de desalación con energías renovables surge ante la próxima era de escasez de agua y de petróleo insuficiente y con elevado costo. Tanto el agua de mar como las energías renovables son recursos ilimitados por lo que la integración de ambas materias hace que sea una solución sostenible y respetuosa con el medio ambiente que podría resolver los problemas de recursos hídricos mundiales. En cambio, pese a sus grandes ventajas, es una combinación que actualmente es cuando se está empezando a utilizar con más frecuencia y aún queda un camino largo de investigación e implantación para que su utilización sea algo habitual; una tecnología que puede conseguir que la desalación sea más efectiva es la producción de hidrógeno para utilizarlo como acumulación de energía, lo que aún necesita de un mayor desarrollo.

Con la realización de este proyecto se ha conseguido poner de manifiesto los conocimientos y competencias adquiridas durante los cuatro cursos de la titulación. Especialmente se ha hecho demostración de las capacidades adquiridas en la mecánica de

fluidos, además de conocimientos de otras competencias como oficina técnica, instalaciones y máquinas hidráulicas, manejo e interpretación de normativa, búsqueda de información, toma de decisiones, manejo de softwares y aplicaciones informáticas, etc. Asimismo con la elaboración de este proyecto se ha experimentado de forma aproximada la realización de un proyecto técnico a nivel profesional.

### 9.1 Conclusions

The combination of desalination with renewable energies arises in the face of the next era of water scarcity and insufficient oil and high cost. Both seawater and renewable energies are unlimited resources, so the integration of both materials makes it a sustainable and environmentally friendly solution that could solve the problems of global water resources. However, in spite of its great advantages, it is a combination that is currently when it is beginning to be used more frequently and there is still a long way of investigation and implantation so that its use is something habitual; one technology that can make desalination more effective is the production of hydrogen to be used as an accumulation of energy, which still needs further development.

With the realization of this project has been able to demonstrate the knowledge and skills acquired during the four courses of the degree. Especially has demonstrated the capabilities acquired in the mechanics of fluids, as well as knowledge of other skills such as technical office, hydraulic installations and machines, management and interpretation of regulations, Information search, decision making, Management of software and computer applications... Likewise, with the preparation of this project, a technical project has been practiced at a professional level.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

# ANEXOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN Y DE PRODUCCIÓN DE  
HIDRÓGENO ALIMENTADO MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Antonia Nazaret Izquierdo Hernández

Tutor: Vicente José Romero Ternero





## ÍNDICE

1. Dimensionado del sistema de desalación .....	8
1.1 Dimensionado del bastidor de membranas .....	8
1.1.1 Datos de agua de mar .....	8
1.1.2 Software de dimensionado de membranas .....	10
1.2 Dimensionado del intercambiador de presión.....	14
1.3 Dimensionado de las tuberías .....	16
1.3.1 Elección del material .....	16
1.3.2 Elección de la longitud .....	17
1.3.3 Elección del diámetro.....	22
1.3.4 Cálculo de las pérdidas de carga .....	23
1.4 Dimensionado de las bombas del sistema .....	27
1.4.1 Bomba de alta presión .....	27
1.4.2 Bomba Booster .....	31
1.4.3 Bombas de captación .....	34
1.4.4 Bomba de distribución .....	37
1.4.5 Bomba de rechazo.....	39
1.4.6 Resumen de bombas principales del proceso.....	39
1.5 Dimensionado del pretratamiento.....	39
1.5.1 Pretratamiento físico.....	40
1.5.2 Pretratamiento químico .....	40
1.6 Dimensionado del postratamiento .....	41
1.7 Dimensionado del consumo energético de la planta.....	41
2. Dimensionado del sistema eólico.....	44
2.1 Recurso eólico .....	44
2.2 Selección del aerogenerador.....	47
3. Aprovechamiento de energía.....	53
3.1 Balance energético.....	53
3.2 Sistema de generación y acumulación de energía en forma de hidrógeno.....	53
3.2.1 Electrolizadores .....	53
3.2.2 Pilas de combustible.....	54

## Índice de figuras

Figura 1: Mapa de consulta de datos oceanográficos (Fuente: Puertos de Estado).....	9
Figura 2: Ventana de configuración software IMSDesign. ....	10
Figura 3: Ventana de análisis software IMSDesign. ....	11
Figura 4: Ventana de diseño software IMSDesign. ....	12
Figura 5: Especificación del sistema en software IMSDesign.....	12
Figura 6: Resultados de cálculo (primera iteración del intercambiador de presión).....	13
Figura 7: Diagrama de flujo software IMSDesign (primera iteración). ....	13
Figura 8: Esquema de la instalación con datos de primera iteración en hoja Excel del intercambiador.....	14
Figura 9: Datos del intercambiador en primera iteración.....	14
Figura 10: Datos del intercambiador en la segunda iteración. ....	15
Figura 11: Resultados de cálculo (segunda iteración del intercambiador).....	15
Figura 12: Diagrama de flujo (segunda iteración).....	16
Figura 13: Buscador de empresas en función del producto y aplicación requerida. ....	17
Figura 14: Diámetros nominales de tuberías PRFV del fabricante Flowtite. ....	17
Figura 15: Estadísticas de bajamares y pleamares. (Fuente: REDMAR).....	18
Figura 16: Elevación del terreno entre la parcela y el nivel del mar.....	18
Figura 17: Esquema simple de tuberías de captación y alimentación. ....	19
Figura 18: Introducción de coordenadas del depósito en herramienta web Pixelis Maps.....	20
Figura 19: Ubicación del depósito en mapa mediante herramienta web Pixelis Maps.....	20
Figura 20: Imagen del depósito de abastecimiento. (Fuente: Google Maps).....	20
Figura 21: Distancia del depósito a la EDAM (Fuente: Goolzoom). ....	21
Figura 22: Diferencia de altura del depósito a la EDAM (Fuente: Goolzoom). ....	21
Figura 23: Distancia de tubería de rechazo (Fuente: ArcGIS) ....	22
Figura 24: Coeficientes de pérdidas de carga para diversos accesorios (Fuente: Agüera Soriano) .....	25
Figura 25: Curvas características de la bomba de alta presión proporcionadas por KSB. ....	28
Figura 26: Curvas características de la bomba de alta presión proporcionadas por Sulzer. ....	29
Figura 27: Curvas características de la bomba de alta presión proporcionadas por Lowara. ....	30
Figura 28: Bomba alta presión multietapa de cámara partida axialmente MSD. (Fuente: Sulzer). .....	31
Figura 29: Curvas características de la bomba Booster proporcionadas por KSB. ....	32
Figura 30: Curvas características de la bomba Booster proporcionadas por Sulzer.....	32
Figura 31: Curvas características de la bomba Booster proporcionadas por Lowara.....	33
Figura 32: Bomba booster de carcasa horizontal. (Fuente: KSB). ....	34
Figura 33: Curvas características de las bombas de captación proporcionadas por KSB. ....	35
Figura 34: Curvas características de las bombas de captación proporcionadas por Sulzer.....	35
Figura 35: Curvas características de las bombas de captación proporcionadas por Lowara.....	36
Figura 36: Curvas características de la bomba de distribución proporcionadas por KSB. ....	37
Figura 37: Curvas características de la bomba de distribución proporcionadas por Sulzer. ....	38
Figura 38: Curvas características de la bomba de distribución proporcionadas por Lowara. ....	38
Figura 39: Datos eólicos a 80 m en punto más cercano a la EDAM. (Fuente: IDAE).....	44
Figura 40: Rosa de los vientos de frecuencias y velocidades en la ubicación de la EDAM. ....	45
Figura 41: Distribución de velocidades. ....	46
Figura 42: Herramienta web para la selección del aerogenerador ofrecida por ITC.....	47
Figura 43: Curva de potencia del aerogenerador seleccionado (Fuente: Gamesa).....	49
Figura 44: Datos técnicos pila de combustible Jupiter (Fuente: Quintech) .....	55

## Índice de tablas

Tabla 1: Valores límites para el agua de abastecimiento.....	8
Tabla 2: Temperatura media mensual año 2014 (Fuente: Puertos del Estado). ....	9
Tabla 3: Composición química del agua de mar a tratar (Fuente: LABAQUA).....	10
Tabla 4: Consideraciones para la profundidad de los pozos.....	18
Tabla 5: Datos del depósito de abastecimiento escogido (Fuente: PHT).....	19
Tabla 6: Diámetros mínimos y nominales de las tuberías.....	22
Tabla 7: Iteración para obtener el factor de fricción de la tubería de alimentación. ....	24
Tabla 8: Resumen de datos necesarios para calcular las pérdidas de carga (tubería de alimentación). ....	24
Tabla 9: Iteración para obtener el factor de fricción de la tubería de captación. ....	24
Tabla 10: Resumen de datos necesarios para calcular las pérdidas de carga (tubería de captación).....	24
Tabla 11: Pérdidas de carga totales en el sistema de captación y alimentación. ....	25
Tabla 12: Iteración para obtener el factor de fricción de la tubería de distribución. ....	26
Tabla 13: Resumen de datos necesarios para calcular las pérdidas de carga (tubería de distribución) .....	26
Tabla 14: Pérdidas de carga totales en el sistema de distribución. ....	26
Tabla 15: Iteración para obtener el factor de fricción de la tubería de rechazo. ....	26
Tabla 16: Resumen de datos necesarios para calcular las pérdidas de carga (tubería de rechazo) .....	27
Tabla 17: Pérdidas de carga totales en el sistema de rechazo.....	27
Tabla 18: Datos significativos de las bombas de alta presión consideradas.....	28
Tabla 19: Datos de bomba de alta presión seleccionada.....	31
Tabla 20: Datos significativos de las bombas Booster consideradas. ....	31
Tabla 21: Datos de bomba Booster seleccionada. ....	33
Tabla 22: Datos significativos de las bombas de captación consideradas. ....	34
Tabla 23: Datos de bombas de captación seleccionadas.....	36
Tabla 24: Datos significativos de las bombas de distribución consideradas.....	37
Tabla 25: Datos de bomba de distribución seleccionada.....	39
Tabla 26: Cuadro resumen bombas principales de la instalación.....	39
Tabla 27: Potencia consumida por la planta. ....	41
Tabla 28: Consumo energético de la planta.....	41
Tabla 29: Consumo específico de la planta.....	41
Tabla 30: Datos eólicos a 80 m en punto más cercano a la EDAM. (Fuente: IDAE).....	45
Tabla 31: Frecuencias de velocidades según Weibull y horas al año que ocurren esas velocidades.....	46
Tabla 32: Coordenadas UTM de la EDAM. ....	47
Tabla 33: Modelos actuales de aerogeneradores. (Fuente: The Wind Power) .....	47
Tabla 34: Energía anual estimada para los distintos aerogeneradores estudiados. (Fuente: ITC) .....	48
Tabla 35: Criterio de calificación según el factor de carga.....	48
Tabla 36: Producción anual, potencia nominal, factor de carga y calificación de los aerogeneradores estudiados. ....	49
Tabla 37: Datos del aerogenerador seleccionado (Fuente: Gamesa). ....	50
Tabla 38: Balance energético del sistema.....	53
Tabla 39: Modelos de electrolizadores ofrecidos por Quitech. ....	54
Tabla 40: Resultados de la búsqueda de pilas de combustible comerciales. ....	54

# ANEXO I

## Dimensionado del sistema de desalación



## 1. Dimensionado del sistema de desalación

En este anexo se detalla el procedimiento que se ha utilizado para dimensionar los equipos y tuberías principales de la planta desaladora de agua, estos son: el bastidor de membranas, el sistema de recuperación de energía, las tuberías principales y las bombas relevantes tales como la bomba de alta presión, la bomba de recirculación, las bombas de captación y la bomba de distribución; en el sistema se necesitan más bombas, como pueden ser bombas para los productos de limpieza, pero estas son consideradas de segundo orden de importancia en cuanto al consumo de la planta y no se realiza su dimensionado.

Con este proceso de desalación se pretende obtener un permeado que cumpla con los requisitos de diseño del proyecto y con la normativa vigente. El real decreto 140/2003 contempla los límites establecidos para el agua de consumo humano, en el siguiente cuadro se resumen las características físico-químicas y relativas a sustancias no deseables en el agua potable.

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

Tabla 1: Valores límites para el agua de abastecimiento.

### 1.1 Dimensionado del bastidor de membranas

#### 1.1.1 Datos de agua de mar

Para comenzar con el dimensionado de las membranas se debe conocer las características del agua a tratar ya que son datos relevantes que afectan a la elección de estas.

La temperatura a la que se encuentra el agua en la zona de captación es un dato necesario por lo que se consulta la base de datos de la página web de Puertos del Estado. En la isla de Tenerife existen dos puntos de mediciones de datos, la boya de Santa Cruz de Tenerife y la de Tenerife Sur, esta última es la que más cercanía presenta de la EDAM pero los datos de temperatura del agua no están disponibles en la página web por lo que se toman como válidos los datos de temperatura de la boya de Santa Cruz, sabiendo que la variación de temperatura de un punto a otro no es excesiva.



Figura 1: Mapa de consulta de datos oceanográficos (Fuente: Puertos de Estado).

En la siguiente tabla se muestra la temperatura media mensual del agua del año 2014, que son los datos más recientes que se obtienen mediante esta aplicación.

<b>Enero</b>	19,64
<b>Febrero</b>	18,57
<b>Marzo</b>	18,00
<b>Abril</b>	18,92
<b>Mayo</b>	19,7
<b>Junio</b>	20,8
<b>Julio</b>	22,41
<b>Agosto</b>	23,42
<b>Septiembre</b>	24,9
<b>Octubre</b>	24,38
<b>Noviembre</b>	23,42
<b>Diciembre</b>	21,2

Tabla 2: Temperatura media mensual año 2014 (Fuente: Puertos del Estado).

La temperatura promedio en este año es de 21,28°C, por lo que, aproximando, la temperatura que se utilizará para los cálculos es 21°C.

En cuanto a la composición química del agua de la zona se obtienen datos de un análisis químico de agua del laboratorio LABAQUA realizado a una muestra expedida por la planta desaladora de Santa Cruz de Tenerife. A parte de la composición química, el análisis también aporta los valores de pH, de conductividad y de sólidos en suspensión.

<b>Composición química</b>	<b>mg/L</b>
<b>Calcio (Ca)</b>	431
<b>Magnesio (Mg)</b>	1470
<b>Potasio (K)</b>	451
<b>Sílice (Si)</b>	1,1
<b>Sodio (Na)</b>	11870
<b>Bromo (Br)</b>	0,5
<b>Bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	141,5
<b>Cloruros (Cl<sup>-</sup>)</b>	21280
<b>Fluoruros (F<sup>-</sup>)</b>	0,862
<b>Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	0,7



<b>Sulfatos (SO42-)</b>	3148
<b>Bario (Ba)</b>	0,017
<b>Boro (B)</b>	5,23
<b>Cobalto (Co)</b>	0,002
<b>Cobre (Cu)</b>	0,002
<b>Cromo (Cr)</b>	0,006
<b>Estroncio (Sr)</b>	10
<b>Hierro (Fe)</b>	0,025
<b>Manganeso (Mn)</b>	0,003
<b>Parámetros físico-químicos</b>	
<b>Conductividad a 25°C (µS/cm)</b>	54767
<b>pH</b>	8
<b>Sólidos en suspensión (SDI) (mg/L)</b>	4

Tabla 3: Composición química del agua de mar a tratar (Fuente: LABAQUA).

### 1.1.2 Software de dimensionado de membranas

El software de dimensionado de membranas escogido es IMSDesign de la empresa Hydranautics, la cual pertenece a Nitto Group Company, esta elección es debida a que este grupo es uno de los líderes mundiales en tecnología de membranas; desde 1970 operan en el campo de la membrana de ósmosis inversa y actualmente es una de las compañías con más experiencia en la industria.

Para empezar a trabajar con este software, en primer lugar, se selecciona el idioma y las unidades con las que se quiere trabajar y luego en la primera ventana, se establecen los parámetros de entrada que requiere el programa, estos son los datos del análisis químico, pH y de temperatura anteriores, así como el nombre del proyecto y el modo de captación de agua, la cual se realiza a través de pozos, como se ha debatido en el apartado de Análisis de Soluciones.



Figura 2: Ventana de configuración software IMSDesign.

Cationes		Aniones	
	mg/l	mg/l	CaCO3
Ca	431,00	1077,50	
Mg	1470,00	6024,59	
Na	11870,00	25804,35	
K	451,00	576,76	
NH4	0,00	0,00	
Ba	0,017	0,01	
Sr	10,000	11,41	
Total, meq/l		669,89	

	mg/l	mg/l	CaCO3
HCO3	141,50	115,98	
SO4	3148,00	3279,17	
Cl	21280,00	30014,10	
F	0,86	2,26	
NO3	0,70	0,56	
PO4	0,00	0,00	
SiO2	1,10		
B	5,23		
Total, meq/l		668,71	

Saturaciones	
TDS Calculado	38823 mg/l
Presión osmótica	27,9 bar
Ca3(PO4)2 SI	0,00
CCPP	33,51 mg/l
CaSO4	24,4 %
BaSO4	72,4 %
SrSO4	35,2 %
CaF2	14,2 %
Silica	0,8 %

Figura 3: Ventana de análisis software IMSDesign.

Seguidamente en la ventana de diseño se debe especificar el caudal de permeado necesario, en este proyecto se establece en 5000 m<sup>3</sup>/día, al definir este caudal el programa calculará la cuantía que será necesario extraer, mayor en cualquier caso que el permeado para sufragar las pérdidas, además de la presión a la que se debe trabajar.

El agua se somete a un pretratamiento de acidificación, entre otras cosas para evitar la precipitación de carbonato cálcico, ya que la disminución del pH aumenta la solubilidad de esta sal. Según este software, el ajuste del pH de alimentación se puede realizar mediante dos compuestos: ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) o ácido clorhídrico (HCl), y los valores aceptables de pH que no interfieran en la estabilidad de las membranas están en torno a 6,5-7, por lo que en este caso se decide que el pH se modifica a 7 con ácido sulfúrico cuya concentración es 100%.

El factor de conversión es la relación del caudal que puede desalarse a partir de un determinado caudal de alimentación, esta relación puede variarse pero dentro de unos límites muy concretos; cuanto mayor es el recobro o conversión más se aprovecha el agua a tratar pero también supone una mayor explotación de las membranas las cuales pueden llegar a obstruirse. En este caso, el factor de conversión se establece en un 45%, ya que para instalaciones desaladoras de agua de mar de una sola etapa recuperaciones de este porcentaje se consideran satisfactorias según la bibliografía consultada.

Por lo general, la edad de las membranas que se tiene en cuenta para dimensionarlas suele establecerse entre 3 y 5 años, aunque según un informe realizado por la empresa Acuamed la vida media que suelen tener estas está entre 5 y 8 años; esto depende de la calidad del agua de alimentación y del mantenimiento que se le realice a estas ya que se conseguirá aumentar su vida útil sin tener que llevar a cabo operaciones como la sustitución, lo que supondría una carga económica. Para este proyecto, se toma 3 años como edad de las membranas.

Habitualmente las pérdidas de caudal se consideran variables dependiendo del tipo de agua que se utilice, el coeficiente de disminución de flujo por año suele estar comprendido entre un 4,5 y un 8,5%, en este caso se utiliza un 5%.

En cuanto al coeficiente de ensuciamiento, es un parámetro que corrige mecánicamente el programa, ya que es un factor reductor que contempla la edad de la membrana y el coeficiente de disminución de flujo por año ya introducidos anteriormente.

Finalmente, para establecer un valor del incremento de paso de sales al año, se debe saber que este depende del material de las membranas, para membranas de acetato de celulosa se suponen valores entre el 15 y el 30% mientras que en membranas de poliamida, como es este caso, suele estar entre el 5 y 15% anual, por lo que se establece en 7%.

Trenes		Paso1	Paso1		
pH alimentación		7,00	Producto químico	H2SO4	
Conversión %		45,00	Concentración de la solución,%	100	
Caudal de permeado / tren,	m3/d	5000,0	Tasa de dosificación de productos químic	mg/l	0,000
Flujo promedio	lmh	0,000	Edad membrana	años	3,0
Caudal de alimentación,	m3/d	11111,1	Disminución Flujo por año		5
Caudal de rechazo	m3/d	6111,1	Factor de ensuciamiento		0,857
			Incremento de paso de sales/año, %		7,0

Figura 4: Ventana de diseño software IMSDesign.

En esta misma ventana, se debe hacer una especificación del bastidor, el modelo SWC4 MAX es el tipo de membrana elegida, el número de etapas se establece en una, el número de tubos de presión en 51 y el número de membranas por tubo en 6. Además se selecciona el sistema de recuperación de energía, un intercambiador de presión, como primera aproximación se mantienen los parámetros indicados en el programa los cuales se ajustarán posteriormente; tanto la elección del modelo de membrana como del sistema recuperador de energía se estudió en el apartado de Análisis de Soluciones de la memoria.

Especificación del Sistema		Cálculos ERD	
Etapas		Intercambiador de presión <input checked="" type="radio"/> Turbo <input type="radio"/>	
Tipo de elemento	SWC4 MAX	Fuga	1,00 %
Elementos / tubo de presión	6	Mezcla volumétrica	6,00 %
Nº de tubos de presión	51	H.P. diferencial	0,50 bar
		Bomba booster	1,76 bar

Figura 5: Especificación del sistema en software IMSDesign.

Una vez introducidos todos los datos de análisis y el diseño, se ejecuta el programa para obtener los resultados de cálculo.

Resultados de Cálculo <span style="float: right;">(Flows are per vessel)</span>								
Arreglo	Tubo de presión	Alimentación (bar)	Conc (bar)	Alimentación (m3/h)	Conc (m3/h)	Flujo (lmh)	Flujo máximo	Beta máximo
1-1	51	68,4	67,1	9,08	5	16,6	26,8	1,05

Concentración de permeado											
Ca	0,381	K	2,387	Sr	0,009	Cl	81,283	P04	0,000	C02	7,766
Mg	1,299	NH4	0,000	HC03	0,992	N03	0,020	Si02	0,003	C03	0,000
Na	50,279	Ba	0,000	S04	3,020	F	0,007	B	0,744	pH	5,3
TDS										140,43	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	72432,5 mg/l
Ca3(PO4)2 SI	0,00	CaF2, %	151				

Figura 6: Resultados de cálculo (primera iteración del intercambiador de presión).

Se obtienen unos valores de concentración de permeado que cumplen con los máximos establecidos por el Real Decreto 140/2003.. Se obtienen varias excepciones que no cumplen con los requisitos, el pH, el cual se debe ajustar en el postratamiento y las saturaciones de sulfato de bario y de fluoruro de calcio, que para corregirlas se hace a través del pretratamiento, esto será especificado con más detenimiento en siguientes apartados de este anexo.

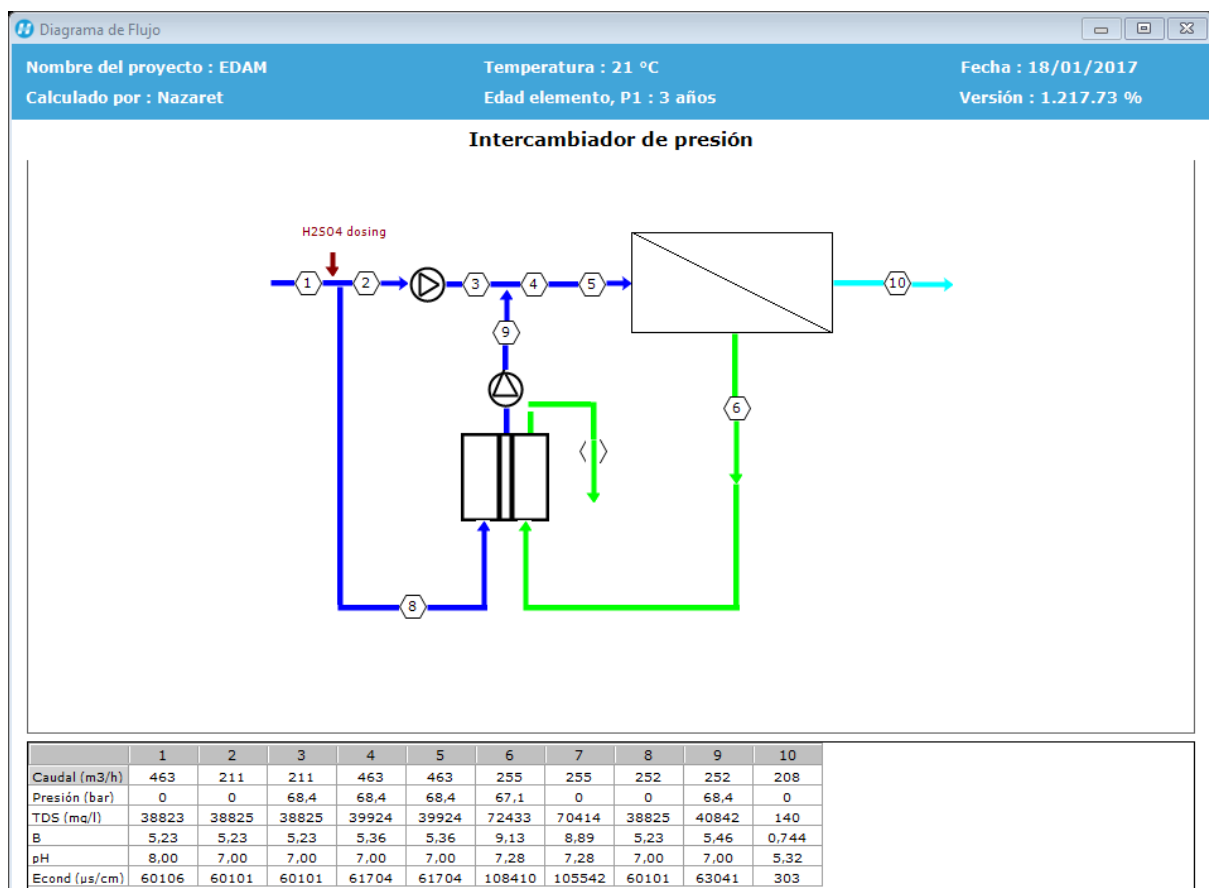


Figura 7: Diagrama de flujo software IMSDesign (primera iteración).

### 1.2 Dimensionado del intercambiador de presión

Para el intercambiador de presión del sistema se escoge el fabricante Energy Recovery ya que es una compañía que desde hace más de 20 años, ha desarrollado tecnologías que se han convertido en las soluciones de recuperación de energía más eficientes y más populares en la desalación y actualmente tiene el liderazgo de mercado en la industria del agua. En su página web, esta empresa ofrece una herramienta Excel para la elección del intercambiador adecuado, para el uso de esta hoja es necesario una serie de datos que se recopilan del software de membranas IMSDesign. Los datos que deben ser introducidos son los marcados en rojo, con esto el Excel devolverá los demás valores además de elegir automáticamente el intercambiador de presión más eficiente y el número requerido de estos.

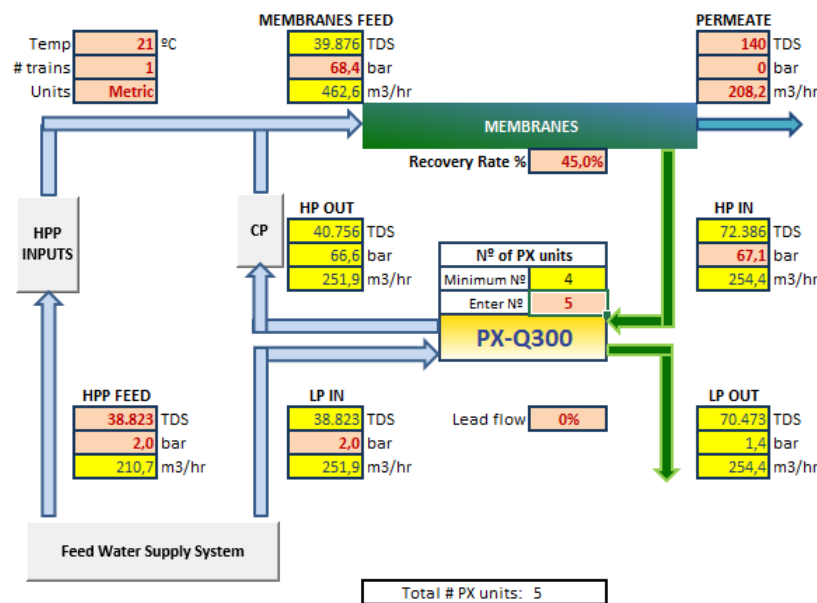


Figura 8: Esquema de la instalación con datos de primera iteración en hoja Excel del intercambiador.

El modelo de intercambiador que da la autoselección del programa Excel es el PX-Q300, este dispositivo es el más eficiente que ha diseñado esta marca actualmente, además tiene la ventaja de ser más silencioso que otros intercambiadores del mercado. El número de unidades mínimas que se deben colocar son 4, con esto tendría un caudal unitario de 63,6 m<sup>3</sup>/h y una eficiencia del 96,53%, en cambio se deciden colocar 5 unidades ya que aumenta la eficiencia y el caudal unitario disminuye pero sin dejar de cumplir con el caudal mínimo permitido por el intercambiador, las características aportadas por esta configuración se muestran en el cuadro siguiente.

PX Technology Performance	
PX unitary flow	50,9 m <sup>3</sup> /hr
Salinity Increase at membranes	2,7%
Volumetric mixing VM	5,8%
Lubrication flow (LF) per PX array	2,6 m <sup>3</sup> /hr
LF as % of concentrate flow	1,0%
HP DP	0,5 bar
LP DP	0,6 bar
RO Specific Energy **	2,67 kWh/m <sup>3</sup>
Efficiency	97,47%

Figura 9: Datos del intercambiador en primera iteración.

Con estos datos se sustituyen los parámetros de recuperación de energía en el software de membranas que inicialmente se habían dejado sin modificar y se vuelve a ejecutar para ver como varían los valores que se han visto hasta ahora.

**Cálculos ERD**

Intercambiador de presión  Turbo

Fuga  %

Mezcla volumétrica  %

H.P. diferencial  bar

Bomba booster  bar

Figura 10: Datos del intercambiador en la segunda iteración.

Los resultados de cálculo y el diagrama de flujo en esta segunda iteración se muestran a continuación.

Resultados de Cálculo <span style="float: right;">(Flows are per vessel)</span>								
Arreglo	Tubo de presión	Alimentación (bar)	Conc (bar)	Alimentación (m3/h)	Conc (m3/h)	Flujo (lmh)	Flujo máximo (l/h)	Beta máximo
1-1	51	68,3	67,1	9,08	5	16,6	26,8	1,05

Concentración de permeado											
Ca	0,380	K	2,385	Sr	0,009	Cl	81,201	P04	0,000	CO2	7,766
Mg	1,297	NH4	0,000	HCO3	0,991	NO3	0,020	SiO2	0,003	CO3	0,000
Na	50,228	Ba	0,000	SO4	3,017	F	0,007	B	0,743	pH	5,3
TDS <input type="text" value="140,29"/> mg/l											

Saturaciones del rechazo y parámetros							
CaSO4, %	<input type="text" value="53"/>	SrSO4, %	<input type="text" value="77"/>	Presión osmótica	<input type="text" value="52,0"/> bar	pH	<input type="text" value="7,3"/>
BaSO4, %	<input type="text" value="148"/>	SiO2, %	<input type="text" value="2"/>	CCPP	<input type="text" value="96,51"/> mg/l	TDS	<input type="text" value="72362,2"/> mg/l
Ca3(PO4)2	<input type="text" value="0,00"/>	CaF2, %	<input type="text" value="150"/>				
SI	<input type="text" value="0,00"/>						

Figura 11: Resultados de cálculo (segunda iteración del intercambiador).

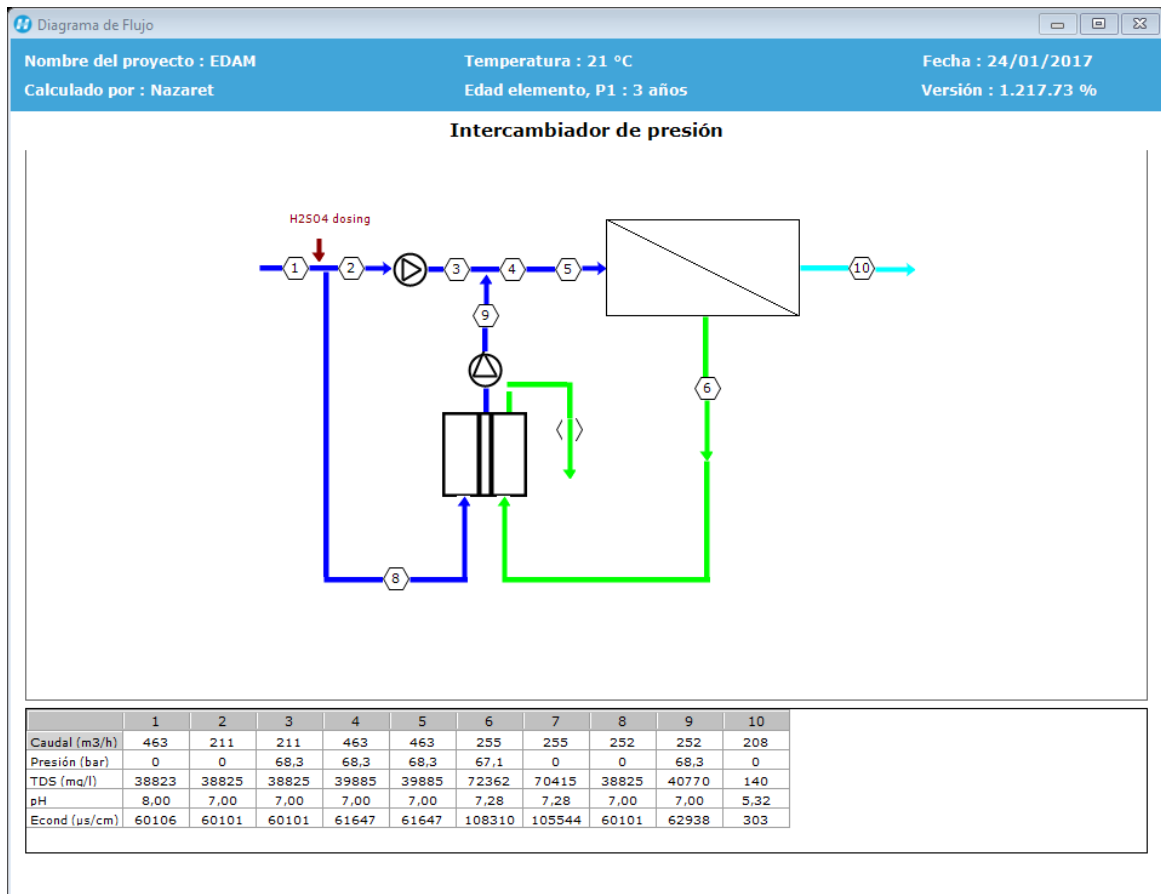


Figura 12: Diagrama de flujo (segunda iteración).

Como se puede observar, los valores no se alteran demasiado con respecto a la primera iteración por lo que no se realizan más repeticiones y se toman estos como definitivos, también se sigue manteniendo la necesidad de tratamientos previos y posteriores al núcleo de desalación lo cual se estudiará más adelante.

### 1.3 Dimensionado de las tuberías

En este apartado de dimensionado de las tuberías principales se selecciona tanto el material como las dimensiones de estas, es decir su diámetro y su longitud, además se realiza el cálculo de las pérdidas de cargas que se generan en las conducciones. Las tuberías consideradas son: la tubería de captación, la tubería de alimentación, la tubería de distribución y la tubería de rechazo de salmuera.

#### 1.3.1 Elección del material

El material escogido para todas las tuberías supuestas es Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) ya que presenta una serie de ventajas importantes, son tuberías más ligeras en comparación con otros materiales y tienen una elevada resistencia mecánica y a la corrosión y por consiguiente una larga vida útil.

Para seleccionar el fabricante se consulta la página web del Grupo Sectorial AseTUB (Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos) perteneciente a ANAIP (Asociación Española de Industriales de Plásticos); en esta página web se agrupa y representa a los fabricantes de tubos y accesorios plásticos en sus múltiples aplicaciones, de este modo se encuentran tres empresas que se dedican a la producción de los tubos requeridos.

**Elija una aplicación:**

**Elija un producto:**

Mostrar #

Empresa	E-mail	Teléfono	Página web
<a href="#">Amiantit</a>	info@amiantit.eu	97 747 07 77	<a href="http://www.amiantit.eu">www.amiantit.eu</a>
<a href="#">Future Pipe Spain</a>	spain@futurepipe.com	93 779 88 88	<a href="http://www.futurepipe.com">www.futurepipe.com</a>
<a href="#">Prefabricados Delta</a>	apenalba@fcc.es	91 530 00 47	<a href="http://www.prefabricadosdelta.com">www.prefabricadosdelta.com</a>

Figura 13: Buscador de empresas en función del producto y aplicación requerida.

Tras el estudio de estas empresas se escoge la empresa Amiantit que trabaja con productos del fabricante Flowtite, el distribuidor líder a nivel mundial de tuberías de este material y generalmente, la alternativa con reducidos costes de operación y con menor coste global.

Para tuberías de PRFV los diámetros nominales que ofrece el fabricante Flowtite son los siguientes:

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

Figura 14: Diámetros nominales de tuberías PRFV del fabricante Flowtite.

### 1.3.2 Elección de la longitud

#### *Tubería de captación*

El sistema de captación utilizado en esta EDAM es cerrado, por los motivos que ya se han expuesto en el apartado de Análisis de Soluciones. Para este sistema se decide colocar tres pozos de captación, dos de ellos trabajando de manera continua y el tercero de reserva; así se evitan paradas en la planta o variaciones en la producción de la misma lo que puede producir daños en algunos de los equipos, además con esta solución también se evita que el sistema dependa de una sola bomba de captación y la sobreexplotación de un único pozo.

Las bombas de los pozos necesitan estar sumergidas a una cierta profundidad mínima para que no exista cavitación, este fenómeno se da cuando colapsan burbujas de vapor o gas en el seno de un líquido y puede ocasionar efectos perjudiciales en la bomba como picaduras en la superficie del metal en contacto. Esta profundidad como mínimo debe contemplar el propio nivel del pozo y la bajamar máxima que se pueda dar en la zona, además de la pérdida de altura que se pueda dar debida a la filtración en el terreno y a que en la aspiración la bomba genera un cono de succión que disminuye el nivel del agua.

Para conocer el valor de bajamar máxima se estudia un informe de parámetros relacionados con el nivel del mar y la marea que afectan a las condiciones de diseño y explotación portuaria realizado por la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado (REDMAR) para el período 1992-2013 para el puerto de Santa Cruz de Tenerife.



	Niveles (cm)							
	Observados				Marea astronómica			
	Máx	Mín	Med	D.E.	Máx	Mín	Med	D.E.
Pleamar	305	158	225	25	295	160	224	25
Bajamar	140	-3	74	24	138	13	75	24
Pleamar viva	305	228	262	16	295	231	260	15
Bajamar viva	112	-3	44	17	72	13	45	14
Pleamar muerta	237	158	188	12	212	160	187	11
Bajamar muerta	140	77	111	12	138	89	112	10

Figura 15: Estadísticas de bajamares y pleamares. (Fuente: REDMAR)

Para estimar el nivel del pozo se utiliza la herramienta web Goolzoom, con la que se puede medir el perfil longitudinal del terreno.

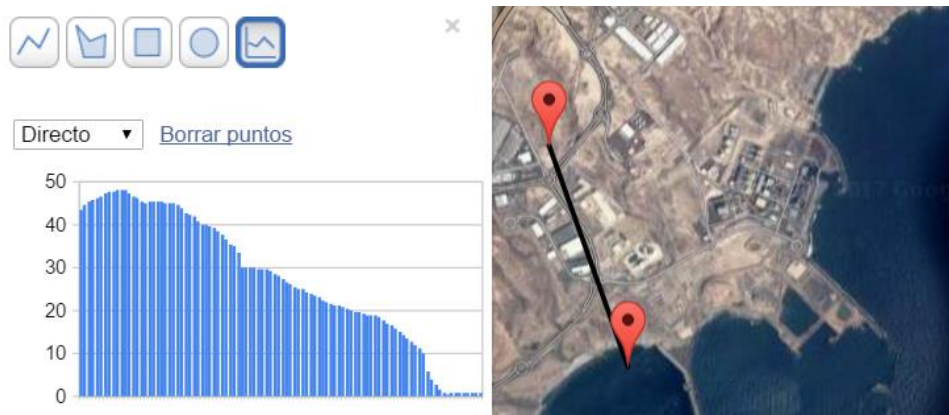


Figura 16: Elevación del terreno entre la parcela y el nivel del mar.

En cuanto a la pérdida de altura por filtración se considera 1 metro, al igual que para la disminución de altura debido al cono de succión que también se considera 1 metro, ya que así se ha consultado en la bibliografía. Se recopilan estos datos y los anteriores en la siguiente tabla para determinar la altura mínima con la que debe cumplir el pozo.

Elevación del terreno	Bajamar máxima	Pérdida de altura por fricción	Pérdida de altura por succión	Profundidad mínima del pozo	Profundidad final elegida para el pozo
50 m	1,4 m	1 m	1 m	53,4 m	55 m

Tabla 4: Consideraciones para la profundidad de los pozos.

Los pozos se disponen simétricamente en forma de cruz, cada uno con una separación de 15 metros con la finalidad de que la separación entre pozos sea suficiente, todos ellos se unen en un colector común. Por tanto, la longitud de la tubería de captación es la suma de la profundidad del pozo y la separación entre estos.

$$L_{\text{captación}} = 55 + 15 = 70 \text{ m}$$

#### Tubería de alimentación

Como ya se ha comentado en el anterior apartado, los pozos están separados entre sí 15 metros y todos ellos se unen en un colector común, desde este punto de unión de la bifurcación de los pozos se conduce la siguiente tubería de alimentación que se considera de

20 metros hasta la entrada a la EDAM (bomba de alta presión), pasando por una zona de tratamiento previo.

$$L_{alimentación} = 20 \text{ m}$$

A continuación se muestra un esquema simplificado de la disposición de los pozos y de los tramos de tuberías.

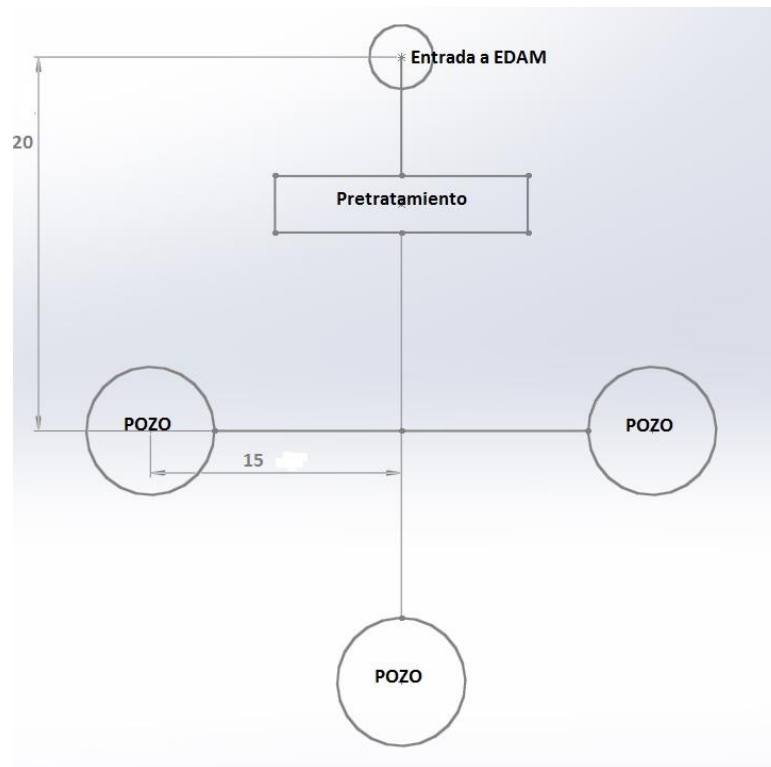


Figura 17: Esquema simple de tuberías de captación y alimentación.

#### Tubería de distribución

Se debe elegir el depósito al cual se quiere conducir el permeado, para ello se consulta el catálogo de infraestructuras hidráulicas existentes del Plan Hidrológico de Tenerife. En este aparece un listado de los depósitos de abastecimiento, se opta por el depósito del Polígono Industrial de Granadilla, cuyos datos son los siguientes:

Tipo de infraestructura	Depósito abastecimiento
Denominación	Polígono Industrial de Granadilla
Dato técnico	Capacidad 4500 m <sup>3</sup>
Coordenadas UTM	(X,Y) = 352.093, 3.108.9121018
Cota	101
Municipio	Granadilla de Abona

Tabla 5: Datos del depósito de abastecimiento escogido (Fuente: PHT)

Con estas coordenadas y haciendo uso de la aplicación web Pixelis Maps se encuentra la ubicación del depósito.

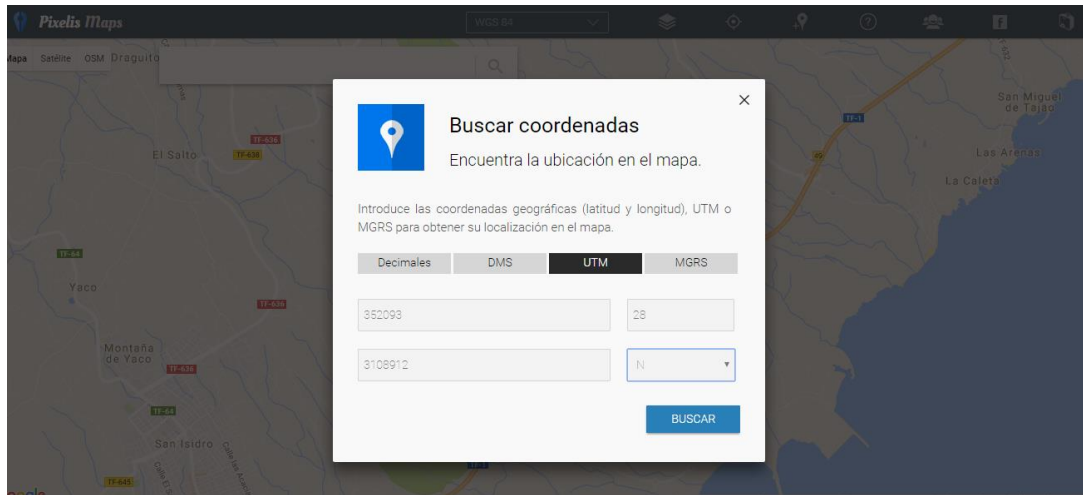


Figura 18: Introducción de coordenadas del depósito en herramienta web Pixelis Maps.

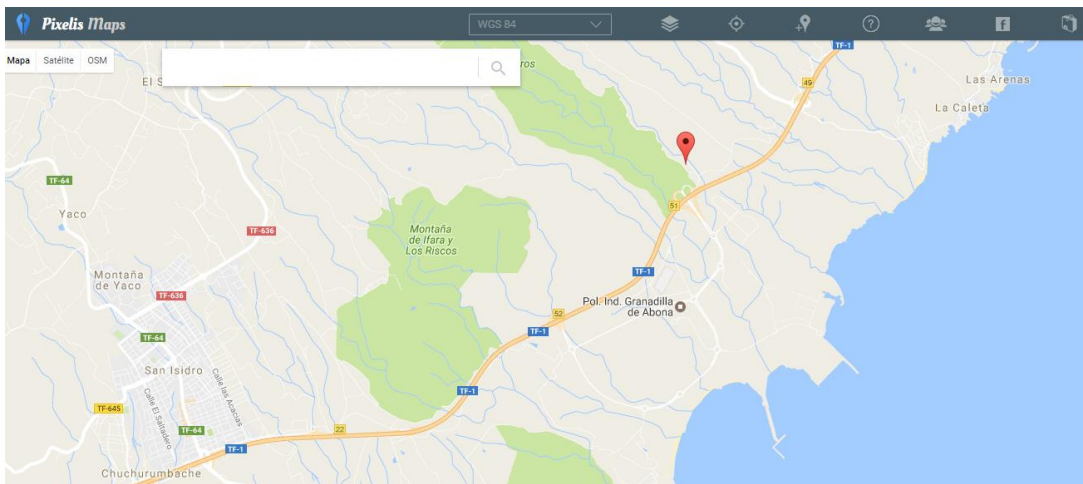


Figura 19: Ubicación del depósito en mapa mediante herramienta web Pixelis Maps.

A continuación, se encuentra el depósito en Google Maps y se mide la distancia y la diferencia de altura a la EDAM con la herramienta Goolzoom.



Figura 20: Imagen del depósito de abastecimiento. (Fuente: Google Maps).



Figura 21: Distancia del depósito a la EDAM (Fuente: Goolzoom).

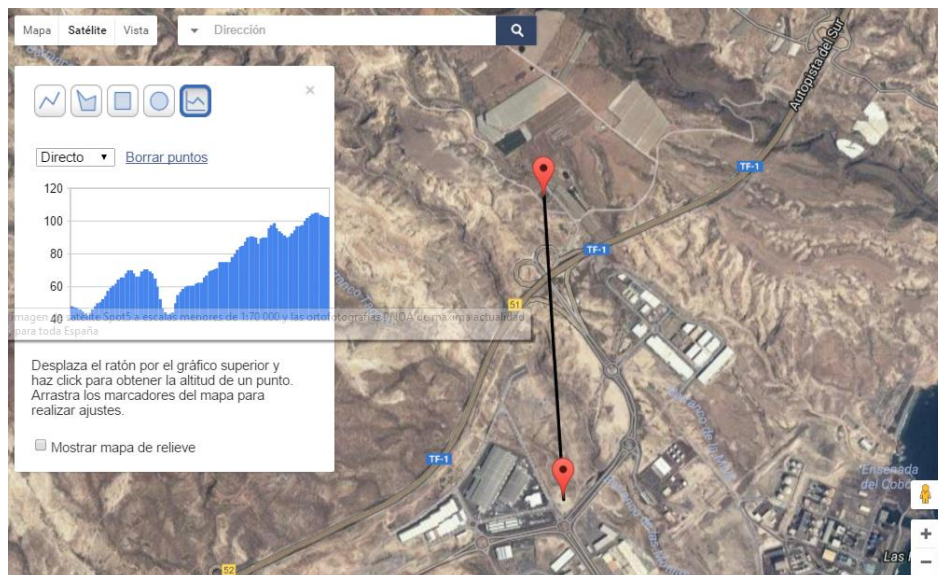


Figura 22: Diferencia de altura del depósito a la EDAM (Fuente: Goolzoom).

La distancia de forma lineal entre la planta y el depósito es de 1,29 km, en cambio, los cálculos se harán aproximando a 1,5 km para tener en cuenta posibles irregularidades del terreno y la imposibilidad de que el trazado sea recto. Además, se tiene el dato de diferencia de altura, la cota de la EDAM se había establecido en 50 m y el depósito se encuentra a 101 m, por tanto la diferencia de cota es de 51 metros.

$$L_{distribución} = 1,5 \text{ km}$$

#### *Tubería de rechazo de salmuera*

Se considera necesaria la colocación de un emisario submarino para realizar el rechazo de la salmuera, este se decide colocar en la isobata -11 a una distancia de 1550 m de la EDAM con un trazado principalmente recto, esta distancia se ha medido con la ayuda de un mapa generado por ArcGIS un plataforma web de representación cartográfica. Esta isobata es seleccionada por considerarse que está lo suficientemente lejos de la costa y que de este modo no interfiere en la salinidad del agua de captación; pero es tan solo un punto

orientativo, porque para la elección de este se deben estudiar más parámetros referentes a las aguas superficiales y subterráneas, sus ecosistemas, etc.

#### Batimetría de las Islas Canarias

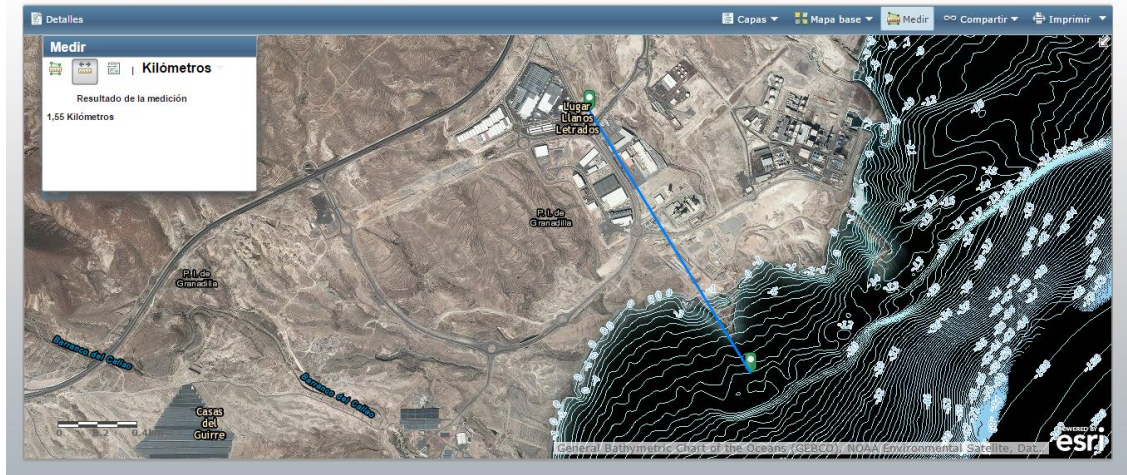


Figura 23: Distancia de tubería de rechazo (Fuente: ArcGIS)

$$L_{rechazo} = 1,55 \text{ km}$$

#### 1.3.3 Elección del diámetro

El diámetro de la tubería (D) se calcula a través del Criterio de Bonnet, este diámetro es el mínimo que se necesita para la aplicación, a partir de este dato se escoge un diámetro comercial superior, con ayuda de la figura 14 que muestra los diámetros nominales del fabricante escogido.

$$D_{\min} = 0,835 \cdot Q^{2/5}$$

Ecuación 1: Diámetro mínimo según Criterio de Bonnet.

El dato del caudal de alimentación, distribución y de rechazo es proporcionado por el software IMSDesign y el caudal de captación es la mitad del caudal de alimentación, ya que aunque existen tres tuberías de captación, simultáneamente solo están en funcionamiento dos de las bombas de captación.

- Caudal de alimentación:  $Q_{alim} = 462,96 \text{ m}^3/h$
- Caudal de captación:  $Q_{cap} = 231,48 \text{ m}^3/h$
- Caudal de distribución:  $Q_{dist} = 208,33 \text{ m}^3/h$
- Caudal de rechazo:  $Q_{rech} = 255 \text{ m}^3/h$

Con estos datos, se calculan los diámetros mínimos para las distintas conducciones y se obtienen los diámetros comerciales correspondientes, esto se resume en la siguiente tabla.

	Diámetro mínimo (mm)	Diámetro nominal (mm)
<b>Tubería de alimentación</b>	367,6	400
<b>Tubería de captación</b>	278,6	300
<b>Tubería de distribución</b>	267,1	300
<b>Tubería de rechazo</b>	289,6	300

Tabla 6: Diámetros mínimos y nominales de las tuberías.

### 1.3.4 Cálculo de las pérdidas de carga

#### Tubería de alimentación

El proceso que se explica a continuación es general para calcular las pérdidas de carga en tuberías. En este transcurso se tienen en cuenta las siguientes hipótesis:

- I. Se considera régimen estacionario.
- II. Se supone un valor inicial del factor de fricción ( $f$ ) de 0,015.
- III. La aceleración de la gravedad ( $g$ ) se toma como  $9,81 \text{ m/s}^2$ .
- IV. Se toma la viscosidad cinemática del agua ( $\nu$ ) a  $21^\circ\text{C}$ , la cual tras interpolar toma un valor de  $9,8196 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .
- V. El valor de la rugosidad de la tubería ( $k$ ), proporcionado por el fabricante, es 0,029.

Las pérdidas de carga se calculan mediante la ecuación de Darcy-Weissbach:

$$H_r = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

**Ecuación 2: Expresión de Darcy-Weissbach.**

Los datos de longitud y diámetro son datos ya conocidos y que dependen del tramo que se esté calculando. El cálculo de la velocidad del flujo de agua ( $V$ ) se puede determinar a partir de la definición de caudal, ecuación 3, ya que se saben los valores de caudal y área.

$$Q = V \cdot A$$

**Ecuación 3: Caudal de agua.**

$$V = 1,0234 \text{ m/s}$$

El coeficiente de fricción se calcula mediante un proceso iterativo, para ello, en primer lugar se calcula el número de Reynolds ( $Re_D$ ), mediante la ecuación 4, para conocer en qué régimen se encuentra el fluido. Para el caso de régimen turbulento, donde el número de Reynolds es mayor que 4000 (régimen en el que se encuentran los casos de este proyecto), se aplica la fórmula de Colebrook, ecuación 5, para hallar el factor de fricción.

$$Re_D = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \nu \cdot D}$$

**Ecuación 4: Número de Reynolds.**

$$\frac{1}{\sqrt{f_{n+1}}} = -2 \cdot \log \left[ \frac{k/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re_D \cdot \sqrt{f_n}} \right]$$

**Ecuación 5: Fórmula de Colebrook.**

En este caso, el número de Reynolds es:

$$Re_D = 416869$$

El proceso iterativo de cálculo del coeficiente de fricción mediante la ecuación 5, se resume en la tabla 7.

$f_n$	$f_{n+1}$
0,015	0,0144
0,0144	0,0145
0,0145	0,0145

Tabla 7: Iteración para obtener el factor de fricción de la tubería de alimentación.

Por tanto, las pérdidas de carga se calculan a partir de la ecuación 2, con los datos obtenidos anteriormente.

<b>Factor de fricción</b>	0,0145
<b>Longitud (m)</b>	20
<b>Diámetro (m)</b>	0,4
<b>Velocidad (m/s)</b>	1,02
<b>Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)</b>	9,81

Tabla 8: Resumen de datos necesarios para calcular las pérdidas de carga (tubería de alimentación).

$$H_{r_{alim}} = 0,0386 \text{ m}$$

#### Tubería de captación

Para calcular las pérdidas de carga en las tuberías de captación se procede igual. Esta vez, se tienen los siguientes valores de velocidad de flujo y número de Reynolds:

$$V = 0,9097 \text{ m/s}$$

$$Re_D = 277913$$

Los datos del proceso iterativo para calcular el coeficiente de fricción son:

$f_n$	$f_{n+1}$
0,015	0,0156
0,0156	0,0156
0,0156	0,0156

Tabla 9: Iteración para obtener el factor de fricción de la tubería de captación.

Las pérdidas de carga de la tubería de captación se calculan con los siguientes datos:

<b>Factor de fricción</b>	0,0156
<b>Longitud (m)</b>	60
<b>Diámetro (m)</b>	0,3
<b>Velocidad (m/s)</b>	0,91
<b>Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)</b>	9,81

Tabla 10: Resumen de datos necesarios para calcular las pérdidas de carga (tubería de captación)

$$H_{r_{capt}} = 0,134 \text{ m}$$

Además de las pérdidas de carga que se tiene en las tuberías, también existen pérdidas de carga locales debidas a los accesorios. En este apartado, se calculan unas pérdidas de carga locales mínimas, las que se consideran originadas por un codo de 90° en cada una de las tuberías de captación y un empalme en T (por ser el dispositivo que más se ajusta) en la unión de las mismas, aunque se tiene en cuenta que un proyecto ejecutable estas pérdidas sean mayores.

Para el cálculo de las pérdidas de cargas locales, se utiliza la siguiente expresión:

$$H_{ra} = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

#### Ecuación 6: Pérdidas de carga locales.

El coeficiente de pérdida (K) es un número adimensional, el cual toma diferentes valores para los diferentes accesorios.

Válvula esférica, totalmente abierta	$K = 10$
Válvula de ángulo, totalmente abierta	$K = 5$
Válvula de retención de clapeta	$K = 2,5$
Válvula de pie con colador	$K = 0,8$
Válvula de compuerta abierta	$K = 0,19$
Codo de retroceso	$K = 2,2$
Empalme en T normal	$K = 1,8$
Codo de 90° normal	$K = 0,9$
Codo de 90° de radio medio	$K = 0,75$
Codo de 90° de radio grande	$K = 0,60$
Codo de 45°	$K = 0,42$
Válvula de compuerta cerrada $\frac{1}{4}$	$K = 0,3$
Válvula de compuerta cerrada $\frac{1}{2}$	$K = 2,1$
Válvula de compuerta cerrada $\frac{3}{4}$	$K = 17$

Figura 24: Coeficientes de pérdidas de carga para diversos accesorios (Fuente: Agüera Soriano)

Para el codo de 90° el coeficiente de pérdida es 0,9 y la velocidad a la que circula el fluido es 0,9097 m/s. La aceleración de la gravedad se toma en 9,81 m/s<sup>2</sup> como en todos los apartados de este proyecto, de modo que las pérdidas debido a un codo de 90° son:

$$H_{ra_{codo}} = 0,038 \text{ m}$$

Para el empalme en T el coeficiente de pérdida es 1,8 y para la velocidad a la que circula el fluido, se escoge la mayor velocidad que pasa por la unión que es 1,0234 m/s, por lo que las pérdidas debido a empalme en T son:

$$H_{ra_{emp}} = 0,0961 \text{ m}$$

Por tanto, las pérdidas locales mínimas son:

$$H_{ra_{capt}} = 0,134 \text{ m}$$

Para concluir este apartado, se muestra un cuadro resumen de las pérdidas de carga originadas tanto en las conducciones como en los accesorios de estas.

	Pérdidas de carga (m)
Tubería de alimentación	0,0386
Tubería de captación	0,1532
Accesorios	0,134
<b>Total</b>	<b>0,3259</b>

Tabla 11: Pérdidas de carga totales en el sistema de captación y alimentación.

#### Tubería de distribución

Para el cálculo de las pérdidas de carga en las tuberías de distribución se tienen los siguientes valores de velocidad de flujo y número de Reynolds:

$$V = 0,8187 \text{ m/s}$$

$$Re_D = 250122$$



Los datos del proceso iterativo para calcular el coeficiente de fricción son:

$f_n$	$f_{n+1}$
0,015	0,0159
0,0159	0,0158
0,0158	0,0158

Tabla 12: Iteración para obtener el factor de fricción de la tubería de distribución.

Las pérdidas de carga de la tubería de distribución se calculan con los siguientes datos:

<b>Factor de fricción</b>	0,0158
<b>Longitud (m)</b>	1500
<b>Diámetro (m)</b>	0,3
<b>Velocidad (m/s)</b>	0,82
<b>Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)</b>	9,81

Tabla 13: Resumen de datos necesarios para calcular las pérdidas de carga (tubería de distribución)

$$H_{r_{dist}} = 2,7026 \text{ m}$$

Además se tienen en cuenta unas pérdidas de carga locales debidas a accesorios, en este caso se consideran 6 codos de 90° (K=0,9) para hacer una estimación de estas pérdidas, se calculan de igual modo que en el apartado anterior teniendo como dato la velocidad del fluido que es 0,8187 m/s.

$$H_{ra_{dist}} = 0,1845 \text{ m}$$

El cuadro siguiente muestra las pérdidas de carga de conducciones y accesorios en la tubería de distribución.

	<b>Pérdidas de carga (m)</b>
Tubería de distribución	2,7026
Accesorios	0,1845
<b>Total</b>	<b>2,8871</b>

Tabla 14: Pérdidas de carga totales en el sistema de distribución.

#### Tubería de rechazo

Para el cálculo de las pérdidas de carga en las tuberías de rechazo se tienen los siguientes valores de velocidad de flujo y numero de Reynolds:

$$V = 1,0021 \text{ m/s}$$

$$Re_D = 306149$$

Los datos del proceso iterativo para calcular el coeficiente de fricción son:

$f_n$	$f_{n+1}$
0,015	0,0154
0,0154	0,0154
0,0154	0,0154

Tabla 15: Iteración para obtener el factor de fricción de la tubería de rechazo.

Las pérdidas de carga de la tubería de rechazo se calculan con los siguientes datos:

<b>Factor de fricción</b>	0,0154
<b>Longitud (m)</b>	1550
<b>Diámetro (m)</b>	0,3
<b>Velocidad (m/s)</b>	1,00
<b>Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)</b>	9,81

Tabla 16: Resumen de datos necesarios para calcular las pérdidas de carga (tubería de rechazo)

$$H_{r_{rech}} = 4,061 \text{ m}$$

Además se tienen en cuenta unas pérdidas de carga locales debidas a accesorios, en este caso se estiman estas pérdidas secundarias como un 10% de las pérdidas principales ya que se desconocen los accesorios necesarios en esta tubería.

$$H_{ra_{rech}} = 0,4061 \text{ m}$$

El cuadro siguiente muestra las pérdidas de carga de conducciones y accesorios.

	<b>Pérdidas de carga (m)</b>
Tubería de distribución	4,061
Accesorios	0,4061
<b>Total</b>	<b>4,4671</b>

Tabla 17: Pérdidas de carga totales en el sistema de rechazo.

## 1.4 Dimensionado de las bombas del sistema

### 1.4.1 Bomba de alta presión

Para la elección de la bomba, tanto la de alta presión como las diversas bombas necesarias en la instalación, se consultan varios fabricantes de maquinaria industrial, tales como KSB, Sulzer y Lowara. A través de las páginas web de estos productores se puede hacer una selección de la bomba adecuada con los datos del caudal que va a suministrar la bomba y la altura manométrica que debe proporcionar, esta altura se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$H_{AP} = \frac{P_{out} - P_{in}}{\rho \cdot g} + z_{out} - z_{in} + \frac{v_{out}^2 - v_{in}^2}{2 \cdot g} + \sum H_r$$

Ecuación 7: Altura manométrica de una bomba.

A la hora de utilizar esta ecuación se consideran una serie de hipótesis generales:

- I. Se considera un régimen estacionario.
- II. Las variaciones de energía cinética y potencial se consideran despreciables.
- III. Las pérdidas de carga ( $H_r$ ) se consideran insignificantes.
- IV. La densidad del agua ( $\rho$ ) se toma como un valor aproximado de 1000 kg/m<sup>3</sup>.
- V. La aceleración de la gravedad ( $g$ ) se toma como 9,81 m/s<sup>2</sup>.

En este caso, en cuanto a los valores de presión, se tiene una presión de salida de 68,3 bar, este dato es suministrado por el software de dimensionado de membranas, y el dato de presión de entrada se toma en 2 bar, para evitar que en la bomba se produzca cavitación.

Por tanto, la altura manométrica para la bomba de alta presión es:

$$H_{AP} = 675,84 \text{ m}$$

Además, del software de dimensionado de las membranas se tiene el dato del caudal que circula por la bomba.

$$Q_{AP} = 211 \text{ m}^3/h$$

Una vez recopilados estos datos, se estudian los parámetros relevantes de las bombas de mayor eficiencia de los fabricantes anteriormente nombrados, a continuación se muestran algunos datos de estas bombas así como sus curvas características.

Fabricante	Modelo	Eficiencia
KSB	Multitec A 125/6-9.1 27.167	75,9%
Sulzer	MSD 4x6x10.5C	79,3%
Lowara	MPE 125.1 / 7--	76,8%

Tabla 18: Datos significativos de las bombas de alta presión consideradas.

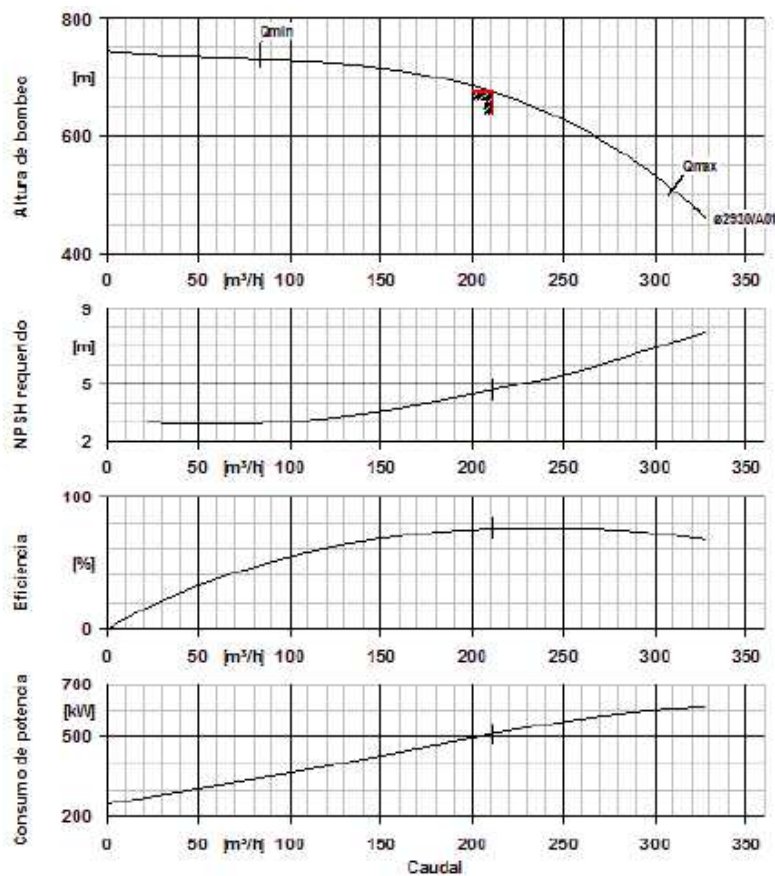


Figura 25: Curvas características de la bomba de alta presión proporcionadas por KSB.

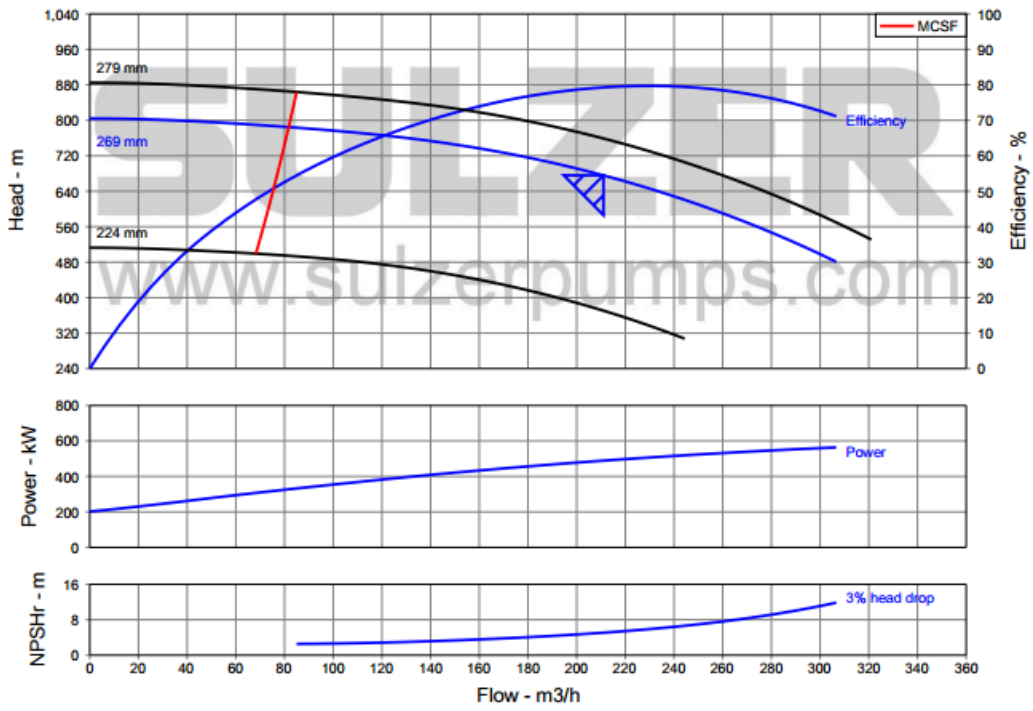


Figura 26: Curvas características de la bomba de alta presión proporcionadas por Sulzer.

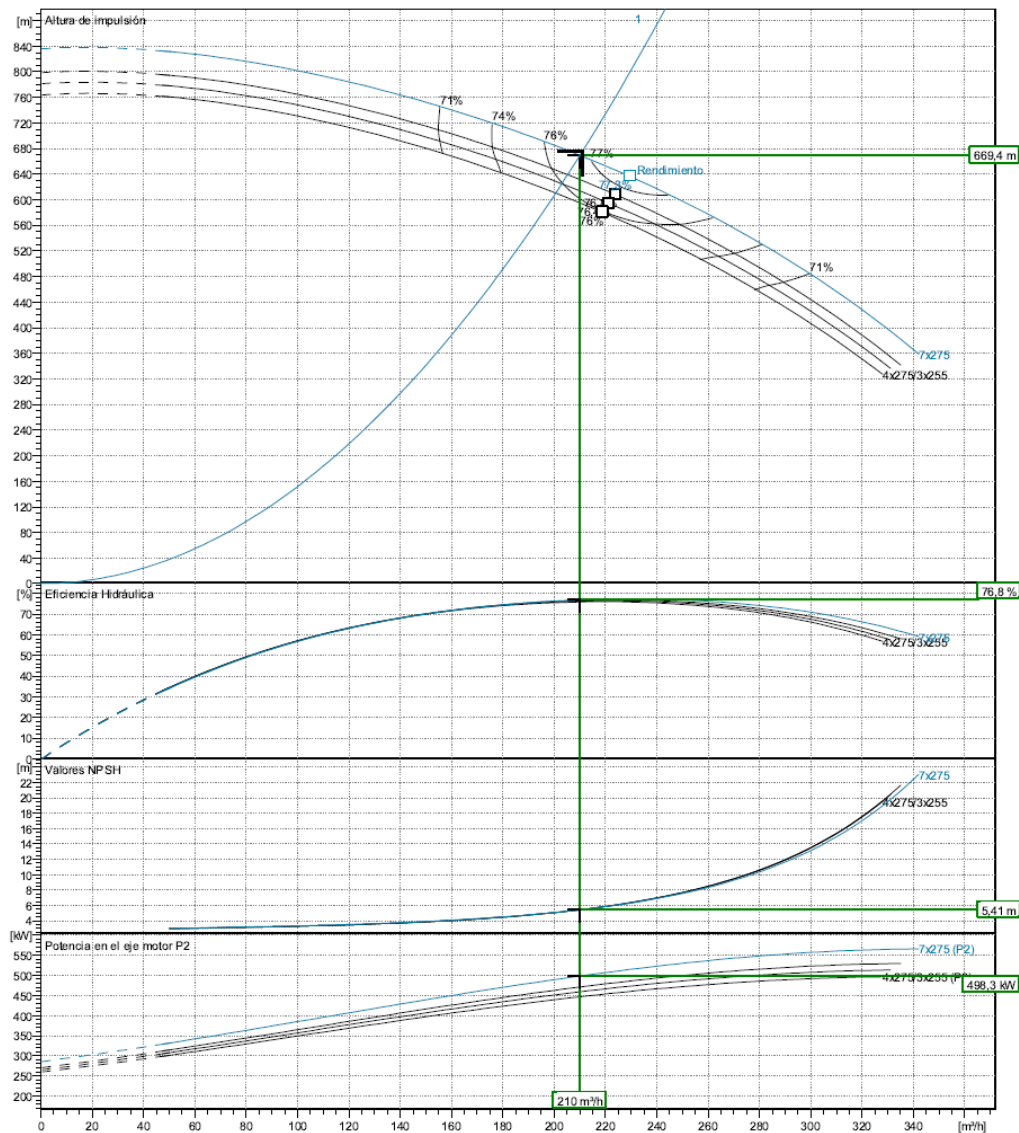


Figura 27: Curvas características de la bomba de alta presión proporcionadas por Lowara.

Finalmente el modelo de bomba escogida es MSD 4x6x10.5C del fabricante Sulzer, debido a que presenta la mayor eficiencia y a que se confirma que no hay cavitación. Esto último se comprueba mediante la gráfica de altura mínima de aspiración (NPSHr), esta altura en este caso tiene un valor de aproximadamente 5 m, cuyo equivalente en bar es 0,5, por otro lado la presión de entrada es de 2 bar, como se había asumido anteriormente, por tanto la presión de entrada cumple con la mínima de aspiración y no existirá cavitación.

A continuación se muestra un cuadro resumen de las características de la bomba de alta presión así como una imagen de este modelo. El consumo específico que muestra esta bomba se considera aceptable ya que José Antonio Medina San Juan en el libro *Desalación de aguas salobres y de mar* en el año 2000 apunta que en estas bombas para agua de mar los consumos más extendidos en las instalaciones en funcionamiento están comprendidos entre 3,8 y 4,8 kWh/m<sup>3</sup> de agua producto cuando se utilizan equipos de recuperación de energía y entre 1-2 kWh/m<sup>3</sup> más si no se emplean tales dispositivos. El consumo de la bomba de alta presión de este proyecto es menor a 3,8 kWh/m<sup>3</sup> pero igualmente se considera admisible ya que se tiene en cuenta la mejora tecnológica que ha habido desde la fecha de publicación de estos datos.

Sistema	Bomba de alta presión
Fabricante	Sulzer
Modelo	MSD 4x6x10.5C
Eficiencia	79,3%
NPSHr requerido	5,08 m
Potencia	489 kW
Consumo específico	2,347 kWh/m <sup>3</sup>

Tabla 19: Datos de bomba de alta presión seleccionada.



Figura 28: Bomba alta presión multietapa de cámara partida axialmente MSD. (Fuente: Sulzer).

#### 1.4.2 Bomba Booster

Para el dimensionado de la bomba Booster se procede de la misma manera que en el caso anterior, con la altura manométrica correspondiente a la bomba de recirculación y el caudal de esta, se consultan diversos fabricantes para seleccionar una bomba que se ajuste a estos datos.

La altura manométrica se calcula de igual modo, a partir de la ecuación 7 y tomando como válidas las hipótesis anteriores; pero en este caso los datos a introducir en la ecuación son los siguientes, estos han sido extraídos del software de dimensionamiento de membranas y del dimensionado del intercambiador.

- Presión que se debe obtener ( $P_{out}$ ): 68,3 bar.
- Presión de entrada ( $P_{in}$ ): 66,6 bar.

Por tanto, la altura manométrica para la bomba Booster es:

$$H_{Booster} = 17,33 \text{ m}$$

Además, del software de dimensionado de las membranas se tiene el dato del caudal que circula por la bomba.

$$Q_{Booster} = 252 \text{ m}^3/\text{h}$$

A continuación, se estudian los parámetros relevantes de las bombas de mayor eficiencia y sus curvas características.

Fabricante	Modelo	Eficiencia
KSB	Etanorm 150-125-250	85,8%
Sulzer	ZE 200-250	81,2%
Lowara	ICP 200-150-400	82,5%

Tabla 20: Datos significativos de las bombas Booster consideradas.

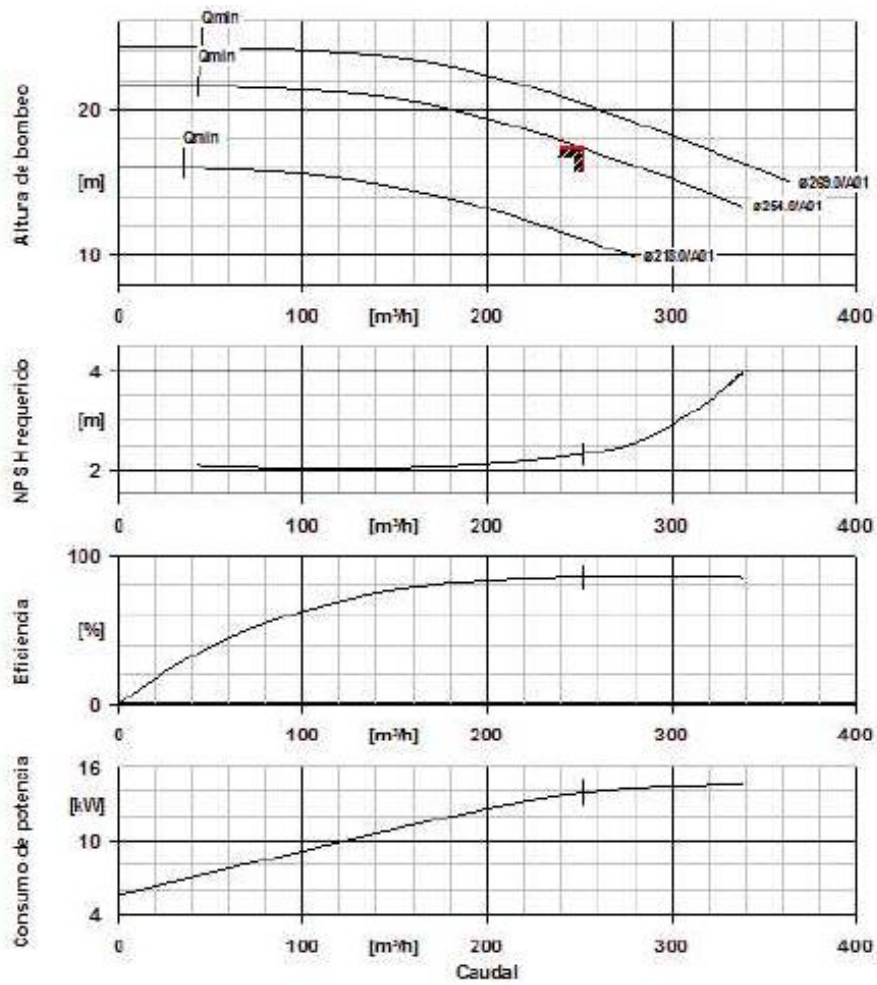


Figura 29: Curvas características de la bomba Booster proporcionadas por KSB.

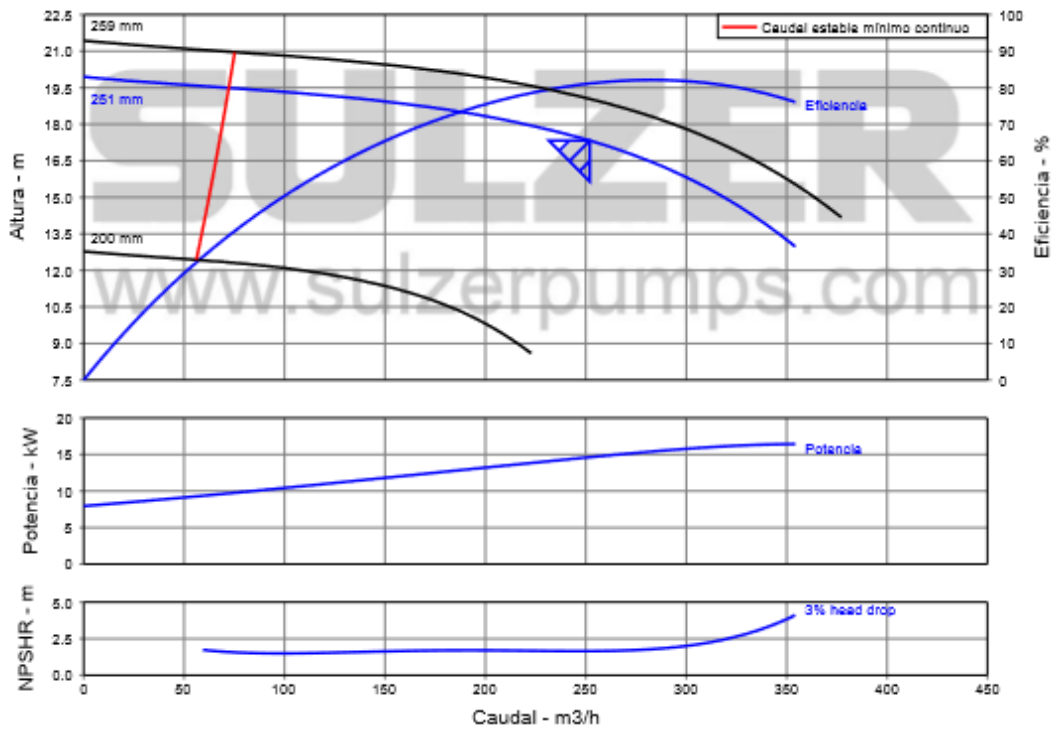


Figura 30: Curvas características de la bomba Booster proporcionadas por Sulzer.

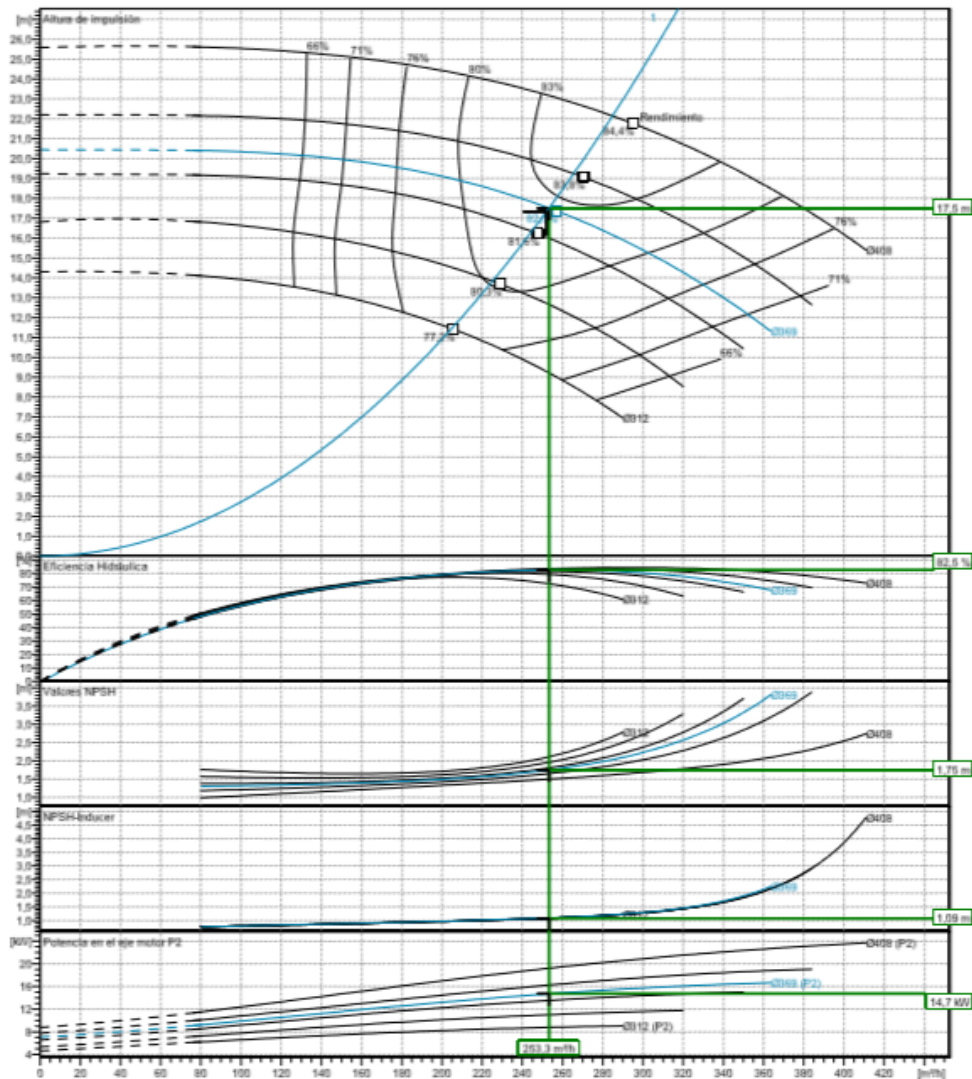


Figura 31: Curvas características de la bomba Booster proporcionadas por Lowara.

La bomba que presenta mayor rendimiento es la que se utilizará como bomba de recirculación, esta es el modelo Etanorm 150-125-250 del fabricante KSB, además también se comprueba que no existe cavitación ya que la presión de entrada cumple con la altura mínima requerida. Seguidamente se muestran las características de la bomba Booster.

Sistema	Bomba Booster
Fabricante	KSB
Modelo	Etanorm 150-125-250
Eficiencia	85,8%
NPSHr requerido	2,32 m
Potencia	13,88 kW
Consumo específico	0,067 kWh/m <sup>3</sup>

Tabla 21: Datos de bomba Booster seleccionada.





Figura 32: Bomba booster de carcasa horizontal. (Fuente: KSB).

#### 1.4.3 Bombas de captación

De igual modo que para las bombas anteriores se necesita conocer el caudal necesario y la altura manométrica. El caudal de captación se ha conocido en apartados anteriores ( $231,48 \text{ m}^3/\text{h}$ ) y la altura manométrica se calcula mediante la ecuación 7, esta vez las hipótesis que se consideran válidas son las que se detallan a continuación.

- I. Se considera un régimen estacionario.
- II. Las variaciones de energía cinética se consideran despreciables.
- III. La densidad del agua ( $\rho$ ) se toma como un valor aproximado de  $1000 \text{ kg/m}^3$ .
- IV. La aceleración de la gravedad ( $g$ ) se toma como  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

En cuanto a los datos se tienen los siguientes:

- Cota de salida ( $z_{out}$ ): 55 m
- Cota de entrada ( $z_{in}$ ): 0 m
- Pérdidas de carga totales ( $H_r$ ): 0,3046 m
- Presión que se debe obtener ( $P_{out}$ ): 4,5 bar.
- Presión de entrada ( $P_{in}$ ): 0 bar.

La presión de salida resulta de considerar la presión implantada para la bomba de captación (2 bar) y la presión diferencial que existe en el pretratamiento (2,5 bar), lo cual se detalla en el apartado 4 de este anexo y la presión de entrada es un dato desconocido, pero, al trabajar con una presión relativa, se considera despreciable.

Por tanto la altura manométrica es:

$$H_{captación} = 101 \text{ m}$$

A continuación, se estudian los parámetros relevantes de las bombas de mayor eficiencia y sus curvas características.

Fabricante	Modelo	Eficiencia
KSB	UPA 250C-250/4d	80,3%
Sulzer	SJT-11LC	81,3%
Lowara	Z10275 4/3A-L8W	81,3%

Tabla 22: Datos significativos de las bombas de captación consideradas.

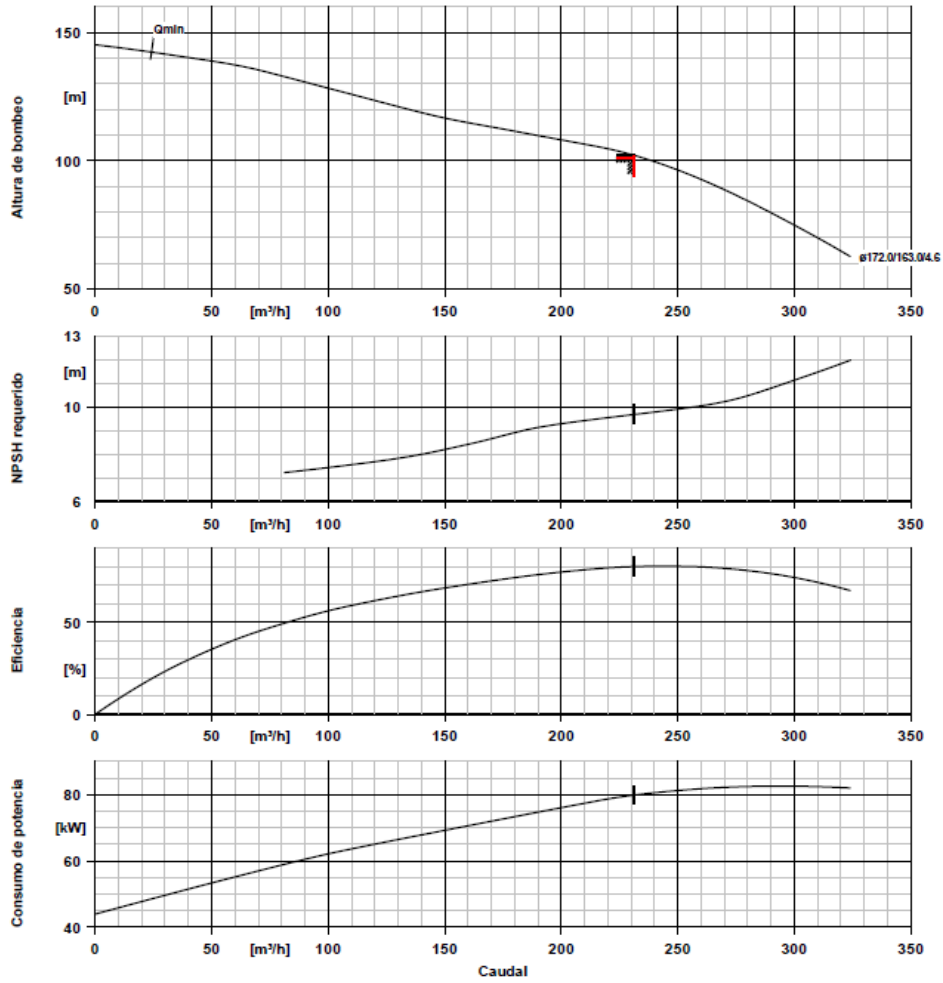


Figura 33: Curvas características de las bombas de captación proporcionadas por KSB.

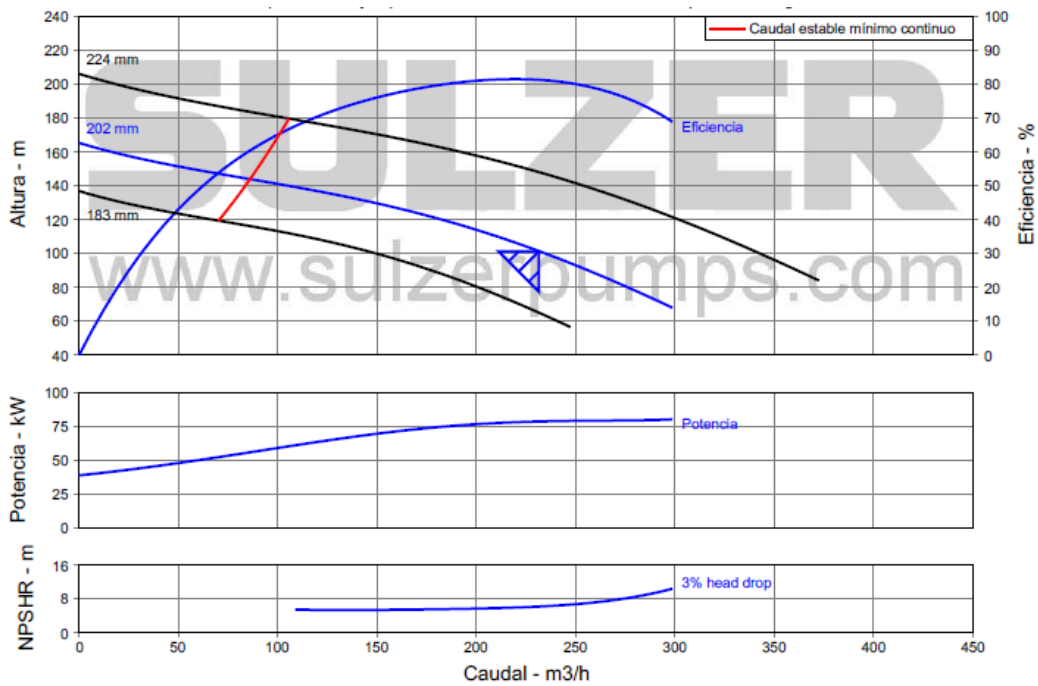


Figura 34: Curvas características de las bombas de captación proporcionadas por Sulzer.

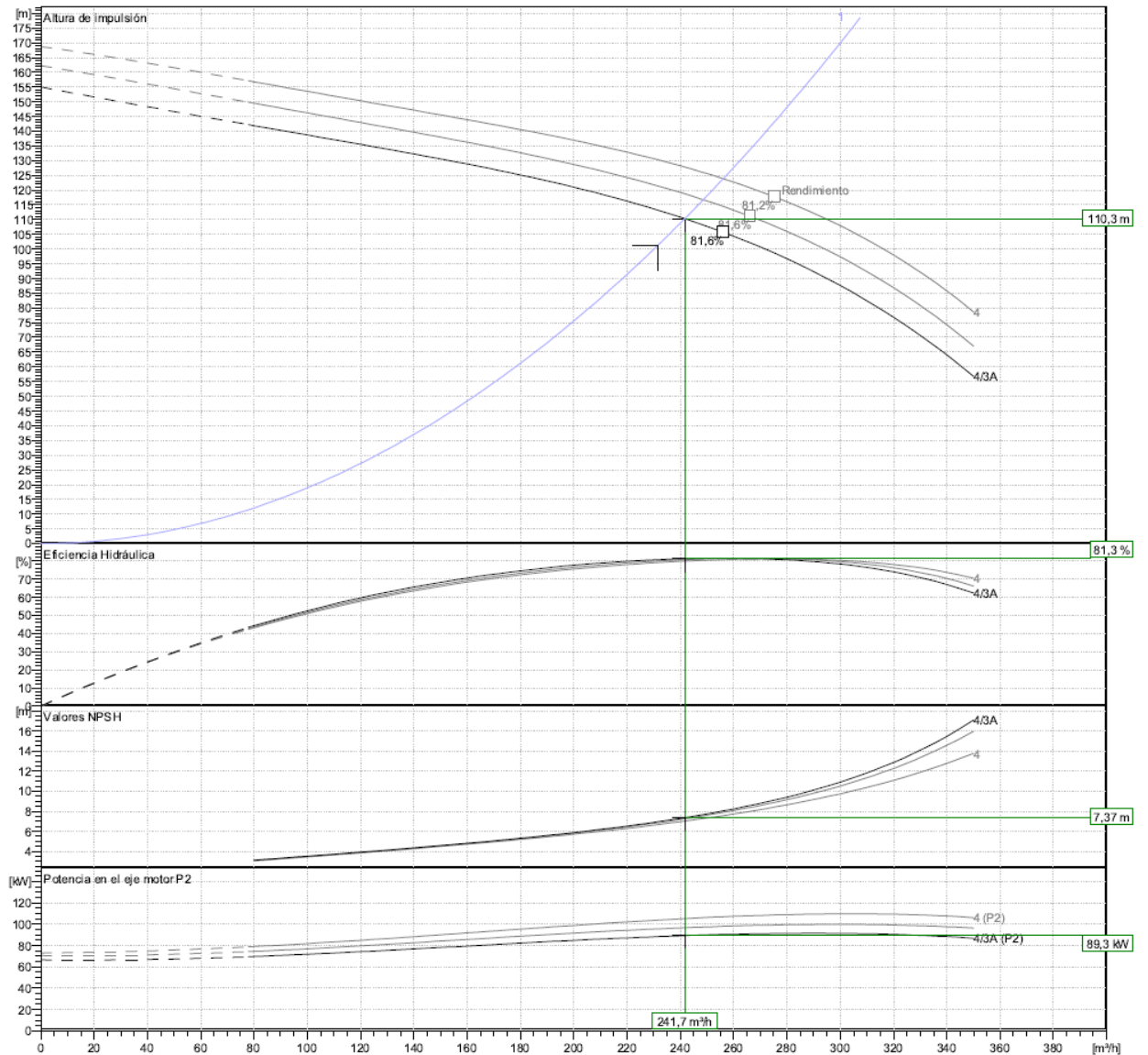


Figura 35: Curvas características de las bombas de captación proporcionadas por Lowara.

A continuación se muestra un cuadro resumen de las características de la bomba seleccionada, que ha sido la del fabricante Sulzer, ya que aunque los rendimientos son similares a los del fabricante Lowara su potencia es menor. En cuanto al consumo específico, se considera aceptable, el consumo en este caso es muy variable porque depende del tipo de bomba, altura de elevación, etc., pero en instalaciones de agua de mar suele representar entre un 0,35 y 0,7 kWh/m<sup>3</sup> de agua producto según la bibliografía consultada.

Sistema	Bombas de captación
Fabricante	Sulzer
Modelo	SJT-11LC
Eficiencia	81,3%
NPSHr requerido	6,22 m
Potencia	78,51 kW
Consumo específico	0,75 kWh/m <sup>3</sup>

Tabla 23: Datos de bombas de captación seleccionadas.

#### 1.4.4 Bomba de distribución

El caudal de distribución es conocido ( $208,33 \text{ m}^3/\text{h}$ ) y la altura manométrica se calcula teniendo en cuenta las mismas hipótesis que para las bombas de captación y con los datos siguientes:

- Diferencia de cota ( $z_{\text{out}} - z_{\text{in}}$ ): 51 m
- Pérdidas de carga totales ( $H_r$ ): 2,8871 m
- Diferencia de presiones ( $P_{\text{out}} - P_{\text{in}}$ ): 0 bar.

En este caso la altura manométrica depende solo de la diferencia de cota y de las pérdidas de cargas, tanto en la tubería como en los accesorios, ya que debido a las características del sistema de distribución y a que el depósito es un depósito abierto la variación de energía de presión es nula.

$$H_{\text{captación}} = 53,89 \text{ m}$$

A continuación, se estudian los parámetros relevantes de las bombas de mayor eficiencia y sus curvas características.

Fabricante	Modelo	Eficiencia
KSB	Omega 100-375 A	75,8%
Sulzer	A21-80 O	78,5 %
Lowara	MP 125.2/1B-A-5502	73,3%

Tabla 24: Datos significativos de las bombas de distribución consideradas.

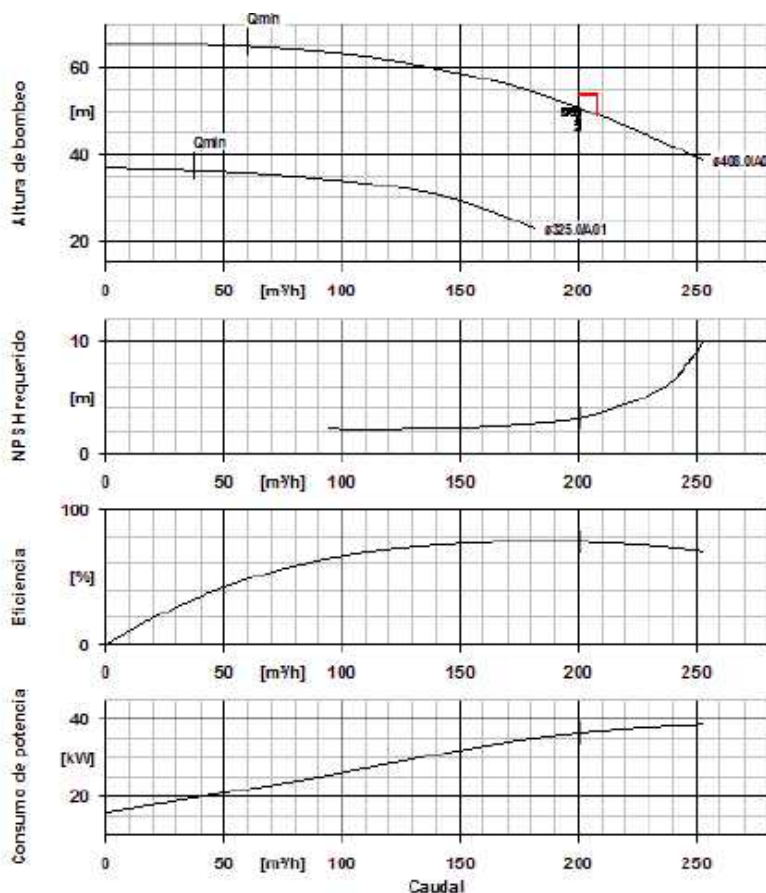


Figura 36: Curvas características de la bomba de distribución proporcionadas por KSB.

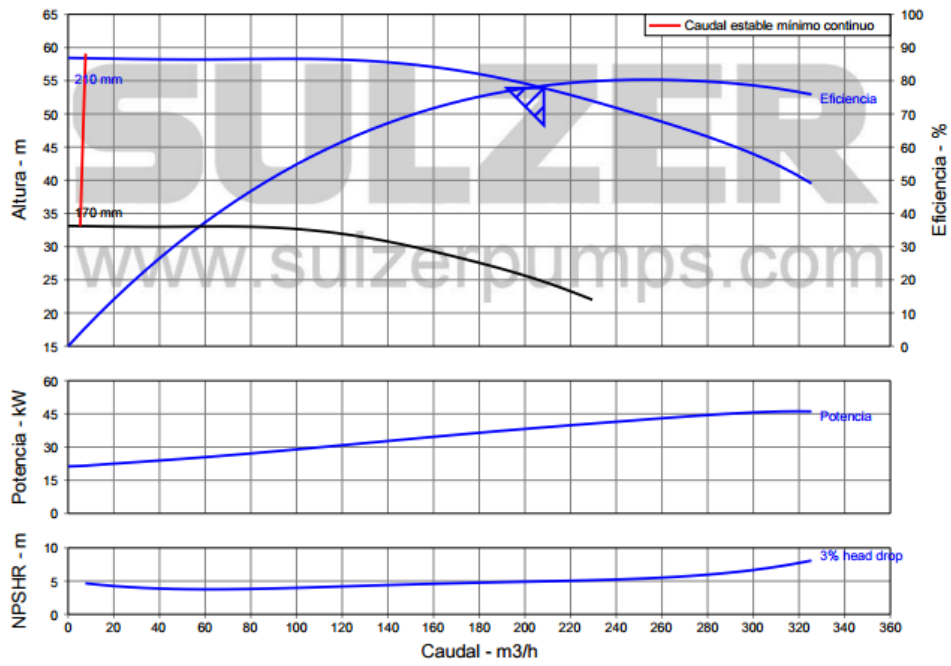


Figura 37: Curvas características de la bomba de distribución proporcionadas por Sulzer.

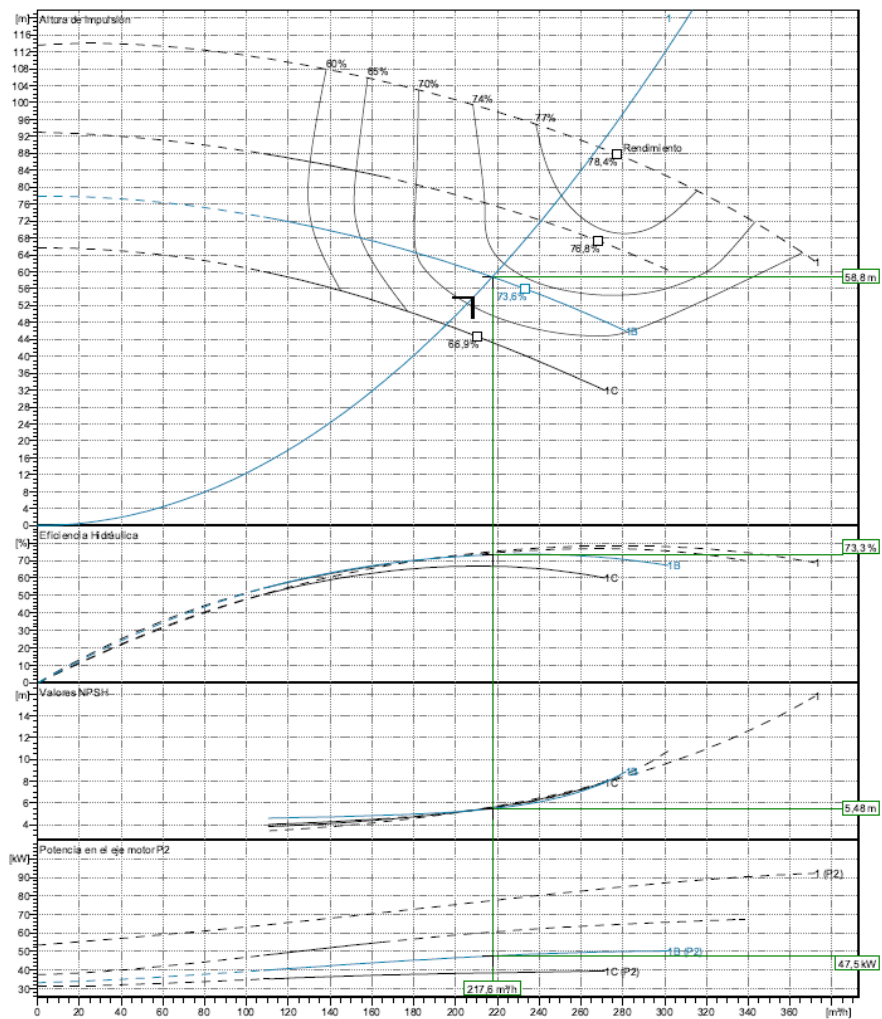


Figura 38: Curvas características de la bomba de distribución proporcionadas por Lowara.

A continuación se muestra un cuadro resumen de las características de la bomba. Por lo general, se comprende que las condiciones de impulsión pueden ser muy variables y los consumos específicos pueden ser tan diferentes como 0,2 o 1 kWh/m<sup>3</sup>, en el caso de esta instalación se aproxima a 0,2 kWh/m<sup>3</sup>.

Sistema	Bomba de distribución
<b>Fabricante</b>	Sulzer
<b>Modelo</b>	A21-80 O
<b>Eficiencia</b>	78,49 %
<b>NPSHr requerido</b>	4,97 m
<b>Potencia</b>	38,89 kW
<b>Consumo específico</b>	0,187kWh/m <sup>3</sup>

Tabla 25: Datos de bomba de distribución seleccionada.

#### 1.4.5 Bomba de rechazo

En esta sección, se comprueba si es necesario colocar una bomba para el transporte del caudal de rechazo de salmuera, este tiene un valor de 255 m<sup>3</sup>/h y la altura manométrica se calcula de igual modo que para la bomba anterior.

- Cota de salida ( $z_{out}$ ): -11 m
- Cota de entrada ( $z_{in}$ ): 55 m
- Pérdidas de carga totales ( $H_r$ ): 4,4671m
- Presión que se debe obtener ( $P_{out}$ ): 1,1 bar.
- Presión de entrada ( $P_{in}$ ): 1,4 bar.

La presión de salida se estima con la profundidad del emisario, sabiendo que 1 bar equivale a 10 metros columna de agua, por lo que a un fondo de 11 m equivale a 1,1 bar, y la presión de entrada es un dato extraído del Excel del intercambiador de presión. Por tanto la altura manométrica es:

$$H_{rechazo} = -59,59 \text{ m}$$

Con este resultado se comprueba que no es necesario la colocación de una bomba, que el resultado sea negativo implica que no es necesaria ninguna bomba de rechazo ya que con la diferencia de cota es suficiente.

#### 1.4.6 Resumen de bombas principales del proceso

Por último, se muestra un resumen de las bombas principales del sistema y sus características relevantes.

Bomba	Fabricante	Modelo	Eficiencia	Potencia
<b>Alta presión</b>	Sulzer	MSD 4x6x10.5C	79,3 %	489 kW
<b>Booster</b>	KSB	Etanorm 150-125-250	85,8 %	13,88 kW
<b>Captación (x2)</b>	Sulzer	SJT-11LC	81,3 %	78,51 kW
<b>Distribución</b>	Sulzer	A21-80 O	78,49 %	38,89 kW

Tabla 26: Cuadro resumen bombas principales de la instalación.

### 1.5 Dimensionado del pretratamiento

El pretratamiento es una de las partes más importantes del proceso de desalación ya que este condiciona los costes de mantenimiento y explotación de la planta. El principal objetivo de esta etapa es impedir el deterioro precoz de los equipos de la EDAM, para ello se deben ajustar las características físicas, químicas y biológicas del agua, para impedir entre

otras cosas la formación de incrustaciones o la corrosión. Por tanto, el pretratamiento puede diferenciarse en: pretratamiento físico y pretratamiento químico, en este proyecto el dimensionado del pretratamiento no se realiza de forma exhaustiva ya que este queda fuera del ámbito del proyecto, pero si se nombran las fases que se deben tener en cuenta.

#### 1.5.1 Pretratamiento físico

El agua de mar en esta EDAM es captada mediante pozos, con este tipo de captación y debido a la acción filtrante del terreno el agua recogida suele ser más limpia y sin grandes sustancias.

Partiendo de esto, se decide colocar como primera fase del pretratamiento físico filtros de arena, ya que como se ha discutido en el apartado de análisis de soluciones se considera la mejor opción, en esta etapa el agua pasa por una tubería de filtros que retiene la mayor parte de las partículas en suspensión, por lo general estas tuberías tienen una boquilla filtrante de 0,5 mm de paso, que crean un falso fondo dejando pasar el agua pero no la arena; como segunda etapa en la preparación del agua, imprescindible en procesos con membranas de ósmosis inversa se deben colocar filtros de cartucho, estos garantizan que no lleguen partículas a las membranas de ósmosis inversa, comúnmente estos filtros tienen una capacidad de retención igual o mayor a 5 micras.

En resumen, para la preparación física del agua en esta planta se utilizan filtros de arena como primer paso y filtros de cartucho en segundo lugar. Existen diversos fabricantes de estos filtros, algunos tales como: Lenntech, 3M, Pure Aqua, etc. Para un completo dimensionado de esta fase se debería elegir el modelo de cartuchos adecuado y la cantidad de estos, lo cual dependerá de las exigencias del fabricante de las membranas.

Cada filtro tiene asociado una cierta pérdida de presión, cuando esta pérdida alcance un determinado valor límite se debe realizar el cambio de cartuchos, como no se hace una selección de los cartuchos no se puede conocer este valor, por lo que se estima en 2,5 bar y son las pérdidas de carga que se tienen en cuenta asociadas al pretratamiento.

#### 1.5.2 Pretratamiento químico

El pretratamiento químico está destinado a evitar la precipitación de óxidos metálicos o sales minerales en las membranas.

En primer lugar se efectúa una corrección del pH para ajustarlo a las necesidades del tratamiento, esto se realiza mediante la dosificación de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) con una concentración del 100% antes del filtro de cartucho con la finalidad de que se realice una acidificación del agua de mar, con esto además se evita la precipitación del carbonato cálcico ya que la disminución del pH aumenta la solubilidad de esta sal.

Además, se debe controlar otros valores tales como la saturación de sulfato de bario ( $BaSO_4$ ) y fluoruro cálcico ( $CaF_2$ ), estas sales son poco solubles por lo que se considera necesario recurrir a un dispersante para impedir su precipitación.

Estos productos químicos son ofertados por diversos fabricantes como los nombrados en el pretratamiento físico, se tendría que hacer un estudio de los existentes en el mercado y decidir el idóneo, pero esto es una aproximación del pretratamiento químico, además con un estudio más pormenorizado quizás se considere necesario la dosificación de coagulantes o de antiincrustantes, pero como ya se ha comentado el pretratamiento no es un ámbito a estudiar en este proyecto.

## 1.6 Dimensionado del postratamiento

El agua para consumo humano según la normativa vigente debe tener un valor de pH comprendido entre 6,5 y 9,5, el agua de permeado resultado de la planta desaladora tiene un pH bajo de 5,3 y que no cumple con estos valores por lo que este debe ser reajustado. Además el agua puede tener un nivel de calcio bajo y baja alcalinidad, debido al elevado rechazo de estos iones por las membranas, por tanto, es un agua desequilibrada, su estabilización puede conseguirse mediante varios procedimientos:

- Descarbonatación o desgasificación: con este método se consigue reducir el CO<sub>2</sub> a menos de 10 m/l y el pH queda en 6-6,5, si el contenido en CO<sub>2</sub> del permeado es bajo no necesita el desgasificador.
- Adición de productos químicos: se suele emplear cal, CO<sub>3</sub>Ca, NaOH o Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, aunque con los dos últimos productos químicos, se estabiliza el pH pero por la ausencia de calcio no se garantiza que el agua no sea corrosiva, por lo que debe agregarse un inhibidor de la corrosión que proteja los materiales. En el caso de realizarse esta técnica podrían consultarse los fabricantes anteriormente mencionados: Lenntech, 3M, Pure Aqua, etc.
- Mezclas con otras aguas: donde el agua desalada suponga al menos un 10% de la composición

Esta última opción parece el método más idóneo, ya que solo se necesita combinar el agua desalada con otra, pero se debe conocer más sobre las necesidades de esta fase para poder adoptar la solución más adecuada.

## 1.7 Dimensionado del consumo energético de la planta

Consumo de la planta	Potencia (kW)
Bomba de alta presión	489
Bomba Booster	13,88
Bombas de captación	157,02
Bomba de distribución	38,89
<b>Potencia consumida total</b>	<b>698,79</b>

Tabla 27: Potencia consumida por la planta.

<b>Energía total en una hora</b>	698,79 kWh
<b>Energía total al día</b>	16770,96 kWh/día
<b>Energía total al año</b>	6121400,4 kWh/año

Tabla 28: Consumo energético de la planta.

<b>Consumo específico</b>	3,35 kWh/m <sup>3</sup>
---------------------------	-------------------------

Tabla 29: Consumo específico de la planta.

Según datos del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, actualmente las plantas desaladoras de agua poseen unos valores de consumos energéticos de entre 4,5 y 5 kWh/m<sup>3</sup>, pero este consumo se considera mejorable, de hecho se están realizando retrofits o regulaciones en algunas plantas actuales con el fin de optimizar el consumo y llegar a un valor de 3 kWh/m<sup>3</sup>. Por tanto, como conclusión, el consumo energético de la planta desaladora de agua objeto de este proyecto es considerado un valor óptimo.



# ANEXO II

## Dimensionado del sistema eólico



## 2. Dimensionado del sistema eólico

En este anexo se detalla el proceso llevado a cabo para el dimensionamiento del sistema eólico, sistema del cual se abastecerá la planta desaladora de agua.

### 2.1 Recurso eólico

Primeramente, se estudia las condiciones eólicas que se tienen en la ubicación de la EDAM, para ello se consulta la página web del Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) en esta se encuentra el Atlas Eólico de España. En este mapa se encuentra la ubicación del punto más cercano de medición del viento a la planta desaladora y se selecciona visualizar los datos referente a la capa 2,5 km - rosas de viento a 80 m, ya que a esta altura el viento suele ser más intenso y homogéneo.

Se obtienen datos direccionales, en concreto: la frecuencia anual (porcentaje de horas que el viento sopla en una dirección), velocidad media (como una fracción de la velocidad media en todas las direcciones), potencia media y parámetros C y K de Weibull, tal y como se muestra en la siguiente figura.

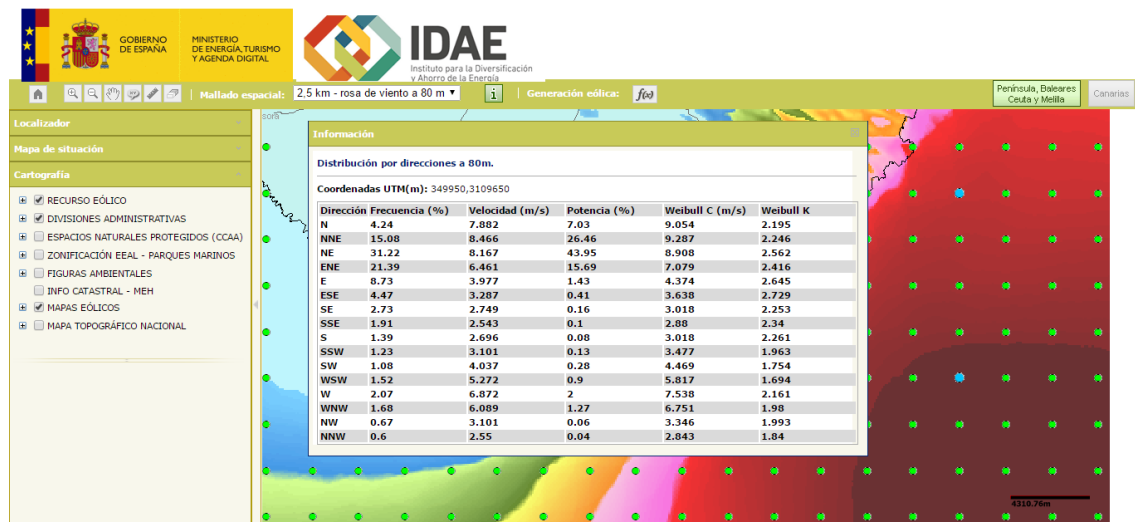


Figura 39: Datos eólicos a 80 m en punto más cercano a la EDAM. (Fuente: IDAE)

En la siguiente tabla, se muestran estos datos para que se puedan analizar con más claridad. Además, a partir de estos se construye un diagrama de coordenadas polares, rosa de los vientos, en este se representa la frecuencia con la que sopla el viento en cada dirección y la velocidad que predomina en cada una de ellas, a través de este estudio se puede determinar la orientación más adecuada para los aerogeneradores.

Dirección	Frecuencia (%)	Velocidad (m/s)	Potencia (%)	Weibull C (m/s)	Weibull K
N	4,24	7,882	7,03	9,054	2,195
NNE	15,08	8,466	26,46	9,287	2,246
NE	31,22	8,167	43,95	8,908	2,562
ENE	21,39	6,461	15,69	7,079	2,416
E	8,73	3,977	1,43	4,374	2,645
ESE	4,47	3,287	0,41	3,638	2,729
SE	2,73	2,749	0,16	3,018	2,253
SSE	1,91	2,543	0,1	2,88	2,34
S	1,39	2,696	0,08	3,018	2,261

<b>SSW</b>	1,23	3,101	0,13	3,477	1,963
<b>SW</b>	1,08	4,037	0,28	4,469	1,754
<b>WSW</b>	1,52	5,272	0,9	5,817	1,694
<b>W</b>	2,07	6,872	2	7,538	2,161
<b>WNW</b>	1,68	6,089	1,27	6,751	1,98
<b>NW</b>	0,67	3,101	0,06	3,346	1,993
<b>NNW</b>	0,6	2,55	0,04	2,843	1,84

Tabla 30: Datos eólicos a 80 m en punto más cercano a la EDAM. (Fuente: IDAE)

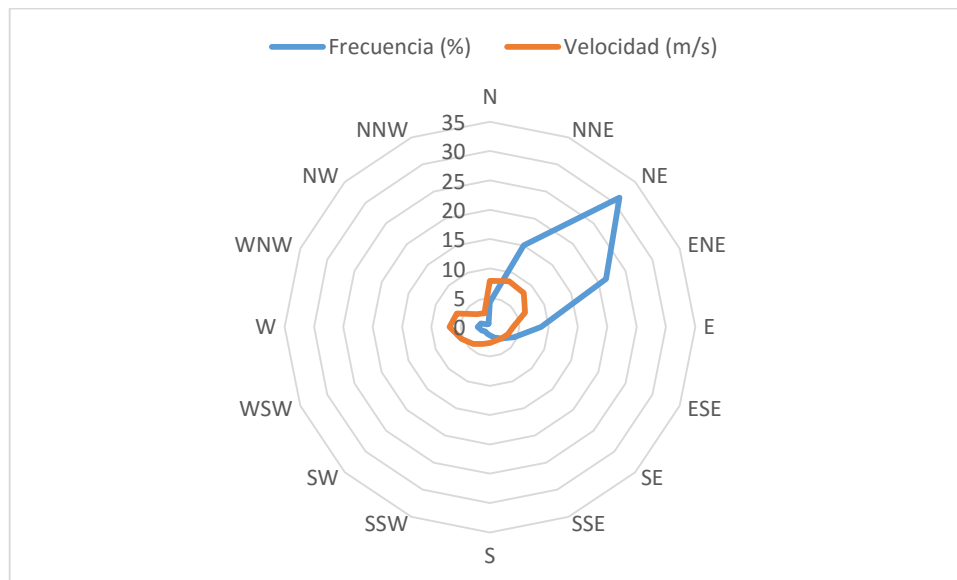


Figura 40: Rosa de los vientos de frecuencias y velocidades en la ubicación de la EDAM.

Por tanto la dirección predominante en este punto es la dirección Noreste, es la dirección de aprovechamiento óptimo del recurso eólico hacia donde se orienta el aerogenerador.

Ahora se va a estudiar la distribución de probabilidades, es decir, la probabilidad de que la velocidad esté en un rango determinado de velocidades, se hace a través de la distribución de Weibull  $f(v)$ , la cual se calcula a partir de la ecuación 8.

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-(v/c)^k}$$

Ecuación 8: Distribución de Weibull.

Para conocer esta distribución de una manera fácil se hace uso de la herramienta Excel con la ayuda de la función distribución de Weibull, pero para esto es necesario conocer los parámetros de forma y escala ( $k$  y  $c$ ). Estos parámetros definen la forma de la distribución y cuán dispersa se encuentra, pueden ser calculados por diversos métodos, consultando el artículo *Comparación de métodos para determinar los parámetros de Weibull para la generación de energía eólica*, de la Universidad de Pamplona, Colombia, se ha decidido calcular estos mediante el método de máxima probabilidad, en este método se utilizan las siguientes expresiones.

$$k = \left( \frac{\sum_{i=1}^N v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^N v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(v_i)}{N} \right)^{-1}$$

Ecuación 9: Parámetro de forma en distribución de Weibull.

$$c = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^k \right)^{1/k}$$

Ecuación 10: Parámetro de escala en distribución de Weibull.

Donde N representa el número de observaciones y  $v_i$  la velocidad del viento promedio registradas en ese intervalo de tiempo. Por tanto, usando estas dos ecuaciones se obtienen los siguientes valores:

- Parámetro de forma (k): 2,46
- Parámetro de escala (c): 4,82 m/s

Además de la frecuencia de cada velocidad del viento, se obtiene el número de horas al año que se dispondrá de dicha velocidad multiplicando la frecuencia por el número de horas de un año.

Velocidad (m/s)	f(v)	f(v) %	horas/año
0	0,0000	0,0000	0,00
1	0,0620	6,2011	54321,22
2	0,6150	61,4994	538734,68
3	0,3093	30,9270	270920,19
4	0,0004	0,0369	322,99
5	0,0000	0,0000	0,00

Tabla 31: Frecuencias de velocidades según Weibull y horas al año que ocurren esas velocidades.

La siguiente figura es una representación gráfica de la distribución de velocidades, como se puede observar los vientos que se generan con mayor frecuencia en este punto tienen una velocidad de 2 m/s.

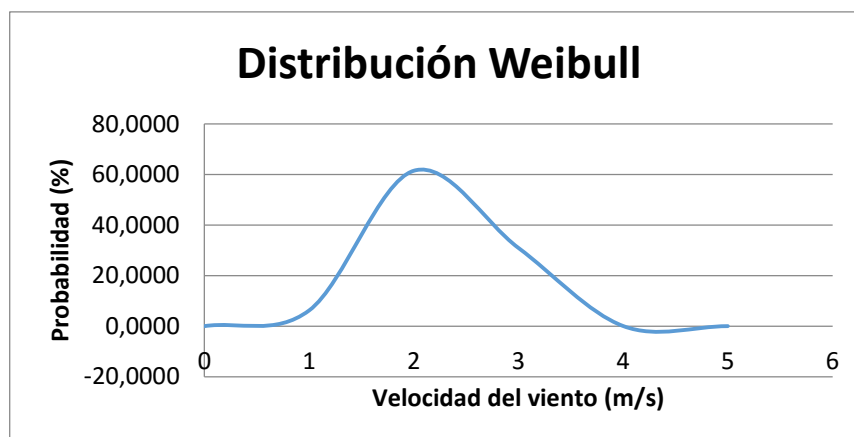


Figura 41: Distribución de velocidades.

## 2.2 Selección del aerogenerador

Para la selección del aerogenerador se utiliza la herramienta web proporcionada por el Instituto Tecnológico de Canarias, a través de ella se puede conocer la energía anual estimada producida por los diferentes aerogeneradores que tiene en su base de datos mediante sus curvas de potencia. En primer lugar, se debe introducir las coordenadas UTM de la instalación, las cuales se muestran a continuación.

<b>X</b>	352163
<b>Y</b>	3107662

Tabla 32: Coordenadas UTM de la EDAM.

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

Posición (UTM)

X =

Y =

Limites R.E.C  
[170550, 677550]  
[3040750, 3274850]

Aerogenerador

Modelo:

Curva de potencia:

Altura (m):

Coord X (UTM):  
Coord Y (UTM):  
Tomo detalle numérico:  
Aerogenerador:  
Altura:  
Cte K de Weibull :  
Velocidad viento :  
Dirección predominante del viento:

Energía anual estimada:  
Potencia anual:  
Horas anuales equivalentes:

Figura 42: Herramienta web para la selección del aerogenerador ofrecida por ITC.

Actualmente no todos los modelos de aerogeneradores que ofrece la herramienta del ITC están disponibles, por eso se consulta la página web The Wind Power. Esta es una base de datos mundial sobre turbinas eólicas y parques eólicos, contiene datos relacionados con parques eólicos, turbinas, fabricantes, desarrolladores, operadores y propietarios, mediante esta es posible detectar que modelos que aparecen en la página del ITC son modelos antiguos o en baja producción y cuales se fabrican en la actualidad.

Fabricante	Modelo
Enercon	E101/3050
	E48/800
	E82/2000
	E70/2300
Gamesa	G80/2000
	G87/2000
	G90/2000
Nordex	N90/2500
Siemens	SWT-3.0-101
Turbowind	T600-48
Vestas	V90/2000
	V90/3000

Tabla 33: Modelos actuales de aerogeneradores. (Fuente: The Wind Power)

Una vez conocidos los modelos actuales de aerogeneradores se estudian estos mediante la aplicación del ITC para conocer la energía anual estimada que son capaces de generar a una altura de 80 m, los resultados para cada uno de ellos se muestran en esta tabla.

Fabricante	Modelo	Energía anual estimada (kWh)
Enercon	E101/3050	10385514,6
	E48/800	2564163,7
	E82/2000	7002223,6
	E70/2300	6144865,4
Gamesa	G80/2000	6130380,5
	G87/2000	6849948,6
	G90/2000	7150779,1
Nordex	N90/2500	7797926,4
Siemens	SWT-3.0-101	9994897,3
Turbowind	T600-48	1963741,8
Vestas	V90/2000	7112866
	V90/3000	8396890,1

Tabla 34: Energía anual estimada para los distintos aerogeneradores estudiados. (Fuente: ITC)

Los aerogeneradores cuya producción se ajusta mejor al consumo de la planta son el modelo G80/2000 de la marca Gamesa y el modelo E70/2300 de la marca Enercon, ya que la energía consumida por la planta anualmente se recuerda que es:

$$Energía consumida por año = 698,79 \text{ kW} \cdot 365 \text{ días} \cdot \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}}$$

$$Energía consumida por año = 6121400,4 \text{ kWh}$$

Además de esto se estudia el segundo criterio, el factor de carga es el cociente entre la energía real generada durante un período, generalmente anual y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante ese mismo período, conforme a los valores nominales de los equipos, es un indicador de la utilización de la capacidad de la planta en el tiempo. En función del valor de este factor se puede clasificar el comportamiento de un aerogenerador, la tabla 35 muestra esta calificación según el criterio que expone Miguel Villarubia López en el libro Ingeniería de la Energía Eólica.

$$FC(\%) = \frac{\text{Producción anual (kW)}}{\text{Potencia nominal (kW)}} \cdot 100$$

Ecuación 11: Factor de carga.

Factor de carga	Calificación
Menor al 20%	Inaceptable
Entre 20%-25%	Aceptable
Entre 25%-30%	Bueno
Entre 30%-40%	Muy bueno
Entre 40%-50%	Excelente
Mayor al 50%	Extraordinario

Tabla 35: Criterio de calificación según el factor de carga.

En la siguiente tabla se muestra este factor de carga así como su evaluación según este criterio, además de la potencia nominal de cada aerogenerador estudiado y la producción anual de los mismos, la cual se calcula mediante la ecuación 10.

$$\text{Producción anual (kW)} = \frac{\text{Energía anual (kWh)}}{365 \cdot 24}$$

Ecuación 12: Producción anual de un aerogenerador.

Fabricante	Modelo	Producción anual (kWh)	Potencia nominal (kW)	Factor de carga (%)	Calificación
Enercon	E101/3050	1185,56	3050	38,87	Muy bueno
	E48/800	292,71	800	36,59	Muy bueno
	E82/2000	799,34	2000	39,97	Muy bueno
	E70/2300	701,47	2300	30,5	Muy bueno
Gamesa	<b>G80/2000</b>	<b>699,82</b>	<b>2000</b>	<b>34,99</b>	<b>Muy bueno</b>
	G87/2000	781,96	2000	39,1	Muy bueno
	G90/2000	816,3	2000	40,81	Excelente
Nordex	N90/2500	890,17	2500	35,61	Muy bueno
Siemens	SWT-3.0-101	1140,97	3000	38,03	Muy bueno
Turbowind	T600-48	224,17	600	37,36	Muy bueno
Vestas	V90/2000	811,97	2000	40,6	Excelente
	V90/3000	958,55	3000	31,95	Muy bueno

Tabla 36: Producción anual, potencia nominal, factor de carga y calificación de los aerogeneradores estudiados.

Por ende, de las opciones anteriores observamos que el aerogenerador G80/2000 es la mejor elección ya que es el que más se acerca a la producción de energía necesaria para la desalación de agua y además presenta un factor de carga muy bueno, por lo que será el que se utilice para la estación desaladora.

A continuación se muestran las características principales del aerogenerador seleccionado, así como su curva de potencia, que es un gráfico donde se indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades del viento.

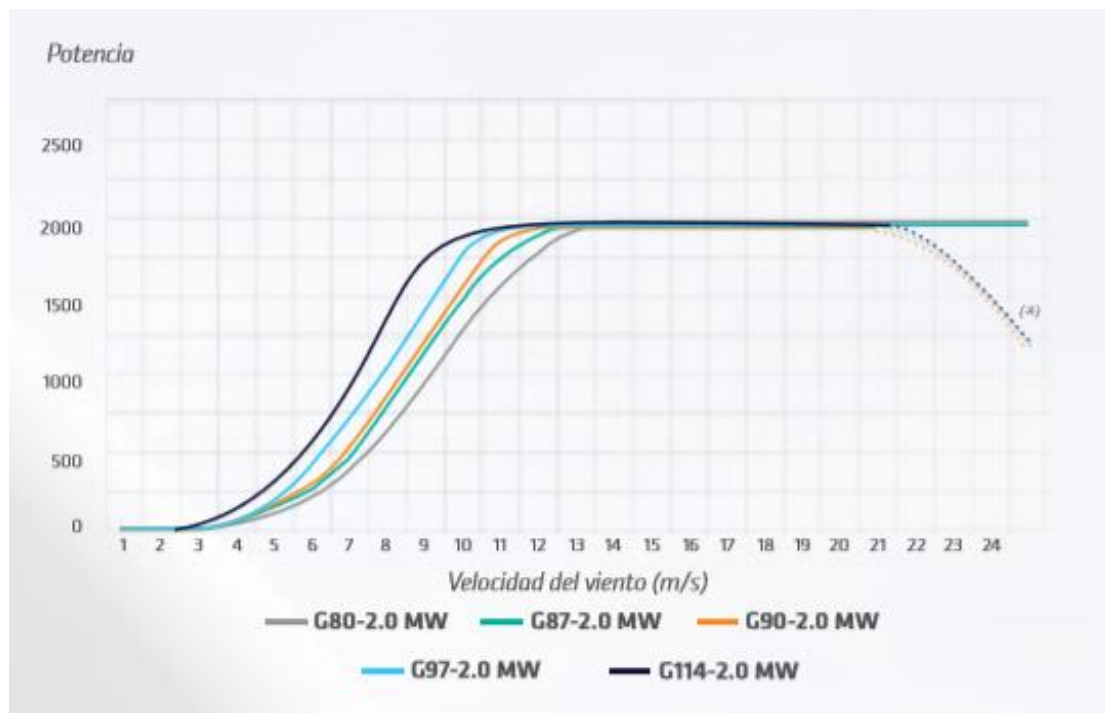


Figura 43: Curva de potencia del aerogenerador seleccionado (Fuente: Gamesa).



<b>GAMESA 2.0 MW</b>	<b>G80/2000</b>
<b>ROTOR</b>	
Diámetro	80 m
Área de barrido	5027 m <sup>2</sup>
Velocidad de giro	9-19 rpm
<b>PALAS</b>	
Número de palas	3
Longitud	39 m
Perfil	NACA 63 XXX + FFA-W3
Material	Fibra de vidrio preimpregnado de resina epoxy
<b>TORRE</b>	
Tipo	Modular
Altura	60, 67, 78 y 100 m
<b>MULTIPLICADORA</b>	
Tipo	1 etapa planetaria 2 etapas de ejes paralelos
Ratio	1:100,5 (50 Hz) 1:120,5 (60 Hz)
<b>GENERADOR</b>	
Tipo	Generador doblemente alimentado
Potencia nominal	2.0 MW
Tensión	690 V AC
Frecuencia	50 Hz/60 Hz
Clase de protección	IP 54

Tabla 37: Datos del aerogenerador seleccionado (Fuente: Gamesa).

# ANEXO III

## Aprovechamiento de energía



### 3. Aprovechamiento de energía

En este anexo se va a realizar un estudio básico de las opciones de aprovechamiento de la energía que se consideran más factibles, este estudio es tan solo una primera aproximación, en el caso de elegir alguna de las iniciativas se deberá realizar un análisis más exhaustivo.

#### 3.1 Balance energético

Para empezar, se hace un balance de la energía, en el cual se tiene en cuenta el consumo de los elementos primarios de la planta desaladora y la energía producida por el aerogenerador, para distintos intervalos de tiempo; de este modo, se conoce la energía sobrante, energía disponible para el estudio de aprovechamiento.

	Energía consumida por la planta	Energía producida por el aerogenerador	Energía sobrante
<b>Por hora (kWh)</b>	698,79	699,82	1,03
<b>Por día (kWh/día)</b>	16770,96	16795,56	24,6
<b>Por año (kWh/año)</b>	6121400,4	6130380,5	8980,1

Tabla 38: Balance energético del sistema.

#### 3.2 Sistema de generación y acumulación de energía en forma de hidrógeno

Las alternativas de aprovechamiento de energía que se han estudiado en el apartado de análisis de soluciones son, por un lado, un sistema de generación de hidrógeno, mediante un electrolizador, donde se pueda volver a convertir el hidrógeno en electricidad cuando sea necesario, a través de pilas de combustible, o bien se comercialice con el hidrógeno producido; y por otro lado, la conexión a la red eléctrica para verter la energía sobrante, y cobrar estos vertidos en el caso de que fuese posible. A continuación, se presentan un modelo de electrolizador y de pila de combustible que podría ser utilizado para este fin.

##### 3.2.1 Electrolizadores

Como ya se ha estudiado, el electrolizador idóneo para este uso es de tipo PEM, el fabricante Quintech ofrece diversos modelos de estos, estos se enumeran en la siguiente tabla además de mostrar los datos de potencia, producción de hidrógeno y de oxígeno de cada uno.

Modelo	Potencia (W)	Producción H <sub>2</sub> (l <sub>N</sub> /min)	Producción O <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /min)
QT-HG-200	220	0,2	0,1
QT-HG-400	280	0,4	0,2
QT-HG-1500	700	1,5	0,75
QT-HG-3000	1100	3	1,5
QT-HG-5000	1700	5	2,5
QT-HG-16	4600	16	8
QT-HG-24	7300	24	12

<b>QT-HG-32</b>	9800	33	16
-----------------	------	----	----

**Tabla 39: Modelos de electrolizadores ofrecidos por Quintech.**

La energía sobrante que se puede aprovechar es 1,03 kWh, si por aproximación se elige el electrolizador QT-HG-3000 cuya potencia es 1,1 kW, teniéndolo conectado una hora se puede producir 3 l<sub>N</sub>/min, lo que es igual a 0,18 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h, es decir unos 180 litros/h.

### 3.2.2 Pilas de combustible

Se realiza una búsqueda de pilas de combustible tipo PEM, ya que son las más idóneas para este sistema, para aplicaciones estacionarias que puedan usar hidrógeno y cuyo estado sea comercial, para esta investigación una de las páginas web consultadas es la de la Asociación Española de Pilas de Combustible (APPICE); los resultados obtenidos son los siguientes:

<b>Pila de combustible</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Combustible</b>	<b>Potencia eléctrica</b>
<b>FuelCell Energy Inc.</b>	Grandes aplicaciones	Combustible flexible	1,5-4 MW
<b>IdaTech ElectraGen H2-I System</b>	Alimentación de telecomunicaciones, etc.	Hidrógeno	2,5-5 kW
<b>Quintech Io500</b>	Alimentación eléctrica, de apoyo, etc.	Hidrógeno (99,9 %)	500 W
<b>Quintech Jupiter</b>	Alimentación eléctrica, de apoyo, etc.	Hidrógeno (99,9 %)	0,5-40 kW
<b>APERION ENERGY SYSTEMS</b>	Sistemas de recuperación	Borohidruro sódico o hidrógeno	100 W-1 kW
<b>BALLARD - Nexa</b>	Aplicación residencial	Hidrógeno (99,99 %)	1,2 kW
<b>BALLARD – Unidad Alpha Residencial</b>	Aplicación residencial	Hidrógeno (99,99 %)	5 kW
<b>HYDROGENICS HyPM</b>	Aplicación estacionaria	Hidrógeno (99,99 %)	10-50 kW
<b>IdaTECH</b>	Sistema de emergencia	Hidrógeno (99,99 %)	1-10 kW
<b>ReliOn</b>	Sistema de emergencia	Hidrógeno (99,95 %)	500 W-5 kW

**Tabla 40: Resultados de la búsqueda de pilas de combustible comerciales.**

De estas opciones, una pila apta para este proyecto podría ser la pila Jupiter del fabricante Quitech ya que su potencia entra dentro del rango que se necesita. Algunas de las características de esta pila se detallan seguidamente.

- Escalable: potencia nominal entre 0,5 - 40 kW, con una unidad de control.
- Suministro de aire eficiente: sin líquidos, sin bombas ni intercambiadores de calor.
- Manejo frontal fácil.
- Instalación y mantenimiento sencillos.
- Emisiones y nivel de ruido producido bajos.
- Alta eficiencia.

<b>Fuel cell type:</b>	PEM
<b>Nominal voltage:</b>	48,0 VDC
<b>Voltage range:</b>	40,5 VDC to 57,0 VDC
<b>Max. power:</b>	up to 50 kW peak
<b>Nominal current:</b>	up to 1000 A
<b>Response time:</b>	uninterrupted
<b>Energy storage:</b>	customer specific
<b>Fuel:</b>	hydrogen 99,9%
<b>Fuel consumption:</b>	11 slpm/kW
<b>Hydrogen supply pressure:</b>	10 bar
<b>Cooling:</b>	air
<b>Environmental temperature:</b>	0 °C to 45 °C
<b>Operating life:</b>	> 3000 h
<b>Max. altitude:</b>	4000 m
<b>Service interface:</b>	Ethernet, Modem
<b>Standards:</b>	designed to meet ETSI 300 019-1-3 class, ETSI 300 132-2
<b>Certification:</b>	EC-2
<b>Certification:</b>	CE
<b>Rectifier:</b>	optional
<b>Inverter:</b>	optional
<b>Smart grid functionality:</b>	optional
<b>Off grid functionality:</b>	optional
<b>Outdoor configuration:</b>	optional

Figura 44: Datos técnicos pila de combustible Jupiter (Fuente: Quitech)