



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

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO
CON ENERGÍA UNDIMOTRIZ PARA CULTIVO EN EL NORTE
DE TENERIFE**

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Sergio Castro González

Tutor: Vicente José Romero Ternero

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

INDICE GENERAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO
CON ENERGÍA UNDIMOTRIZ PARA CULTIVO EN EL NORTE
DE TENERIFE**

Autor: Sergio Castro González

Tutor: Vicente José Romero Ternero

MEMORIA

1. Objeto	1
1.1 Abstract	1
2. Alcance	2
3. Justificación del proyecto	4
4. Antecedentes	5
4.1. Situación hídrica a nivel mundial	5
4.2. Situación hídrica en España	7
4.3. Situación hídrica en Tenerife	8
4.4. Desalación en Canarias y en la isla de Tenerife	9
4.5. Desalación del agua	10
4.6. Desalación por el método de ósmosis inversa	12
4.6.1. Membranas	13
4.6.2. Configuración de una planta de ósmosis inversa	14
4.7. Energía Undimotriz	18
5. Normativa y referencias	23
5.1. Normativa	23
5.2. Bibliografía	23
5.3. Otras referencias	24
5.4. Software de cálculo y herramientas empleadas	25
6. Definiciones y abreviaturas	25

6.1. Definiciones	25
6.2. Abreviaturas	26
7. Requisitos de diseño	27
7.1. Requisitos del peticionario	27
7.2. Situación y Emplazamiento	28
7.3. Datos de partida	33
8. Análisis de soluciones	35
8.1. Capacidad de la planta desaladora	35
8.2. Sistema de captación de agua de mar	38
8.2.1. Pozos de captación	39
8.2.2. Tuberías de captación y alimentación	41
8.2.3. Bombas de captación	43
8.3. Pretratamiento	44
8.4. Núcleo de desalación	45
8.4.1. Bastidor de membranas	45
8.4.2. Bomba de alta presión	48
8.4.3. Intercambiadores de presión	49
8.4.4. Bomba Booster	52
8.5. Postratamiento	53
8.6. Sistema de distribución	54
8.6.1. Tuberías de distribución	55
8.6.2. Bomba de distribución	56

8.7. Sistema de rechazo	57
8.7.1. Tuberías de rechazo	58
8.7.2. Bomba de rechazo	59
8.8. Consumo específico de la planta desaladora	59
8.9. Dimensionado del sistema undimotriz	60
8.9.1. Estudio del recurso undimotriz	61
8.9.2. Selección del sistema undimotriz	63
9. Resultados finales	66
9.1. Esquema de la planta de desalación	66
9.2. Capacidad de la planta desaladora	67
9.3. Ubicación	67
9.4. Sistemas de captación y alimentación	68
9.5. Pretratamiento	68
9.5.1 Pretratamiento físico	68
9.5.2. Pretratamiento químico	69
9.6. Núcleo de desalación	69
9.7. Sistema de distribución	70
9.8. Sistema de rechazo	70
9.9. Sistema undimotriz	70
10. Conclusiones	71
10.1. Conclusions	72

ANEXO I – Dimensionado del sistema de desalación por ósmosis inversa

1. Introducción	1
2. Dimensionado del sistema de desalación.....	1
2.1. Software de dimensionado	1
3. Temperatura del agua de alimentación.....	2
4. Composición del agua de alimentación	4
5. Capacidad de producción de la planta	6
6. Dimensionado del núcleo de membranas	11
6.1. Pretratamiento.....	13
6.1.1. Pretratamiento físico.....	13
6.1.2. Pretratamiento químico	15
6.2. Selección de membranas.....	16
7. Dimensionado del recuperador de energía.....	24
7.1. Turbina Pelton.....	24
7.2. Turbo-charger	25
7.3. Intercambiadores de presión.....	26
7.4. Análisis de resultados.....	27
7.5. Dimensionado del intercambiador de presión.....	28

ANEXO II – Dimensionado de los sistemas de la planta de desalación, tuberías y selección de bombas

1. Introducción	1
2. Dimensionado de los sistemas de captación.....	1
2. 1. Dimensionado de los pozos cerrados de captación	2
2. 2. Dimensionado de las tuberías de captación y de alimentación	6
2. 3. Selección de bombas de captación.....	9
3. Dimensionado de los sistemas del núcleo de desalación	21
3.1. Selección de la bomba de alta presión	21
3.2. Selección de la bomba booster	26
4. Dimensionado del sistema de distribución.....	30
4.1. Dimensionado de las tuberías de distribución	30
4.2. Selección de bomba de distribución.....	32
5. Dimensionado del postratamiento.....	40
6. Dimensionado del sistema de rechazo	40
6.1. Dimensionado de las tuberías de rechazo.....	41
6.2. Selección de bomba de rechazo	42
7. Cálculo del consumo específico final de la planta de desalación	45

ANEXO III – Dimensionado del sistema undimotriz

1. Introducción	1
2. Análisis de la energía undimotriz	1
3. Principios físicos de la energía undimotriz	3
4. Dimensionamiento del sistema undimotriz.....	5
4.1. Estudio del recurso undimotriz	5
4.2. Selección del sistema undimotriz	10
5. Normativa	29

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

MEMORIA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO
CON ENERGÍA UNDIMOTRIZ PARA CULTIVO EN EL NORTE
DE TENERIFE**

Autor: Sergio Castro González

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Hoja de Identificación

Título del Proyecto

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN ALIMENTADO CON ENERGÍA
UNDIMOTRIZ PARA CULTIVO EN EL NORTE DE TENERIFE.

Datos del Peticionario

Razón Social: Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología. Universidad de La Laguna.

Dirección: Camino San Francisco de Paula, s/n Apartado 456. CP 38200. San Cristóbal
de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, España.

Teléfono: +34 922 845 059

Email: esit@ull.es

Datos del Autor

Nombre: Sergio Castro González

NIF: 79070747-J

Datos del Tutor

Nombre: Vicente José Romero Ternero

Fecha

Septiembre 2019

ÍNDICE

1. Objeto	1
1.1 Abstract	1
2. Alcance	2
3. Justificación del proyecto	4
4. Antecedentes	5
4.1. Situación hídrica a nivel mundial	5
4.2. Situación hídrica en España	7
4.3. Situación hídrica en Tenerife	8
4.4. Desalación en Canarias y en la isla de Tenerife	9
4.5. Desalación del agua	10
4.6. Desalación por el método de ósmosis inversa	12
4.6.1. Membranas	13
4.6.2. Configuración de una planta de ósmosis inversa	14
4.7. Energía Undimotriz	18
5. Normativa y referencias	23
5.1. Normativa	23
5.2. Bibliografía	23
5.3. Otras referencias	24
5.4. Software de cálculo y herramientas empleadas	25
6. Definiciones y abreviaturas	25

6.1. Definiciones	25
6.2. Abreviaturas	26
7. Requisitos de diseño	27
7.1. Requisitos del peticionario	27
7.2. Situación y Emplazamiento	28
7.3. Datos de partida	33
8. Análisis de soluciones	35
8.1. Capacidad de la planta desaladora	35
8.2. Sistema de captación de agua de mar	38
8.2.1. Pozos de captación	39
8.2.2. Tuberías de captación y alimentación	41
8.2.3. Bombas de captación	43
8.3. Pretratamiento	44
8.4. Núcleo de desalación	45
8.4.1. Bastidor de membranas	45
8.4.2. Bomba de alta presión	48
8.4.3. Intercambiadores de presión	49
8.4.4. Bomba Booster	52
8.5. Postratamiento	53
8.6. Sistema de distribución	54
8.6.1. Tuberías de distribución	55
8.6.2. Bomba de distribución	56

8.7. Sistema de rechazo	57
8.7.1. Tuberías de rechazo	58
8.7.2. Bomba de rechazo	59
8.8. Consumo específico de la planta desaladora	59
8.9. Dimensionado del sistema undimotriz	60
8.9.1. Estudio del recurso undimotriz	61
8.9.2. Selección del sistema undimotriz	63
9. Resultados finales	66
9.1. Esquema de la planta de desalación	66
9.2. Capacidad de la planta desaladora	67
9.3. Ubicación	67
9.4. Sistemas de captación y alimentación	68
9.5. Pretratamiento	68
9.5.1 Pretratamiento físico	68
9.5.2. Pretratamiento químico	69
9.6. Núcleo de desalación	69
9.7. Sistema de distribución	70
9.8. Sistema de rechazo	70
9.9. Sistema undimotriz	70
10. Conclusiones	71
10.1. Conclusions	72

Índice de figuras

Figura 1. Demanda global de agua por sector para el 2040 (Fuente: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019).....	5
Figura 2. Estimación de población por región (Fuente: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019)	6
Figura 3. Ejemplos de recursos hídricos no convencionales (Fuente: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019)	7
Figura 4. Escorrentía Total Media Anual (Fuente: Ministerio de Fomento. Gobierno de España)	8
Figura 5. Primera planta desaladora ubicada en Lanzarote (Fuente: Canarias7)	9
Figura 6. Procesos de ósmosis directa y ósmosis inversa (Fuente: IndustMarine)	13
Figura 7. Esquema de un tubo colector (Fuente: IndustMarine)	14
Figura 8. Núcleo de desalación con intercambiador de presión (Fuente: Energy Recovery Inc.)	17
Figura 9. Oleaje	18
Figura 10. Representación esquemática de diversos tipos de convertidores de energía del oleaje (Fuente: Jaime González Velasco. (2009). Energías renovables. Barcelona. Reverté)	19
Figura 11. Principio de operación del dispositivo columna de agua oscilante (Fuente: Jaime González Velasco. (2009). Energías renovables. Barcelona. Reverté).	20
Figura 12. Dispositivo Backward Bent Duct Buoy (Fuente: Jaime González Velasco. (2009). Energías renovables. Barcelona. Reverté)	20
Figura 13. Dispositivo Pato de Salter (Fuente: Jaime González Velasco. (2009). Energías renovables. Barcelona. Reverté).....	21

Figura 14. Planta de aprovechamiento de energía del oleaje en Santander (Fuente: Jaime González Velasco. (2009). Energías renovables. Barcelona. Reverté)	22
Figura 15. Buenavista del Norte. (Fuente: Google Maps).....	28
Figura 16. Vista ampliada de Buenavista del Norte. (Fuente: Google Maps)	29
Figura 17. Consulta descriptiva y gráfica de la parcela catastral donde se ubicará la planta de desalación (Fuente: Sede Electrónica del Catastro)	30
Figura 18. Ocupación del suelo de la ubicación de la parcela	30
Figura 19. Espacios protegidos según Red Natura 2000	31
Figura 20. Zonas Especiales de Conservación (ZEC). (Fuente: IDE Canarias)	32
Figura 21. Zonas de Especial Conservación de las Aves (ZEPA). (Fuente: IDE Canarias).....	32
Figura 22. Diseño de establecimiento de pozos de captación	40
Figura 23. Bomba sumergible KSB de la serie UPA (Fuente: KSB)	43
Figura 24. Filtros de cartucho High Flow Z (Fuente: Suez)	44
Figura 25. Tipos de membranas de la marca Suez (Fuente: Suez)	46
Figura 26. Bomba Sulzer de la serie MBN (Fuente: Sulzer)	49
Figura 27. Herramienta de cálculo de Energy Recovery Inc.	51
Figura 28. Intercambiador de presión de la serie PX-Q (Fuente: Energy Recovery Inc.)....	52
Figura 29. Bomba Grundfos modelo NB 65-125/137 (Fuente: Grundfos)	53
Figura 30. Resultados de pH de la simulación en Winflows	54
Figura 31. Bomba Grundfos modelo NK 65-125/137 (Fuente: Grundfos).....	57

Figura 32. Longitud de tubería de rechazo	58
Figura 33. Punto SIMAR 4020014 (Fuente: Puertos del Estado)	61
Figura 34. Gráfica de altura significativa del oleaje entre 2015 y 2019 (Fuente: Puertos del Estado)	63
Figura 35. Gráfica de periodo medio entre 2015 y 2019 (Fuente: Puertos del Estado)....	63
Figura 36. Dispositivo Butterfly a escala 1.14	64
Figura 37. Esquema general de los sistemas de la planta de desalación (Fuente: Elaboración propia)	67

Índice de tablas Memoria

Tabla 1. Mapa de Cultivos de Tenerife (Campaña 2015-2016)	35
Tabla 2. Necesidades Hídricas	36
Tabla 3. Agua del depósito	37
Tabla 4. Datos tuberías de captación	41
Tabla 5. Datos tuberías de alimentación	42
Tabla 6. Fabricantes de la bomba de captación	43
Tabla 7. Resultados de los cálculos del número de membranas y del número de tubos de presión	47
Tabla 8. Consumos específicos según el modelo de membranas	47
Tabla 9. Fabricantes de la bomba de alta presión	48
Tabla 10. Consumos específicos de los recuperadores de energía	50
Tabla 11. Fabricantes de la bomba booster	53
Tabla 12. Datos de la tubería de distribución	56
Tabla 13. Fabricantes de la bomba de distribución	57
Tabla 14. Datos de la tubería de rechazo	59
Tabla 15. Consumos específicos de cada bomba de la planta	60
Tabla 16. Potencia en fijo del dispositivo Butterfly	65

1. Objeto

El objetivo principal de este trabajo es el de reflejar los conocimientos adquiridos durante los estudios del Grado de Ingeniería Mecánica. Asimismo, para la elaboración de dicho documento técnico se deben aplicar varias competencias como pueden ser la capacidad para la redacción, firma y desarrollo de proyectos en el ámbito de la Ingeniería Industrial Mecánica, el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento, y la realización de mediciones y cálculos.

El objetivo específico de este trabajo es el estudio de una planta de desalación alimentado con energía undimotriz para cultivo en el Norte de Tenerife. La producción será de 2000 m³/día utilizando el proceso de ósmosis inversa, que tendrá como finalidad cubrir la necesidad hídrica de una parte de la plantación de plataneras del municipio de Buenavista del Norte. La instalación se calculará para abastecer un 20% de la plantación total, es decir, unas 58,83 hectáreas. No obstante, se aumentará la extensión del regadío con la condición inicial de la capacidad propuesta hasta las 68,77 hectáreas, algo más del 23% total.

La planta de desalación tendrá un consumo específico de 2,628 kWh/m³ que será suministrado por energía undimotriz, más concretamente proporcionada por el dispositivo *Butterfly* que ha sido diseñado por la empresa Rotary Wave S.L. Debido a la demanda de la planta, se necesitará modificar la estructura de manera que pueda abastecer a la instalación por completo.

1.1. Abstract

The main objective of this project is to show the knowledge acquired during the studies of the Degree in Mechanical Engineering. The elaboration of this technical document reflects the application of many competences, such as the ability to write, sign and develop projects in the field of Mechanical Industrial Engineering. Also, the handling of specifications, regulations and mandatory standards, and performing measurements and calculations are examples of this competences.

Furthermore, this project has to contain the study of a desalination plant fed with renewable energies for a cultivation in the North of Tenerife. The production produces

2000 m³/day using the reverse osmosis process. Therefore, the purpose is to cover the water necessity of a part of the banana plantation in Buenavista del Norte. The chosen area will have 58,83 hectares, which is the 20% of the total banana plantation. However, the final area will be 68,77 hectares of the total area.

In addition, the desalination plant will have a specific consumption of 2,628 kWh/m³ that is supplied by wave power. It generated by the wave movement. So, the device that will be used for the project is the *Butterfly*, designed by Rotary Wave S.L. company. The mechanism isn't enough to cover the energy consumption of the desalination plant. For this reason, it will receive any modification.

2. Alcance

El proyecto se realiza para un estudio de una planta desaladora de agua de mar por el método de ósmosis inversa que se alimentará con energía undimotriz. La planta estará ubicada en el municipio de Buenavista del Norte, en Tenerife. La producción debe suministrar 2000 m³ al día para riego de 68,77 hectáreas de plantación de plataneras.

El estudio se encuentra enfocado en el análisis y cálculo del núcleo de desalación de la planta, la captación de agua de mar, la distribución del agua producida y el dimensionado del sistema undimotriz que sea capaz de aprovechar la máxima cantidad de energía posible de las olas y a su vez producir la necesaria para la planta.

A continuación, se muestran los apartados que forman parte de la elaboración de la planta de desalación:

- Emplazamiento de la planta desaladora y ubicación de la plantación.
- Cálculo de la producción de la planta para satisfacer a la plantación de plataneras.
- Dimensionado del sistema de captación:
 - Ubicación y dimensionado de los pozos de captación.
 - Dimensionado de la línea de tuberías de captación.
 - Elección y dimensionado de las bombas de captación.
- Dimensionado del núcleo de desalación:
 - Estudio del agua de captación.

- Estudio del sistema de desalación mediante el software de diseño.
- Elección de membranas y dimensionado del bastidor.
- Elección y dimensionado de las bombas de alta presión y booster.
- Dimensionado del sistema de recuperación de energía.
- Dimensionado del sistema de distribución:
 - Elección de sistema de distribución y capacidad del mismo.
 - Dimensionado de la línea de tuberías de distribución.
 - Elección y dimensionado de la bomba de distribución.
- Dimensionado del sistema de rechazo:
 - Elección de método de rechazo.
 - Dimensionado de la línea de tuberías de rechazo.
 - Elección y dimensionado de la bomba de rechazo.
- Cálculo del consumo específico de la planta desaladora.

De la misma forma, se mostrarán los parámetros para el estudio del sistema undimotriz:

- Ubicación, según normativa de impacto medioambiental.
- Explicación de los principales factores característicos del oleaje.
- Análisis del recurso undimotriz.
- Selección del dispositivo undimotriz.
- Gestión energética de la planta de desalación.

Por otro lado, el estudio de este proyecto no se ha realizado ejecutable, por lo que no contiene los siguientes apartados:

- La realización de Obra civil de la planta desaladora y del sistema undimotriz.
- Estudio de Seguridad y Salud.
- Dispositivos de distribución y control como válvulas, variadores de frecuencia y caudalímetros.
- Sistema de conducción dentro de las líneas de procesos.
- Estudio geotécnico del terreno de los pozos de captación.

- Estudio de los sistemas de pretratamiento y postratamiento.
- Instalaciones eléctricas, electrónicas, de automatización, climatización y contraincendios.
- Instalaciones destinadas al control del flujo de rechazo de salmuera.
- Estudio de impacto ambiental.
- Pliego de condiciones.
- Mediciones y presupuestos.

3. Justificación del proyecto

La escasez de recursos hídricos en las Islas Canarias ha condicionado su desarrollo. Esto se debe a la alta demanda de agua, tanto para consumo humano como para el regadío de cultivos. A su vez, se ha producido un deterioro de los dos tipos de sistemas de explotación: las aguas superficiales y las subterráneas. El primer recurso no tiene una influencia en las islas tan significativa como en el resto del territorio español. La ausencia de ríos y lagos provoca que se dependa exclusivamente de la climatología. De igual manera, este problema afecta a las aguas subterráneas que proceden de los acuíferos, teniendo que recurrir en algunos casos a la desalación debido a la elevada salinidad.

Uno de los métodos más utilizados, como solución a estos problemas, es la desalación de agua de mar. En Canarias se han desarrollado bastantes industrias capaces de abastecer las necesidades del consumo de la población con este procedimiento. En la isla de Tenerife se encuentran numerosas instalaciones que pueden ralentizar la desaparición de los recursos naturales. No obstante, se realizará el proyecto de la planta de desalación en el municipio de Buenavista del Norte para regadío. Se ha decidido como ubicación para la instalación debido a que es uno de los lugares con una serie de características socioeconómicas que hacen que se encuentre entre los menos desarrollados de la isla, pero a su vez se perfila como una potencia en cuanto a sus condiciones medioambientales privilegiadas. Su economía se basa en el turismo y la agricultura, por ello la planta desaladora permitiría abastecer a más del 23% del cultivo de plataneras, mediante una energía renovable como es la undimotriz que puede resultar muy favorecida

en este municipio. El oleaje en la zona Norte de la isla posee unas condiciones óptimas para la implantación de dispositivos que puedan aprovechar dichos recursos.

En definitiva, abastecer una planta de desalación para el cultivo de plataneras en Buenavista del Norte mediante una energía renovable todavía en proceso de avance como es la energía undimotriz.

4. Antecedentes

4.1. Situación hídrica a nivel mundial

En la actualidad, la escasez de agua es uno de los grandes retos que afronta la humanidad. Sin embargo, es uno de los elementos más abundantes en la Tierra. El inconveniente es que el 97% está formado por agua salada de mares y océanos, es decir, sólo el 3% equivale a agua dulce. Se trata de un bien escaso e imprescindible para el desarrollo de la vida terrestre. Además, el 70% de ésta no se encuentra accesible, sino que se halla congelada en glaciares.

Por otro lado, su distribución en el planeta no se realiza de forma equitativa, ya que donde hay escasez de estos recursos se ve limitado el crecimiento de varios sectores dependientes de ella. El análisis actual del Programa Mundial de los Recursos Hídricos (WWAP) sugiere que el aumento de este problema se atribuirá a la demanda de la industria y la población.

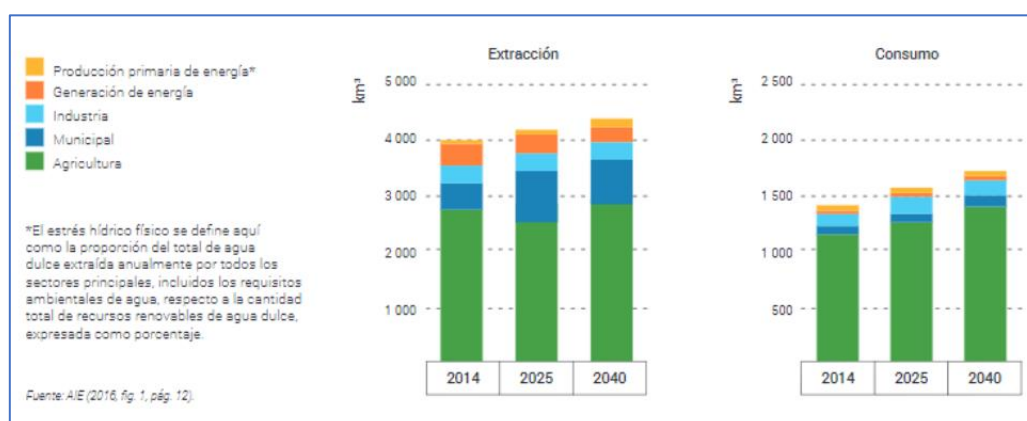


Figura 1. Demanda global de agua por sector para el 2040 (Fuente: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019)

Otros factores a tener en cuenta son los indicadores de desarrollo socioeconómico que están afectando. Uno de los más relevantes es el crecimiento de la población mundial. A su vez, es un importante propulsor del aumento de la demanda de agua. Según datos proporcionados por la ONU, la población mundial alcanzó los 7.600 millones de personas en junio de 2017. Se espera que alcance cerca de 8.600 millones para 2030 y que aumente a 9.800 millones para el 2050. Además, casi todo el crecimiento poblacional neto se está produciendo en las ciudades y el mundo se está urbanizando progresivamente.

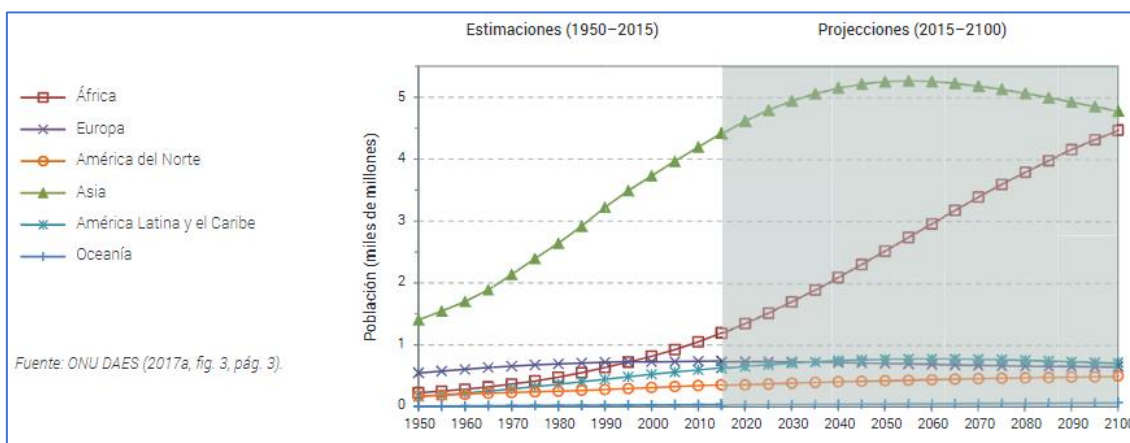


Figura 2. Estimación de población por región (Fuente: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019)

Por lo que se refiere al abastecimiento de agua, existen varios sistemas que se dividen en tres grupos: el agua superficial, el agua subterránea y los recursos hídricos no convencionales. Uno de los más relevantes sería el último de los sistemas, ya que una ampliación de estos métodos puede equilibrar la cantidad de agua que se extrae actualmente de fuentes naturales, y así se minimiza la degradación ambiental.

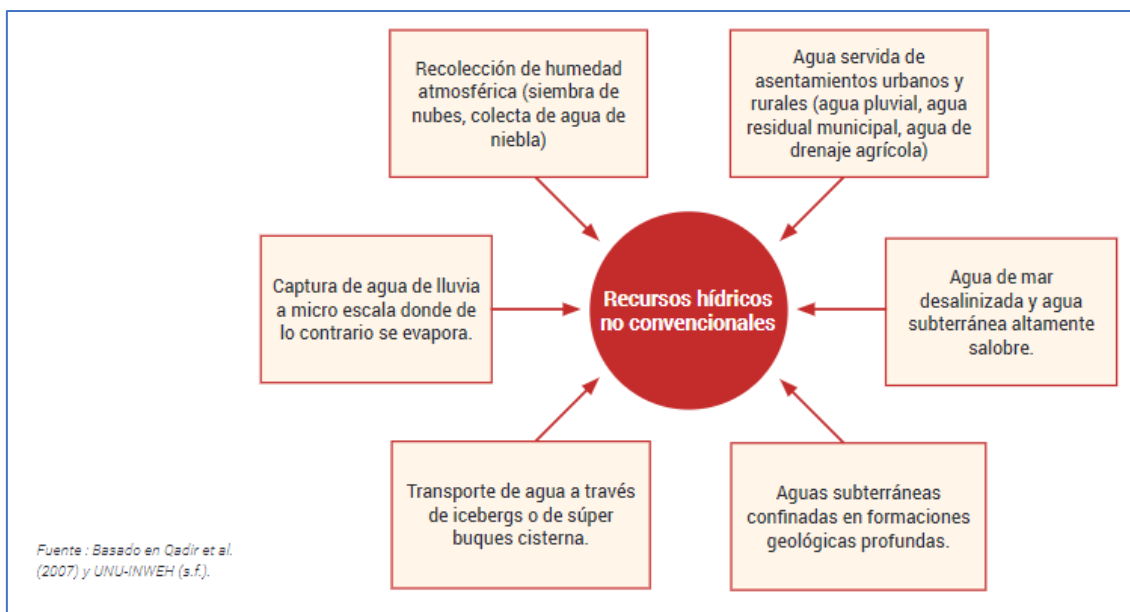


Figura 3. Ejemplos de recursos hídricos no convencionales (Fuente: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019)

4.2. Situación hídrica en España

En España la distribución de recursos hídricos ocurre de una forma similar a la mundial, se distribuye de una manera irregular. Existen zonas con una gran demanda de agua y sus aportaciones son escasas. España, comparando sus datos, podría considerarse como un país seco, aunque no de manera alarmante. Uno de los recursos hídricos naturales más influyentes son los ríos, sin embargo, son irregulares ya que sus aportaciones son temporales y territoriales.

En la Figura 4 se pueden observar las diferencias entre unas y otras regiones. Mientras que en las zonas más al norte, principalmente montañosas, la precipitación supera ampliamente a la evaporación y quedan cubiertas las necesidades, en las zonas mediterráneas y en zonas de Canarias la evaporación, los ecosistemas y el suelo absorben la mayor parte del agua precipitada. Asimismo, la demanda total de agua va en aumento y presenta importantes variaciones regionales. La ausencia de mecanismos eficaces de control, junto a la facilidad de extracción de fuentes naturales han provocado situaciones de sobreexplotación.

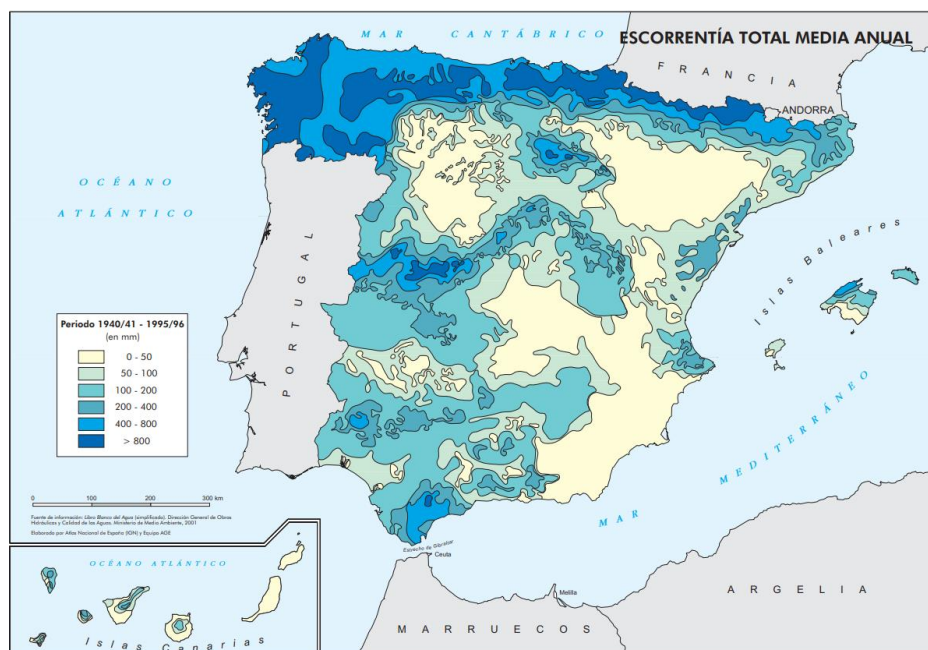


Figura 4. Escorrentía Total Media Anual (Fuente: Ministerio de Fomento. Gobierno de España)

4.3. Situación hídrica en Tenerife

Las Islas Canarias, debido a su ubicación geográfica, se encuentra en una situación agravada por la escasez de aguas superficiales y la imposibilidad de obtención de recursos hídricos, que son imprescindibles, mediante sistemas convencionales como los que pueden emplearse en el resto del territorio español. El principal consumidor de agua en la mayoría de islas del archipiélago es el regadío, las cuales proceden principalmente de dos fuentes: las aguas subterráneas (galerías y pozos) y aguas por métodos no convencionales (desalación).

En la isla de Tenerife las aguas superficiales apenas tienen uso; son las aguas subterráneas las que proporcionan la gran mayoría de recursos hídricos, que son extraídas principalmente de acuíferos. El problema fundamental es el previsible aumento del cambio climático, que puede provocar un mayor impacto en las consecuencias de estos procesos. Además, su reciente explotación ha provocado la salinización de muchos de ellos. La diferencia es notable según los datos aportados por el Plan Hidrológico de Tenerife: para el periodo 1944/45-2011/12 alcanza un volumen de 19 hm³/año de escorrentía superficial y para el periodo 1982/83-2011/12 de 288 hm³/año de infiltración.

Por ello, los sistemas de obtención de recursos hídricos no convencionales han empezado a aparecer con mayor frecuencia como solución a estos problemas.

4.4. Desalación en Canarias y en la isla de Tenerife

El agua en Canarias, como en el resto del mundo, es un bien preciado, por lo que su correcto aprovechamiento y distribución es de vital importancia para el archipiélago. Además, cuenta con la particularidad de que todas las islas no poseen el mismo nivel de recursos hídricos. En los años 60 se produjo una fuerte sequía que afectó considerablemente a la población canaria. Las islas más perjudicadas, debido a sus condiciones geográficas, fueron Fuerteventura y Lanzarote. Incluso se recurrió a buques cisterna como transporte de dichos recursos. Así en 1964 se construyó la primera planta desaladora de agua de mar en España y de toda Europa, más concretamente en Lanzarote, que producía mediante el proceso de evaporación súbita un total de 2500 metros cúbicos de agua al día.

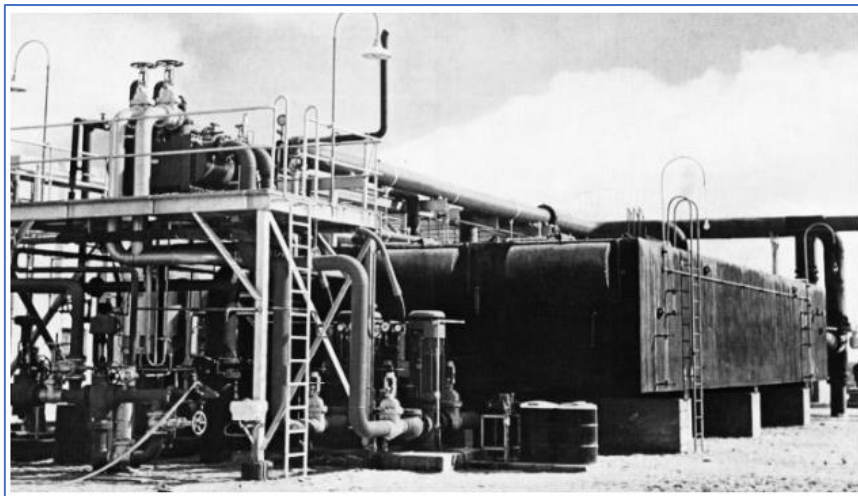


Figura 5. Primera planta desaladora ubicada en Lanzarote (Fuente: Canarias7)

Posteriormente se fueron estableciendo cada vez más plantas desaladoras en las islas, sobre todo las pertenecientes a la provincia de Las Palmas. Asimismo, se han situado como un gran referente respecto a la obtención de recursos hídricos gracias a la investigación de estas industrias. Como resultado, estas islas han experimentado un cierto crecimiento económico, por lo que el agua puede ser un factor limitativo en el desarrollo.

En las islas de Lanzarote y Fuerteventura los recursos hídricos obtenidos por desalación suponen la casi totalidad de agua consumida, a diferencia de las islas más occidentales que recurren a otros sistemas de extracción.

En la isla de Tenerife la prioridad en la creación de plantas desaladoras no es tan alta como en otras islas. No obstante, actualmente cuenta con un gran número de instalaciones que se encuentran ubicadas fundamentalmente en el sur de la isla. Una de las plantas más relevantes es la Desaladora de Santa Cruz de Tenerife, que utiliza uno de los métodos más avanzados, la ósmosis inversa. Por ello, destacar que la construcción de estas instalaciones no se debe únicamente a la falta de recursos hídricos, sino que también son necesarias debido al crecimiento económico y demográfico de la isla.

4.5. Desalación del agua

La desalación es un proceso de tratamiento del agua, que consiste en la separación de sales de un compuesto. Su aplicación fundamental es el abastecimiento humano, la producción para determinadas industrias y el regadío de cultivos, este último es el caso de este proyecto. Existen varios procesos que permiten realizar este procedimiento que se diferencian según la tecnología utilizada. Además, una característica que los distinguen es la manera de aplicación de la energía para realizar el proceso. La función de estos métodos se divide en dos tipos: los procesos de evaporación o destilación, y los procesos de utilización de membranas.

Según la tecnología aplicada se pueden encontrar dentro de los dos grupos anteriores los siguientes procesos de desalación de agua:

- Destilación súbita multietapa (MSF): es uno de los procesos más antiguos en el ámbito industrial, sin embargo, su uso es cada vez menor, excepto en países donde la energía tiene un menor coste. Su técnica consiste en calentar el agua a desalar hasta el punto de ebullición a una baja presión, produciéndose la evaporación. Este proceso se realiza en varias etapas, reduciendo los valores de la presión con cada una de ellas, según las condiciones de operación. La utilización de este método está especialmente indicada para el tratamiento de aguas con alta

salinidad, temperatura y contaminación. Además, la capacidad de la planta es bastante mayor a otras.

- Destilación multiefecto (MED): es un proceso basado en la evaporación y condensación iterativa en diversas etapas bajo condiciones de vacío. Su procedimiento, como medio para el calentamiento en la etapa de evaporación, es el vapor residual de una planta de energía adyacente que se condensará y producirá el agua separada de las sales. El principal problema es la utilización de evaporadores de tubos sumergidos, ya que generan la aparición de depósitos de sales sobre ellos. No obstante, se soluciona modificando la película de los tubos a una más delgada, obteniendo un proceso de desalación muy óptimo.
- Compresión de vapor (CV): al igual que en los métodos anteriores su proceso de desalinización consiste en la evaporación del agua mediante el aumento de temperatura a través de un compresor. Tras esto pasa a la condensación en un intercambiador de calor, cuyo enfriamiento se produce por el mismo proceso de obtención. Por lo tanto, resulta un método con un alto consumo de energía, aunque el agua producto posee unas características de salinidad bastante bajas.
- Electrodiálisis (ED): es un proceso aplicado fundamentalmente a aguas salobres o a aguas residuales con concentraciones moderadas de iones disueltos. Este método es ideal para obtener una calidad superior de aguas que no sean óptimas para consumo. El modo de desalinizar se caracteriza por ser un proceso con una tecnología de membranas avanzada que utiliza el movimiento de los iones para lograrlo. A su vez requieren de un tratamiento previo, pero tienen una alta capacidad de recuperación del agua.
- Ósmosis Inversa (RO): es un proceso que utiliza la tecnología de las membranas como en el caso anterior, aunque éste es uno de los métodos más requeridos en cuanto al tratamiento de agua de mar. Asimismo, el proceso permite pasar el agua a través de una membrana, reteniendo a su vez las partículas no deseadas. Se explicará más detalladamente el método en el siguiente apartado.

4.6. Desalación por el método de ósmosis inversa

La desalación de agua por el método de ósmosis inversa es una tecnología que está basada en el fenómeno físico de la ósmosis, el cual consiste en que dos líquidos con una diferente concentración de sales en contacto por una membrana semipermeable tienden a igualarse naturalmente. Este proceso genera una diferencia de presión en ambos lados, y produce que la solución más diluida, que es la de menos concentración, pase a la solución concentrada. La fuerza de dicho movimiento entre la membrana se define como presión osmótica, la cual, ejerciendo una presión contraria, produciría el efecto conocido como ósmosis inversa.

El tratamiento del agua por medio de este proceso consiste en presionar, mediante una fuerza externa, al fluido a través de la membrana semipermeable con un valor superior a la presión osmótica. De este modo, las moléculas de los minerales y otros sólidos disueltos se quedarían retenidos en la membrana, mientras que las moléculas de agua pasarían sin ningún problema. Asimismo, se establecerían los dos tipos de soluciones: una purificada y la otra concentrada.

En este proyecto se establecerá este método como proceso de desalinización del agua de mar mediante un bastidor de membranas. El agua captada por el mar (caudal de captación y alimentación) pasa a través de dicho dispositivo formando dos flujos de agua. Uno sería el producto que continuaría con el proceso y el otro sería el de rechazo, el cual ha sido incapaz de atravesar la membrana.

Se debe tener en cuenta que la membrana debe reunir una serie de características: ser capaz de resistir las presiones a las que se someterá la solución, que sea lo suficientemente permeable al agua para que el flujo sea elevado, y que el porcentaje de rechazo sea alto para que la calidad del agua sea buena.

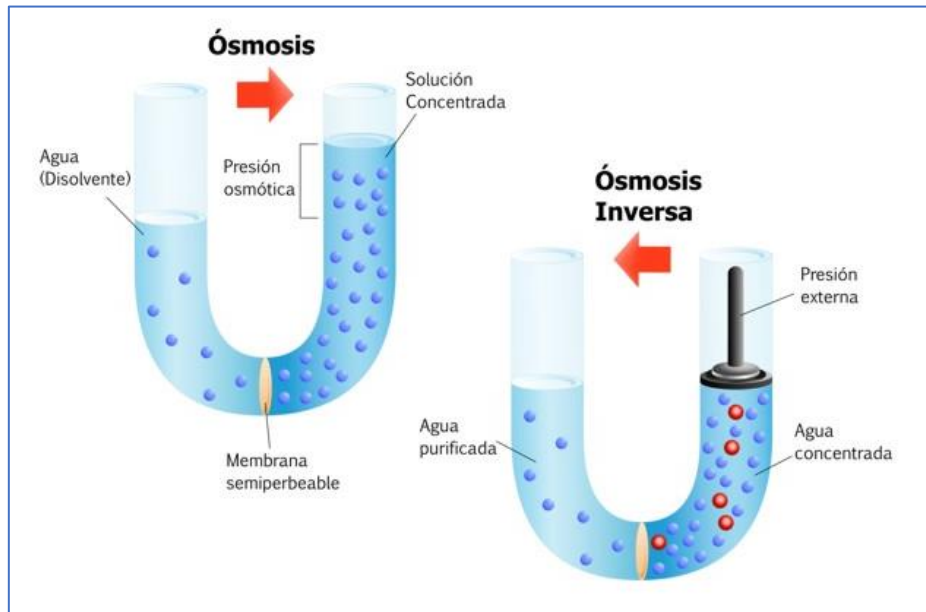


Figura 6. Procesos de ósmosis directa y ósmosis inversa (Fuente: IndustMarine)

4.6.1 Membranas

Uno de los componentes fundamentales en el proceso de ósmosis inversa es la membrana, que debe tener unas características óptimas, dependiendo de la calidad del agua de captación, para que el flujo de agua producto tenga la mejor calidad posible. Existen varias configuraciones en la distribución de las membranas y en el tamaño de los diámetros que permiten pasar el flujo de agua. Dependiendo de su capacidad se encuentran diferentes superficies de actuación con caudales variables. Cuanto mayor sea la producción de una planta mayor será el caudal de captación, por lo que según la calidad de la membrana las propiedades del agua pueden variar significativamente.

El mantenimiento de las membranas es muy importante, sin embargo, estos dispositivos cuentan con la característica de realizar una limpieza continua mientras está en funcionamiento. De este modo, no sufren en un corto periodo de tiempo una acumulación de contaminantes o una saturación. La duración media de estos equipos suele ser entre tres y cinco años, ya que al estar expuestos a concentraciones altas de sales es importante realizar mantenimientos periódicos con agentes químicos para su limpieza.

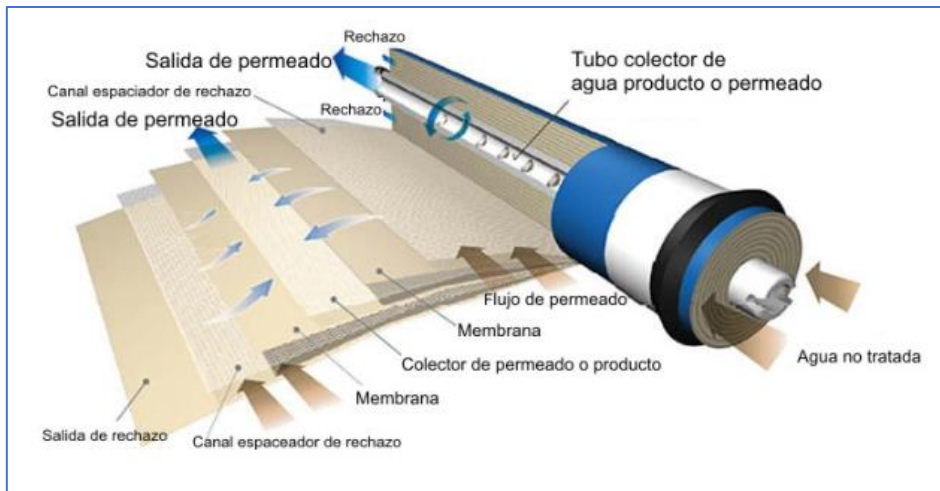


Figura 7. Esquema de un tubo colector (Fuente: IndustMarine)

Por ello, las membranas que se establecerán en este proyecto de la planta de desalinización deben proveerse de una empresa que tenga en cuenta todas las características señaladas. La resistencia de altas presiones y concentraciones a las que son sometidas, una gran capacidad de producción, un tamaño óptimo para la instalación y un alto porcentaje de rechazo de sales deben ser las propiedades típicas de una membrana para ósmosis inversa.

4.6.2 Configuración de una planta de ósmosis inversa

La desalación por el método de ósmosis inversa, dependiendo del caudal que se requiera producir, puede requerir diversas dimensiones de la planta. No obstante, las etapas que se deben llevar a cabo son similares en todos los casos:

- **Captación:** es una etapa en la que dependiendo de las condiciones que se requieran del agua de alimentación, se distinguen dos formas de abastecer la planta de desalinización, la captación cerrada y la abierta. En cuanto a este tipo de instalaciones se suele utilizar la primera de ellas, ya que ofrece unas ventajas mucho más beneficiosas. La principal es que al tratarse de tomas cerradas o de pozos la filtración que realiza el propio terreno es bastante provechosa, ya que permite obtener unos bajos índices de turbidez (NTU) y de colmatación (SDI). Esta situación a su vez permite una ausencia de actividad biológica y orgánica,

que favorece la vida útil del bastidor de membranas. Además, la temperatura no varía significativamente, lo que posibilita tener un control sobre la calidad del agua de alimentación. En cuanto a las propiedades, también presenta un bajo contenido de oxígeno disuelto, lo que conlleva una menor oxidación en los materiales de la planta. No obstante, existen varios inconvenientes en relación a la captación por tomas abiertas. La más destacable es la presencia de elementos minerales que modifican la calidad del agua, como puede ser el hierro, el aluminio, la sílice o el flúor, entre otros. Por ello, aunque sea la más favorable, esto implica que la permeación de caudales no sea posible de lograr en muchas ocasiones. Las mayores dificultades en la construcción de los pozos de captación se suelen producir en zonas costeras, especialmente cuando se requieren grandes caudales y sus factores de recuperación son menores al 40%. Además, se debe considerar una pérdida de caudal a lo largo de un periodo de tiempo provocado por una sobreexplotación o por el arrastre de elementos que obstruyan la afluencia del pozo. Estos aspectos se deben tener en cuenta a la hora de decidir el método de alimentación del proyecto.

- Pretratamiento: es un proceso que mejora tanto la calidad de las membranas como la del agua de alimentación. Este tratamiento es fundamental en las plantas de desalinización por ósmosis inversa, ya que la acumulación de elementos sólidos o una alta concentración del agua disminuyen su rendimiento considerablemente. Cuando sucede este problema, aumenta la polarización de concentración en la superficie de la membrana, ya que los depósitos de los materiales no deseados retrasan la retrodifusión de las sales hacia la solución de agua bruta. Según el tipo de acondicionamiento que se desee realizar en la planta de ósmosis inversa, se diferencian dos tipos: pretratamientos físicos y químicos. Los primeros de ellos se basan en el concepto de filtración haciendo uso de distintos materiales, que consiste en hacer pasar el agua de captación a través de los filtros reteniendo cualquier material sólido que transporte. Inicialmente se utilizan filtros de arena que permiten filtrar partículas mayores de 20 micras. También se encuentran los filtros de cartuchos, que filtran partículas de hasta 5 micras, garantizando el mínimo requerido por los fabricantes de las membranas de ósmosis inversa. Asimismo, existen filtros que ofrecen un límite mucho menor para casos

especiales industriales donde se requiera una alta calidad o en instalaciones donde las aguas sean susceptibles de contaminación. Unos ejemplos serían los filtros precapa, la microfiltración y la ultrafiltración. Por otro lado, los pretratamientos químicos se centran en tareas como la desinfección, fundamentalmente por la actividad biológica, la regulación del pH, la coagulación, etc. En el proyecto de la planta de desalación se deberán adoptar los tratamientos necesarios para el bastidor de membranas elegido, y según la calidad que presente el agua de captación en la ubicación de la instalación.

- Núcleo de desalación: el proceso contendría todos los equipos que realizarían el proceso de desalinización. Según la Figura 8, se pueden diferenciar las etapas que contendría el procedimiento. La primera etapa sería el flujo de captación y de alimentación de la planta, donde actuaría la bomba de alta presión (BAP), una de las partes más importantes del proceso tecnológico de ósmosis inversa. Esto se debe a que tiene que aportar a la presión osmótica del agua a tratar la presión neta de operación necesaria para obtener la producción calculada. Una vez obtenido las propiedades óptimas, el flujo de agua pasa a través del bastidor de membranas generando el flujo producto de la desalinización y el flujo de rechazo con una alta concentración en sales. En este tipo de instalaciones, comúnmente, en lugar de deshacerse del flujo que no se puede consumir como recurso hídrico, se decide utilizar un equipo de recuperación que permite obtener un mayor ahorro energético y un menor consumo específico en la planta. El equipo más utilizado es el intercambiador de presión, el cual aporta la presión del flujo de rechazo directamente al agua de alimentación que proviene de la bomba de alta presión. Esta recirculación del agua se realiza mediante una bomba booster, que se encarga de igualar las presiones de ambos flujos antes de la entrada del bastidor de membranas.

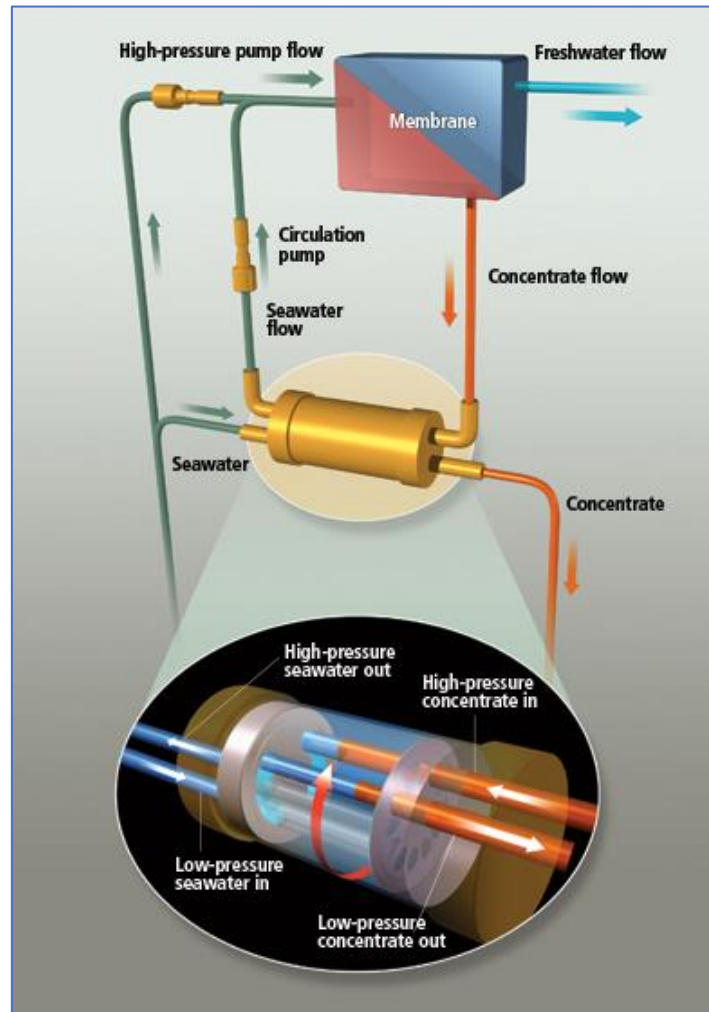


Figura 8. Núcleo de desalación con intercambiador de presión (Fuente: Energy Recovery Inc.)

- Postratamiento: es un proceso que afectaría al flujo producto del bastidor de membranas. El objetivo fundamental de este tratamiento es el ajuste de pH, que pueda ser producido por el proceso de ósmosis inversa en el bastidor de membranas, ajustándola a niveles de potabilidad entre 6,5 y 8,5. El principal motivo es que el flujo que se produce suele tener valores pobres en calcio y baja alcalinidad, por el elevado rechazo de estos iones en el mismo proceso. Por ello, es necesario la adición de bases como el hidróxido sódico o el hidróxido cálcico. En algunas ocasiones, también se debe recarbonatar el agua mediante inyección en línea de dióxido de carbono. No obstante, por razones de potabilidad se debe mantener un nivel de cloro libre para evitar el desarrollo de ciertos organismos.

4.7. Energía Undimotriz

La escasez de los recursos hídricos y la necesidad de reducir los combustibles fósiles como fuente de energía, en una sociedad actual preocupada por su incremento en el nivel de desarrollo, han provocado un impulso en la búsqueda de soluciones innovadoras que permitan su sostenimiento. En cuanto al uso de energías renovables como fuente de energía, las más destacables a nivel comercial son la energía eólica, geotérmica, hidráulica e incluso solar para el abastecimiento de una planta de desalación. No obstante, para este proyecto se ha decidido utilizar otra fuente de energía renovable no convencional que actualmente se ha impulsado por su viabilidad en algunas zonas costeras, la energía undimotriz.



Figura 9. Oleaje

La obtención de energía por medio del movimiento de las olas es una idea que se ha ido convirtiendo viable desde principios de los años setenta del siglo pasado, a partir de la primera crisis del petróleo. La utilización de este tipo de energía resulta más atractiva, cuanto mayor es la preocupación general por el incremento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, en zonas con frecuentes e intensos oleajes. El objetivo fundamental, que todavía no se ha conseguido, es que la transformación de energía sea competitiva con las demás energías renovables.

Actualmente sólo algunos países cercanos a mares caracterizados por oleajes intensos, como Reino Unido, Noruega o Japón, han realizado investigaciones en el campo de transformación de energía de las olas. Además, países como China, Rusia, EE.UU.,

Australia, Suecia, Dinamarca, España o Portugal, también están implicados en el desarrollo de este tipo de dispositivos. No obstante, no consideran que ha llegado la hora de tener en cuenta este recurso de forma comercial, a pesar de tener prototipos en actual desarrollo.

La densidad de potencia del oleaje existente es suficiente como para ser aprovechada, sin embargo, esta energía puede presentarse en ocasiones bastante dispersa. Por lo tanto, los dispositivos convertidores han de tener un tamaño grande para poder extraer cantidades estimables de electricidad. Por otro lado, debe ser proporcional con la longitud media del frente de olas existente. Hay dos tipos de dispositivos que se pueden clasificar como: convertidores pasivos, que se encuentran unidos a una estructura fija y no sufren movimiento por el oleaje, y los convertidores activos, que se mantienen en flotación sobre la superficie del mar o incluso sumergidos. A continuación, en la Figura 10 se pueden observar varios tipos de convertidores de energía del oleaje, que dentro de los dos grupos anteriores se diferencian por su geometría y orientación respecto al frente de olas incidente.

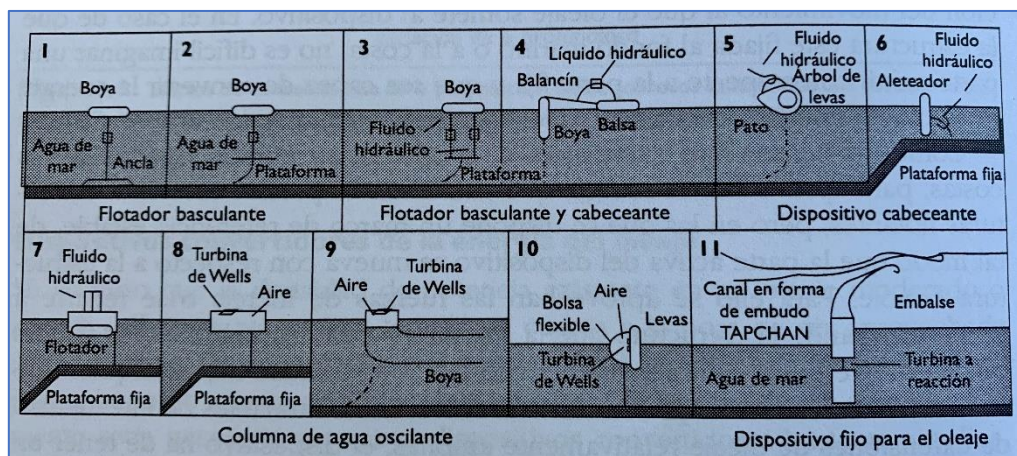


Figura 10. Representación esquemática de diversos tipos de convertidores de energía del oleaje (Fuente: Jaime González Velasco. (2009). *Energías renovables*. Barcelona. Reverté)

Los dispositivos fijos son los únicos convertidores de energía del oleaje, cuyo funcionamiento se ha comprobado. La ventaja que presentan respecto a los dispositivos flotadores es su posición fija, que facilita la accesibilidad para reparaciones y mantenimiento, además de su proximidad a redes de transporte eléctricas. Esto se debe a que al encontrarse en la costa, su capacidad de captación del oleaje sería limitada. Las

olas con mayor potencia dependen de la profundidad marina a la que se hallen, siendo mayor con más profundidad. Un ejemplo de este tipo de dispositivos es el denominado *columna de agua oscilante*, que hace uso de una cavidad abierta y parcialmente sumergida que, mediante el movimiento de la ola, una corriente de aire es impulsada hacia la cámara y luego, cuando la abandona, se crearía un vacío. Para el aprovechamiento de este movimiento se utiliza una turbina de Wells, cuyo rotor formado por paletas le permite aprovechar las corrientes de aire.

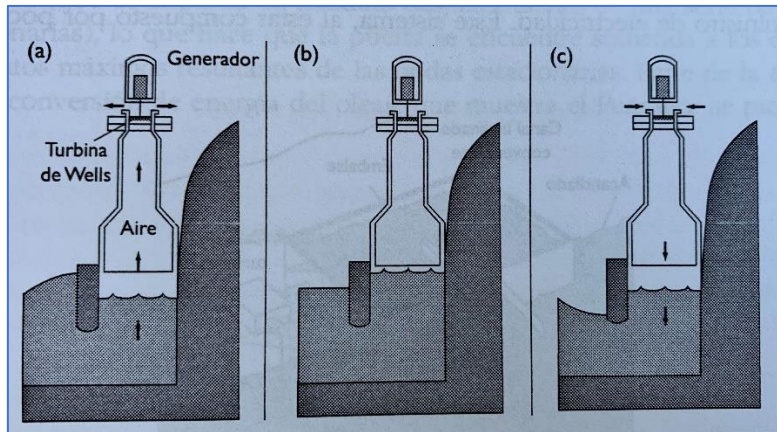


Figura 11. Principio de operación del dispositivo columna de agua oscilante (Fuente: Jaime González Velasco. (2009). *Energías renovables*. Barcelona. Reverté)

Por otro lado, los dispositivos flotantes disponen de una tecnología aún en proceso, sin embargo, existen varios aparatos que ofrecen un mecanismo atractivo para su uso. Uno de ellos es el dispositivo *Backward Bent Duct Buoy* (BBDB) que recurre a una tecnología similar al de columna de agua oscilante. El agua penetra por el conducto situado en la parte inferior, el cual crea una corriente de aire capaz de hacer rotar una turbina de Wells, que cuando se retira el flujo crearía un vacío en sentido contrario.

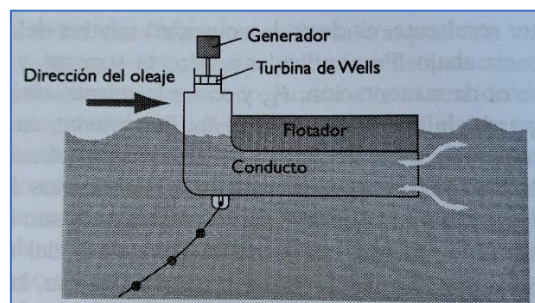


Figura 12. Dispositivo *Backward Bent Duct Buoy* (Fuente: Jaime González Velasco. (2009). *Energías renovables*. Barcelona. Reverté)

Otro dispositivo flotante capaz de transformar la energía cinética y potencial de las olas en energía mecánica, y finalmente en energía eléctrica, sería el *Pato de Salter* (Universidad de Edimburgo). La transformación de energía mecánica la consigue mediante levas, debido al continuo movimiento oscilante, manteniendo su centro permanentemente fijo. No obstante, aunque los estudios muestran que puede llegar a ser uno de los dispositivos más eficientes, aún necesita años de investigación y desarrollo.

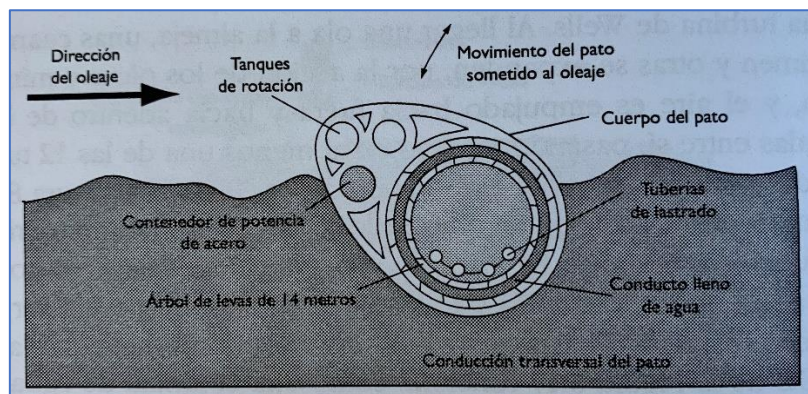


Figura 13. Dispositivo Pato de Salter (Fuente: Jaime González Velasco. (2009). *Energías renovables*. Barcelona. Reverté)

En cuanto a los dispositivos convertidores de oleaje existen otros tipos de diseños que no se engloban directamente en los dos grupos establecidos. Una de las estructuras en las que más avances se están realizando es la propia boya, incluso en España existen proyectos sobre ello. En concreto se encontraría ubicada en un lugar próximo a Santoña en Santander, cuya estructura se puede apreciar en la Figura 14.

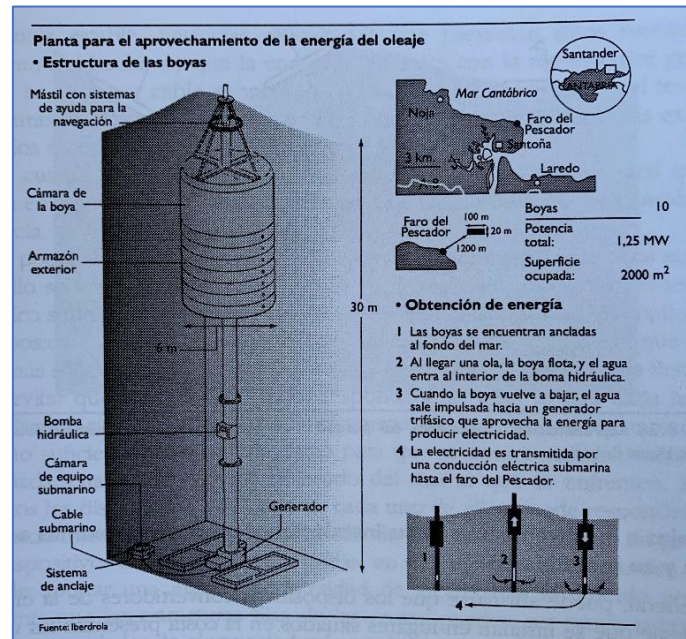


Figura 14. Planta de aprovechamiento de energía del oleaje en Santander (Fuente: Jaime González Velasco. (2009). Energías renovables. Barcelona. Reverté)

En general, los dispositivos convertidores de la energía del oleaje en un principio presentan ventajas de ser razonablemente baratos, de fácil mantenimiento y de fácil conexión a la red eléctrica, sin embargo, la obtención de condiciones meteorológicas adecuadas y la transformación de energía son inconvenientes destacables en una instalación. Los convertidores fijos presentan una estabilidad frente a los flotantes, lo que facilita la conversión de energía y permite obtener unos valores de potencia mayores. En el proyecto se priorizará un dispositivo de dichas características para el abastecimiento de energía de la planta de desalinización

Cabe destacar que el impacto medioambiental de los dispositivos convertidores de energía del oleaje es uno de los más bajos, si se compara con los de cualquier otra energía renovable. Los impactos más destacables son:

- No generan gases contaminantes, siendo posible la contaminación química debido a aceites lubricantes o de líquidos hidráulicos.
- No producen impactos visuales significativos.

- Los ruidos que generan suelen ser más bajos que los del propio oleaje.
- Pueden producir cierto riesgo para la navegación.
- No interfieren significativamente en la fauna y flora de la zona (sería necesario un estudio).
- No deberían verse afectados cuando se produzcan fenómenos meteorológicos adversos que pueda concernir al medioambiente costero.

En conclusión, sólo en algunas zonas próximas al mar con oleajes suficientemente agitados se puede plantear este recurso energético explotable de forma comercial. En el proyecto se demostrará que la energía undimotriz puede ser una fuente de energía más relevante en Canarias. En la actualidad no se presenta un diseño viable para realizar en las islas y conseguir resultados energéticos óptimos. Sin embargo, utilizando una forma de abastecimiento indirecta, con suministro de la red o un almacenamiento de energía, se puede conseguir un dispositivo que se aproxime a las características buscadas.

5. Normativa y referencias

5.1. Normativa

- Plan hidrológico de Tenerife. Consejo Insular de Aguas de Tenerife.
- Ley 4/2007, de 13 de julio, del Suelo y de los Espacios Naturales Protegidos de Canarias.
- Plan Insular de Ordenación del Territorio de Tenerife.

5.2. Bibliografía

- Agüera Soriano, J (2002). *Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas* (5ª edición). Madrid: Ciencia 3.
- Creus Solé, A (2009). *Energías Renovables* (2ª edición) Barcelona: Cano Pina S.L.

- González Velasco, J (2009) *Energías Renovables*. Barcelona: Reverté.
- Medina San Juan, J.A. (1999) *Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis Inversa*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Veza, J.M. (2002). *Introducción a la desalación de aguas*. Las Palmas de Gran Canaria: Servicio de publicaciones y producción documental de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

5.3. Otras referencias

- Agrocabildo <http://www.agrocabildo.org/>
- Bombas Flowserve <https://www.flowserve.com/en>
- Bombas Grundfos <https://es.grundfos.com/>
- Bombas KSB <https://www.ksb.com/ksb-es/>
- Bombas Lowara <http://lowara.com/>
- Bombas Sulzer <https://www.sulzer.com/es-es/spain>
- Cabildo de Tenerife <https://www.tenerife.es/portalcabtfe/?lang=en>
- EMEC: <http://www.emec.org.uk/>
- Instituto Canario de Investigaciones Agrarias: <https://www.icia.es/icia/>
- Instituto Tecnológico de Canarias <http://www.itccanarias.org/web/>
- Gobierno de Canarias: <https://www.gobiernodecanarias.org/principal/>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación <https://www.mapa.gob.es/es/>
- Ministerio de Industria, Comercio y Turismo <https://www.mincotur.gob.es/es-es/Paginas/Index.aspx>
- Ocean Power Technologies: <https://www.oceanpowertechnologies.com/>
- Puertos del Estado <http://www.puertos.es/es-es>
- Rotary Wave <http://www.rotarywave.com/es>

- Sede electrónica del Catastro <https://www.sedecatastro.gob.es>
- Suez <https://www.suez.es/es-es>
- Tuberías Flowtite <http://www.flowtite.com/en>

5.4. Software de cálculo y herramientas empleadas

- Google Maps.
- Goolzoom, herramienta para el análisis y estudio territorial.
- IDECanarias, visor Grafcan.
- Microsoft Office Word 2016.
- Microsoft Office Excel 2016.
- Herramienta online de selección de bombas del fabricante Flowserve.
- Herramienta online de selección de bombas del fabricante Grundfos.
- Herramienta online de selección de bombas del fabricante KSB.
- Herramienta online de selección de bombas del fabricante Lowara.
- Herramienta online de selección de bombas del fabricante Sulzer.
- Hoja de cálculo Excel de selección de recuperadores de energía Danfoss.
- Hoja de cálculo Excel de selección de recuperadores de energía Energy Recovery.
- Hoja de cálculo Excel para la estimación de pérdidas de carga.
- Winflows, programa de diseño de membranas de la empresa Suez.

6. Definiciones y abreviaturas

6.1. Definiciones

- Caudal de alimentación: corresponde al flujo de agua que tras ser captado por el mar y pasar por la bomba de alta presión, abastece al bastidor de membranas.

- Consumo específico: es un parámetro que señala la cantidad de energía necesaria por cada metro cúbico de agua producido en la planta desaladora.
- Flujo producto o permeado: es el caudal de agua desalinizada que pasa a través del bastidor de membranas.
- Flujo rechazo o salmuera: es el caudal de agua que no consigue a través el bastidor de membranas, posee una alta concentración en sales.

6.2. Abreviaturas

- BAP: Bomba de Alta Presión.
- CP: Bomba de Circulación o Bomba Booster.
- CV: Compresión de Vapor.
- ED: Electrodiálisis.
- EMEC: The European Marine Energy Center LTD.
- ICIA: Instituto Canario de Investigaciones Agrarias.
- IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- IDEC: Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias.
- ITC: Instituto Tecnológico de Canarias.
- ME: Evaporación Multiefecto.
- MSF: Evaporación Súbita Multietapa.
- PER: Plan de Energías Renovables 2011-2020.
- RO: Ósmosis Inversa.
- PE: Intercambiador de Presión.
- Ppm: Partes por millón.
- PRFV: Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio.
- PTO: Power Take Off.
- TDS: Sólidos Totales Disueltos.
- WEC: Wave Energy Converter.
- ZEC: Zonas Especiales de Conservación.
- ZEPA: Zonas de Especial Protección para las Aves.

7. Requisitos de diseño

En este apartado se reflejarán los requisitos establecidos por el peticionario del proyecto, la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna. Además de varios que se debieron tener en cuenta por la legislación, normativa y reglamentación de obligado cumplimiento. Asimismo, el emplazamiento escogido debe cumplir todos los requerimientos anteriores.

7.1. Requisitos del peticionario

Los requisitos del peticionario del estudio de un sistema de desalinización por energías renovables por el método de ósmosis inversa son los siguientes:

- El agua de mar obtenida por la planta deberá ser procesada por el método de ósmosis inversa.
- La planta de desalinización debe ser alimentada por una energía renovable, por lo que la energía elegida es la undimotriz generada por el movimiento de las olas.
- La capacidad de la planta debe ser pequeña o media, ya que sus instalaciones y demanda no son exigentes.
- El emplazamiento de la planta se debe definir según las necesidades del recurso hídrico y disponibilidad del recurso de energía renovable, en este caso undimotriz.
- La capacidad de producción debe estar limitada por las necesidades que se tengan que cubrir.
- La planta debe cumplir con la legislación, la normativa y las especificaciones de obligado cumplimiento.

Estos requisitos serán tomados como condiciones iniciales para el desarrollo del proyecto de la planta de desalación ubicada en Buenavista Norte.

7.2. Situación y Emplazamiento

La situación y emplazamiento de la planta de desalinización es fundamental ya que debe satisfacer tanto el recurso hídrico como el recurso undimotriz. Según los requisitos del peticionario, la planta desaladora por el método de ósmosis inversa será de capacidad pequeña o media y alimentada por energías renovables.

El factor que más ha influido en el emplazamiento de la planta ha sido la energía renovable que provee a la misma, en este caso la energía undimotriz. Como se ha explicado anteriormente, es necesario tener un alto potencial undimotriz por lo que donde mejor se puede aprovechar la energía de las olas en las Islas Canarias es en zonas situadas al noroeste, de las cuales Tenerife y La Palma son las más favorecidas. Asimismo, cumpliendo con la normativa respecto al medio ambiente se ha decidido ubicar en el municipio de Buenavista del Norte, Tenerife. En el anexo 3, se explicarán más detalladamente las características de la ubicación escogida.

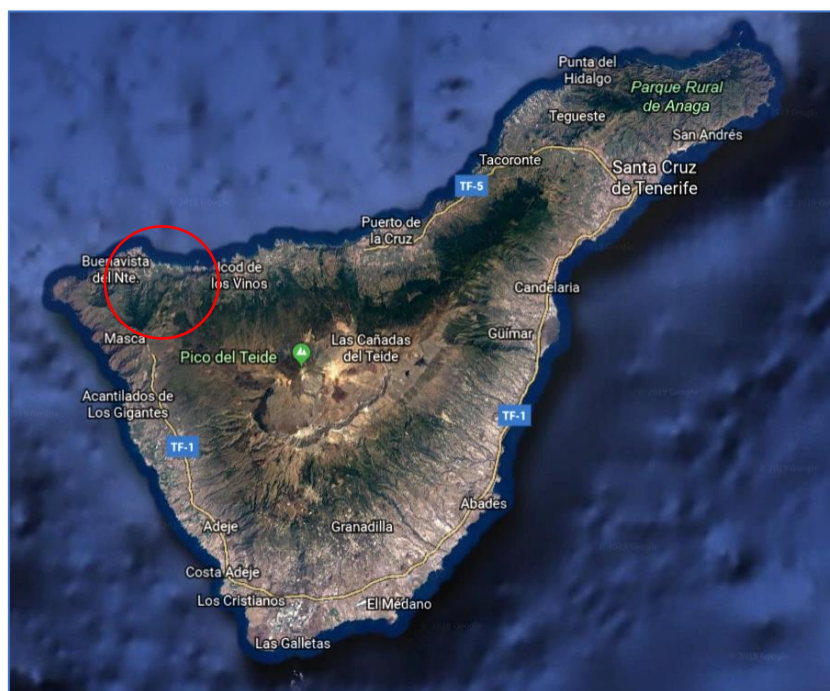


Figura 15. Buenavista del Norte. (Fuente: Google Maps)

La situación de la planta, por encontrarse en un punto cercano al mar, reduciría los costes en la etapa de captación, y favorece la zona agrícola que la rodea que presenta un problema de riego. La planta ayudaría al cultivo de plataneras que es el más abundante.

Cabe destacar que la planta desalinizadora se emplazará en una zona de agricultura ya existente, por lo que habría que desocuparla para poder efectuar su construcción. En principio, debido a la poca capacidad de la planta, sus dimensiones no afectarán considerablemente a la zona.



Figura 16. Vista ampliada de Buenavista del Norte. (Fuente: Google Maps)

El terreno donde se va a ubicar la planta de desalación, según la Sede Electrónica del Catastro y la Ocupación de Suelos de España, es de uso agrario, más concretamente de cultivo de plataneras. No obstante, para la realización del proyecto es necesario que la instalación esté situada cercana al mar. Esto se debe a que se utilizará energía undimotriz para abastecer la planta de desalación y debido al oleaje es uno de los puntos geográficos más ventajosos de la isla. Además, la instalación facilitará el riego de los cultivos de plataneras del municipio, por lo que será beneficioso para la agricultura. La planta, al ser alimentada por la energía de las olas, no ocupará toda la parcela designada por lo que se podría diseñar una ampliación en un futuro.

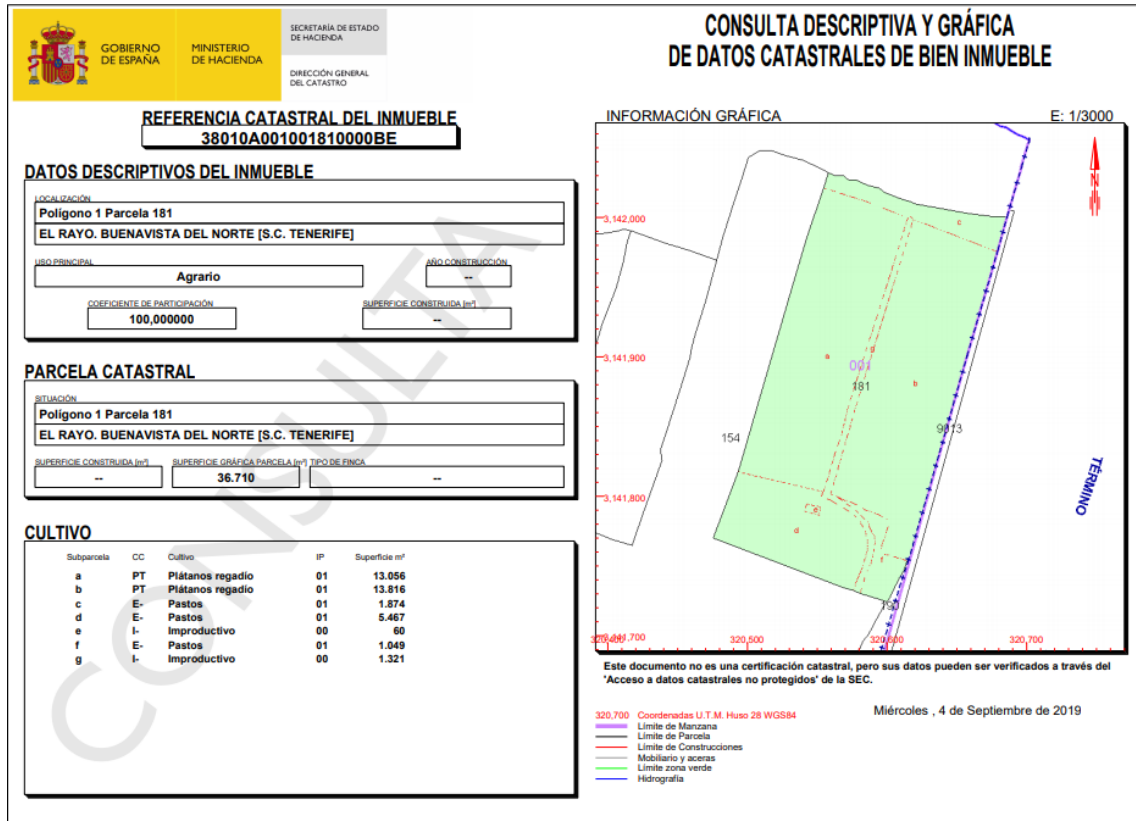
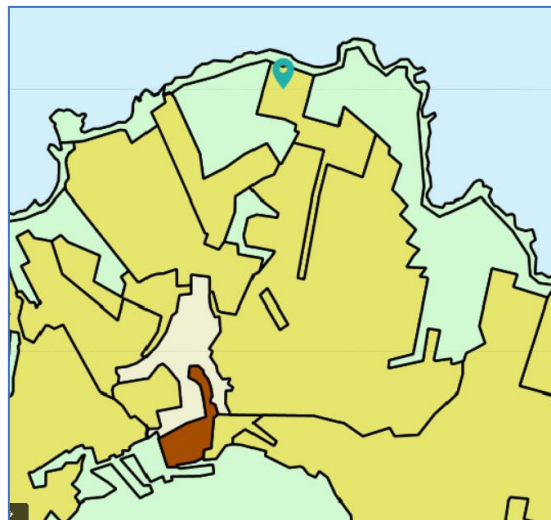


Figura 17. Consulta descriptiva y gráfica de la parcela catastral donde se ubicará la planta de desalación (Fuente: Sede Electrónica del Catastro)



SIOSE 2014							
ID	Código iberpix	Cubierta terrestre iberpix	Código CODIIGE	Cubierta terrestre CODIIGE	Código Uso de suelo	Uso del suelo HILUCS	Superficie (Ha)
b10dd6be-b3cc-4678-adcc-e1e5217847e4	220	Cultivos Leñosos	220	Invernadero	110	1_1 Agricultura	10.65

Figura 18. Ocupación del suelo de la ubicación de la parcela

La instalación se encontraría situada en España para facilitar la normativa que se aplicaría. Se ha considerado la normativa respecto al medio ambiente de espacios protegidos para la colocación de los sistemas de energía undimotriz que irán ubicados en el mar. La Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y la Biodiversidad establece las áreas protegidas en la isla de Tenerife. Esta información es proveniente de la Red Natura 2000, la cual ha sido creada como una red ecológica europea para la conservación de hábitats naturales de la fauna y flora silvestres. Su finalidad es asegurar la supervivencia a largo plazo de especies y zonas más amenazadas de Europa.

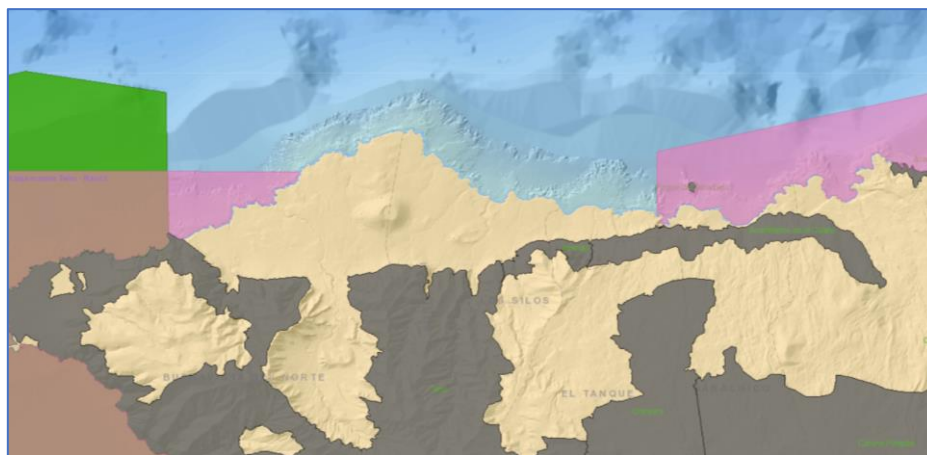


Figura 19. Espacios protegidos según Red Natura 2000

Los espacios protegidos se dividen en dos tipos: las Zonas Especiales de Conservación (ZEC) y las Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA). En las Figuras 20 y 21 se pueden apreciar las limitaciones en la isla de Tenerife, cuyos datos fueron proporcionados por la Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias (IDEC). El primer espacio protegido son áreas para la conservación de la diversidad, conforme a la directiva comunitaria 92/43/CEE, dichos lugares han de haber sido de importancia comunitaria. Por otro lado, el segundo grupo es una categoría de área protegida como zonas naturales de singular relevancia para la conservación de la avifauna amenazada de extinción, de acuerdo a la directiva comunitaria 79/409/CEE.

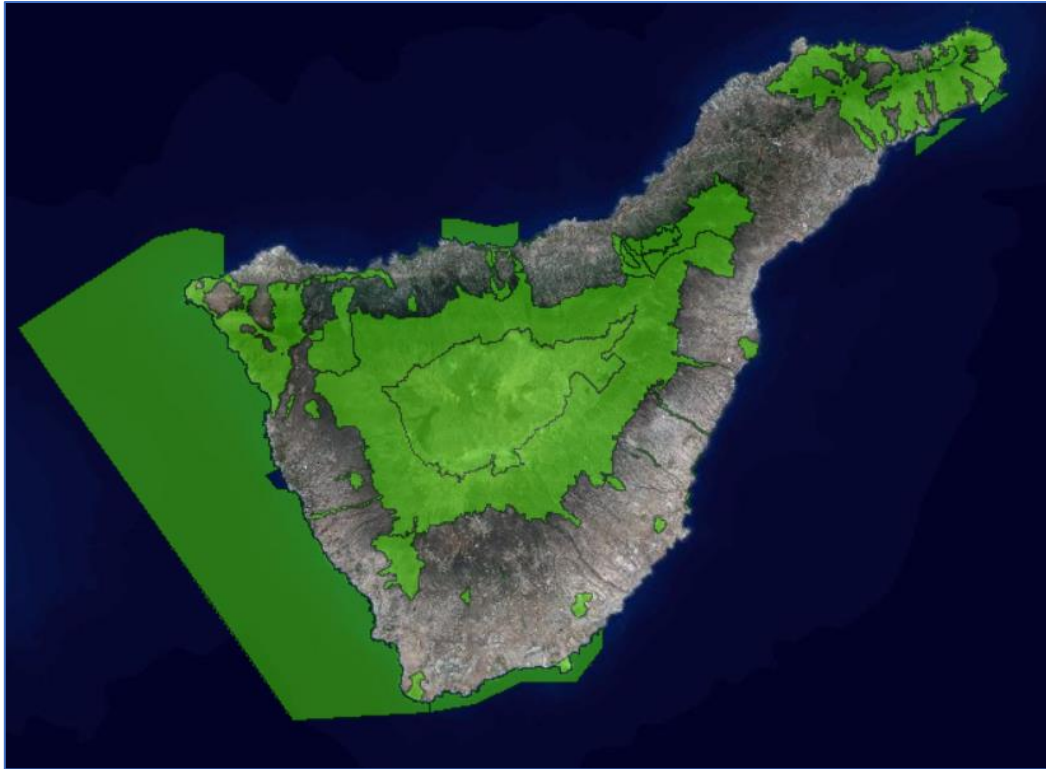


Figura 20. Zonas Especiales de Conservación (ZEC). (Fuente: IDE Canarias)



Figura 21. Zonas de Especial Conservación de las Aves (ZEPA). (Fuente: IDE Canarias)

La planta desalinizadora sería deseable que se pudiera encontrar en una zona industrial para evitar posibles problemas con la población cercana. No obstante, debido a la limitación de lugares óptimos que cumplan ambas condiciones descritas, no se ha podido designar un emplazamiento mejor.

Una vez escogida la isla de Tenerife hay que definir el emplazamiento concreto de nuestra planta. Basándonos en los requerimientos anteriores, se seleccionará el municipio de Buenavista del Norte en la zona próxima al municipio de Los Silos.

7.3. Datos de partida

El diseño de la planta desaladora debe tener en cuenta dos aspectos importantes antes de su estudio. Depende de un análisis del agua que se va a tratar y la calidad del agua que se pretenda obtener. Es imprescindible tener conocimiento de las características físicas y químicas, ya que determinan los tratamientos a emplear. En el caso del proyecto, el agua producto será de uso agrícola, por lo que dependiendo del cultivo se requiere de una pureza diferente.

Los parámetros que influyen en el flujo de captación y se estudiarán en el proyecto son:

- El pH: es una medida que determina el grado de alcalinidad o acidez de una solución, por medio de un análisis iónico del hidrógeno en el agua. Un valor muy alejado al valor óptimo establecido puede afectar considerablemente a la instalación. Un pH alto favorece las incrustaciones o precipitación de sales sobre las superficies de una instalación. Mientras que un pH bajo favorece la corrosión. El análisis químico del agua de alimentación para la planta de desalación se dispondrá de la ubicación más cercana. Asimismo, para el cultivo de plataneras se establecerá un valor óptimo para el riego, con un bajo porcentaje de los agentes químicos más perjudiciales.
- La temperatura: es una característica física que tiene un efecto importante en el funcionamiento de la planta de desalación. En las zonas de costa sufre variaciones relevantes a lo largo del año, incluso en lugares como Canarias con una mayor estabilidad. Esto afecta al crecimiento biológico de microorganismos, lo cual

perjudica el paso de flujo de agua por el bastidor de membranas. Además, la temperatura influye en el índice de solubilidad de las sales que produciría precipitados sobre las membranas. Otro aspecto que influiría sería la viscosidad del agua, ya que, si aumenta debido a la disminución de temperatura la presión que habría que ejercer para el paso de las membranas sería mayor, aumentando la potencia energética. De igual manera, la dilatación de los materiales se debería controlar con esta característica. La temperatura que se ha establecido en el proyecto ha sido una media desde el punto geográfico más próximo, mediante los datos obtenidos en Puertos del Estado.

- La salinidad: es la concentración de sales que se encuentra en el agua, se expresa como residuo seco a TDS (Sólidos Totales Disueltos) cuya unidad se mide en mg/L o ppm. Un análisis de la composición del agua ofrece los distintos elementos que se encuentran integrados en ella. El estudio de la misma es necesario, ya que existe una diferencia entre agua de mar y agua salobre. La conductividad eléctrica aumenta cuanto mayor cantidad de elementos disueltos contenga. El valor en Canarias debe estar próximo entre 34500 mg/L y 38000 mg/L. De la misma forma se tomará una zona próxima a la planta para su análisis.

Los estudios sobre las características físicas y químicas de los flujos de la instalación de desalación estarán explicados en los anexos del proyecto.

Por otro lado, un factor importante en el diseño de la planta es el tamaño que tendrá la instalación en la parcela designada. Los equipos se adaptarán a la capacidad que se requiera. Los sistemas destinados al proceso de ósmosis inversa tienen un mejor funcionamiento cuando se realiza una producción continua. No obstante, si la instalación funciona de manera discontinua, ya que su demanda puede ser variable, se podría estudiar la división modular como recurso.

La capacidad de la planta de desalación dependerá de la zona de aplicación de riego de los cultivos, aparte de otros parámetros como los valores de precipitaciones o la distribución del agua permeada. Se estimará un valor entre 1000 y 3000 m³/día, debido a la limitación que presenta la forma de abastecimiento energético. Además, la instalación de desalación servirá como solución a la demanda hídrica agrícola que existe en el

municipio. De igual forma, en el anexo 1 se explicará el proceso de obtención de la capacidad de la planta.

8. Análisis de soluciones

En este apartado se realizará un análisis sobre las condiciones tomadas en el proyecto y sus alternativas más destacables. Las elecciones que se han tomado como solución para el diseño la planta de desalación, están explicadas en los anexos posteriores.

8.1 Capacidad de la planta desaladora

El diseño de la capacidad de la planta desaladora depende de la zona que se vaya a abastecer, es decir, la cantidad de agua necesaria que deberá producir para regadío. El cálculo de la demanda del cultivo de plataneras no es una labor sencilla, ya que Buenavista del Norte es una de las zonas con mayor producción de la isla. Según el Mapa de Cultivos de Tenerife de la campaña 2015-2016 la superficie total de plataneras correspondería a 294,15 hectáreas, de las cuales se ha estudiado como hipótesis inicial cubrir de regadío un 20%, es decir, 58,83 hectáreas. En la tabla 1 se han extraído de los datos de la Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca del Gobierno de Canarias lo referente al cultivo de plataneras en Buenavista del Norte. En ella se muestra la superficie total en hectáreas de plataneras que se encuentran, cuanta está cultivada en invernadero y que posea sistemas de riego, lo cual es su completa totalidad.

Tabla 1. Mapa de Cultivos de Tenerife (Campaña 2015-2016)

<i>Categoría</i>	<i>Cultivo</i>	<i>Superficie Total (Ha)</i>	<i>Superficie en Invernadero (Ha)</i>	<i>Superficie en Regadío (Ha)</i>
<i>Platanera</i>	<i>Platanera</i>	<i>294,15</i>	<i>64,43</i>	<i>294,15</i>

(Fuente: Gobierno de Canarias. Elaboración Propia)

El objetivo de la planta de desalación sería poder abastecer de recursos hídricos la mayor cantidad de cultivos posibles, limitando su capacidad a un tamaño medio o

pequeño. De esta forma, el planteamiento del sistema undimotriz tendrá un margen mayor para el abastecimiento completo de la instalación.

El cálculo de las necesidades hídricas se ha realizado según el procedimiento explicado en *agrocabildo.org*. La propia página web permite obtener los parámetros característicos, al instante de seleccionar el tipo de cultivo. No obstante, los datos devueltos eran válidos durante el periodo de búsqueda. Por este motivo, para la obtención de valores más próximos a la realidad se calcularon las necesidades hídricas de forma manual con ayuda de la herramienta Microsoft Excel 2016. La necesidad de riego se calcula mediante tres factores: la evapotranspiración del terreno, el coeficiente de cultivo (platanera) y la precipitación efectiva. Los datos que se han utilizado para los resultados de las necesidades hídricas en la Tabla 2 son correspondientes al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del año 2018.

Tabla 2. Necesidades Hídricas

<i>Mes</i>	<i>Coeficiente de cultivo, Kc</i>	<i>Precipitación efectiva, Pef [mm/mes]</i>	<i>Necesidad de riego [m³/mes]</i>	<i>Necesidad de riego [m³/semana]</i>	<i>Necesidad de riego [m³/día]</i>
<i>Enero</i>	0.5	14.5	15365.01	3841,25	495,65
<i>Febrero</i>	0.5	44.1	0.0	0.0	0.0
<i>Marzo</i>	0.6	8.9	37166.72	9291,68	1198,93
<i>Abril</i>	0.6	0.8	45126.07	11281,52	1504,20
<i>Mayo</i>	0.6	0.8	51424.34	12856,09	1658,85
<i>Junio</i>	0.6	1.7	54538.87	13634,72	1817,96
<i>Julio</i>	0.7	0.0	72118.66	18029,66	2326,41
<i>Agosto</i>	0.8	0.0	70596	17649	2277,29
<i>Septiembre</i>	0.9	0.0	73779.74	18444,94	2459,32
<i>Octubre</i>	1.0	0.0	62844.28	15711,07	2027,23
<i>Noviembre</i>	1.0	8.6	42426.81	10606,70	1414,23
<i>Diciembre</i>	1.0	0.0	50801.44	12700,36	1638,76

(Fuente: Elaboración Propia)

Los resultados obtenidos de las necesidades de riego en Buenavista del Norte muestran unos valores muy variables dependiendo del mes. Esto se debe a que las condiciones meteorológicas, como es de esperar, no se mantienen regulares durante todo el año. En las plantas desaladoras las paradas de producción no son beneficiosas por lo que requieren constancia para una mejor eficiencia de la instalación.

Una primera hipótesis, al realizar la media de la capacidad de la planta sería de 1568,24 m³/día, que se encontraría en un rango aceptable para el proyecto. Sin embargo, se requerirán varias paradas de mantenimiento durante todo al año, por lo que sería un inconveniente para la producción de forma continua. De esta manera, al observar que en el mes de febrero las necesidades hídricas son nulas, se ha decidido efectuar una parada de producción en dicho mes. La capacidad de la planta quedaría como la media entre los once meses restantes con un valor de 1710,80 m³/día.

En el proyecto se ha decidido aumentar la producción de agua desalada hasta los 2000 m³/día, ya que cumpliría con el tamaño de la planta propuesta; el excedente de agua sería menor y el abastecimiento de cultivos sería mayor. Por lo tanto, el área de riego aumentaría hasta las 68,77 hectáreas, más de un 23% del cultivo total. Según los datos calculados se podría suministrar agua todos los meses menos julio, agosto, septiembre y octubre, con la capacidad estudiada. El resto del año sobraría agua en la distribución de los cultivos, por lo que se ha optado por diseñar un depósito abierto en la misma parcela que la planta, que sirva para depositar el excedente y extraer cuando se necesite.

Tabla 3. Agua del depósito

<i>Mes</i>	<i>Abastecimiento de agua [m³]</i>	<i>Agua del depósito [m³]</i>	<i>Agua depositada (+) /extraída (-) del depósito [m³/día]</i>
<i>Enero</i>	62000	53154.63	38952.48
<i>Febrero</i>	0	53154.63	0
<i>Marzo</i>	62000	59404.55	6249.92
<i>Abril</i>	60000	67093.66	7689.11
<i>Mayo</i>	62000	51957.15	-15136.51

<i>Junio</i>	<i>60000</i>	<i>73765.46</i>	<i>21808.31</i>
<i>Julio</i>	<i>62000</i>	<i>27587.47</i>	<i>-46177.99</i>
<i>Agosto</i>	<i>62000</i>	<i>71481.47</i>	<i>43894</i>
<i>Septiembre</i>	<i>60000</i>	<i>20811.86</i>	<i>-50669.61</i>
<i>Octubre</i>	<i>62000</i>	<i>53078.28</i>	<i>32266.42</i>
<i>Noviembre</i>	<i>60000</i>	<i>49438.06</i>	<i>-3640.22</i>
<i>Diciembre</i>	<i>62000</i>	<i>14202,15</i>	<i>14202.15</i>

(Fuente: Elaboración Propia)

El depósito, como se puede observar en la Tabla 3, dispone de diferentes volúmenes de agua a lo largo del año. El máximo que almacenaría sería de 73765,46 m³ en el mes de junio, lo que supone un volumen final de 74000 m³. Las dimensiones no son excesivamente grandes, ya que los datos que se han tomado para el cálculo son de un único año y pueden ocurrir variaciones a lo largo del tiempo. No obstante, los resultados no serían muy dispares, pudiendo sufrir alguna modificación en cuanto a la zona de abastecimiento de cultivos.

8.2. Sistema de captación de agua de mar

El sistema de captación de agua de mar se encarga de abastecer a la planta de desalación, y hay dos formas más comunes para la obtención de agua: las tomas cerradas, mediante pozos aislados o una cántara, y las tomas abiertas, ya sean superficiales o con un emisario submarino. Estas últimas para este tipo de instalaciones no suponen un problema en cuanto al caudal de extracción, sin embargo, el rendimiento puede variar debido a varios factores que afectan directamente. Entre ellos se encuentran: la presencia de sólidos en suspensión, la elevada actividad orgánica y biológica, una mayor exposición a la contaminación y una temperatura variable. El método de captación por toma abierta es de un uso más frecuente en instalaciones grandes, de agua salobre o cuando las características de impermeabilidad del terreno no permiten el abastecimiento de otra forma.

Por otro lado, las tomas cerradas son utilizadas con más frecuencia en plantas de desalación por ósmosis inversa, ya que sus ventajas son mejores que en el caso anterior.

El abastecimiento por pozos ofrece una limpieza natural como consecuencia de su filtrado en el terreno, obteniendo a su vez unos índices de turbidez (NTU) y de colmatación (SDI) bajos. Además, cuenta con una ausencia de actividad orgánica y biológica, una baja contaminación y una temperatura más estable. Este tipo de captación mejora la calidad del flujo de alimentación mejor que el de toma abierta, siempre y cuando no presente los siguientes inconvenientes: la permeabilidad del caudal de agua, contenido de algunos elementos como el hierro, el aluminio o el flúor, y su variación química a lo largo del tiempo. La localización de la planta también puede dificultar debido a que en zonas costeras la construcción de estas estructuras es un impedimento para la distribución y diseño de la instalación.

Una vez realizada la comparación entre ambas posibilidades de captación para el proyecto se ha decidido optar por los pozos cerrados, ya que ofrecen ventajas para el proceso de desalación por ósmosis inversa. Además, la capacidad que debe producir la planta no es muy elevada y la calidad del agua debe tener unas características óptimas para el riego de plataneras.

8.2.1. Pozos de captación

Los pozos de captación que se dispondrán para la planta de desalación se establecerán como se muestra en la Figura 22, es decir, lo más próximo a la costa. Esto se debe a que el terreno se encuentra en pendiente, que se aproximará a un valor medio, y así realizar una menor obra de excavación. Su diseño y ubicación debería realizarse mediante un análisis específico, no obstante, se justifica su ausencia por el alcance limitado de este proyecto. Se ha considerado que una zona cercana al mar sería lo más beneficioso, tanto para el proceso de captación como el de distribución.

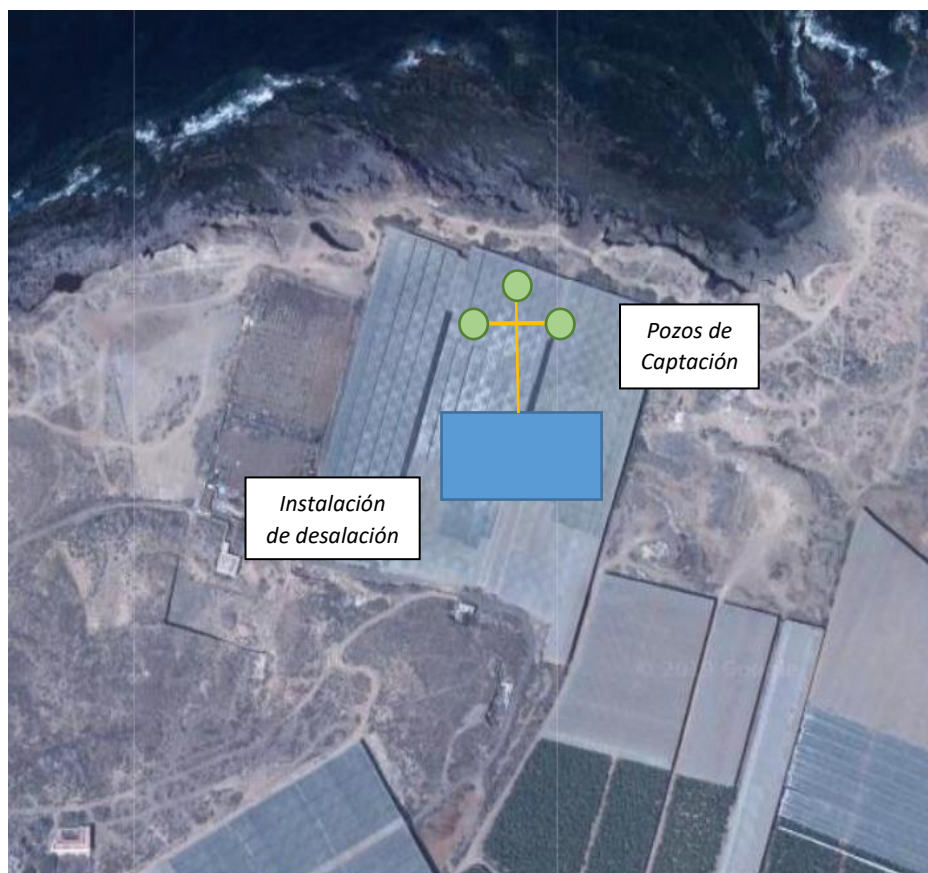


Figura 22. Diseño de establecimiento de pozos de captación

La cantidad de pozos necesarios se ha establecido comparando instalaciones de desalación ya existentes y la capacidad de la planta del proyecto. Un primer estudio da como resultado un total de dos pozos totales para abastecer la planta, de los cuales uno estaría operativo y otro en reserva para posibles mantenimientos o paradas no previstas durante el proceso de operación.

Por otro lado, se ha decidido aumentar la cantidad a un total de tres pozos y así evitar una dependencia por una única bomba para la producción. Asimismo, se impide una saturación del sistema y posibles problemas futuros. La disposición de los pozos se realizaría en cruz, con una longitud cada uno de 18 metros de tubería, por medidas de seguridad, que se unen en un punto colector a 40 metros de la planta de desalación.

La profundidad de los pozos depende de tres factores fundamentales: la bajamar máxima, la altura máxima de los pozos sobre el nivel del mar y las pérdidas de carga del

proceso. La altura de los pozos establecida por igual sería de 30 metros de profundidad, situando las bombas de captación a 28 metros, con un margen de seguridad bastante amplio. La columna de agua que se generaría aseguraría el correcto funcionamiento de las bombas y se evitarían problemas en la producción de la planta desaladora.

8.2.2. Tuberías de captación y alimentación

Una vez conocidas las longitudes de las tuberías de captación, desde la bomba de captación hasta el punto colector, y las tuberías de alimentación, desde el punto colector hasta la planta de desalación, se debe establecer su material y sus diámetros.

El material utilizado para ambos tramos de tuberías es el poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), ya que presenta varias propiedades que favorecen los sistemas de transporte de fluidos. El fabricante seleccionado para su disposición es Flowtite, distribuidor en España de la empresa Amiblu. Además, la marca ofrece una gran posibilidad de diámetros para la instalación de desalación.

Las tuberías de captación serían iguales para cada uno de los tres pozos, con una longitud de 48 metros, un caudal de 2222,22 m³/día por pozo operativo, y sus diámetros deben ser idénticos para que se mantenga el flujo de captación y alimentación. El circuito estaría compuesto por 30 metros de tubería vertical, que se tendrían en cuenta en el diseño de las bombas, y 18 metros considerados como horizontales hasta el colector de alimentación. El cálculo realizado por el criterio de Bonnet del diámetro de las tuberías de captación sería de 193 milímetros, por lo tanto, se selecciona como diámetro nominal del proveedor 200 milímetros. En la Tabla 4 se pueden observar los parámetros característicos calculados, así como las pérdidas de carga primarias del tramo.

Tabla 4. Datos tuberías de captación

Caudal (m ³ /seg)	0,0257
Diámetro (mm)	200
Longitud (m)	48
Velocidad (m/seg)	0,819

<i>Coefficiente de fricción</i>	<i>0,0173</i>
<i>Pérdidas de carga (m)</i>	<i>0,142</i>

(Fuente: Elaboración Propia)

Por otro lado, las tuberías de alimentación comprenden un tramo distinto al anterior. El sistema tendría una longitud de 40 metros distribuido de manera horizontal, y el caudal del flujo de agua que las atravesaría es el doble, 4444,44 m³/día. El tramo comprende desde el punto colector hasta el bastidor de membranas, incluyendo los pretratamientos correspondientes. El diámetro calculado, utilizando los mismos criterios, es de 255 milímetros para las tuberías de alimentación; para la instalación se ha tomado el diámetro nominal de 300 milímetros.

Tabla 5. Datos tuberías de alimentación

<i>Caudal (m³/seg)</i>	<i>0,0514</i>
<i>Diámetro (mm)</i>	<i>300</i>
<i>Longitud (m)</i>	<i>40</i>
<i>Velocidad (m/seg)</i>	<i>0,728</i>
<i>Coefficiente de fricción</i>	<i>0,0162</i>
<i>Pérdidas de carga (m)</i>	<i>0,058</i>

(Fuente: Elaboración Propia)

Aparte de las pérdidas de carga primarias que se encuentran definidas en las tablas anteriores, también se deben considerar las secundarias producidas por los accesorios, para el estudio de los siguientes apartados. De esta manera se ha tenido en cuenta para el tramo de captación las pérdidas de carga producidas por un codo de 90°, en cada uno de los pozos, y un empalme en T normal; un total de 0,073 metros.

8.2.3. Bombas de captación

Las bombas de captación del sistema constan de un total de tres, una por cada pozo. Los dos puntos de estudio que se han considerado son el mínimo nivel de agua calculado y el otro estaría a la entrada de la bomba de alta presión. La diferencia de altura sería de 30 metros, y tanto la presión como la velocidad en el primer punto se consideran nulas. A partir del punto del colector el caudal aumentaría al doble, no obstante, se considera que ambas bombas trabajarían a la vez en dicho tramo. Cabe destacar que la presión a la entrada de la bomba de alta presión es de cuatro bar, ya que se añadirían las pérdidas de carga en el pretratamiento igual a dos bar.

El punto de operación de la bomba de captación sería un caudal de 0,0257 m³/s y una altura de la bomba de 34,38 m. El tipo de bomba más adecuado para el abastecimiento de agua en pozos cerrados es el sumergible. Asimismo, se ha consultado en varios fabricantes los modelos que se ofrecen actualmente en el mercado, entre ellos han sido Grundfos, KSB y Lowara. En la Tabla 6 se han recopilado los parámetros más característicos de cada una de las bombas seleccionadas. Los costes de las bombas no se han tenido en consideración, ya que no se dispone de los datos de cada uno de ellas.

Tabla 6. Fabricantes de la bomba de captación

<i>Fabricante</i>	<i>Modelo</i>	<i>Potencia (kW)</i>	<i>Rendimiento (%)</i>
Grundfos	<i>SP 95-3</i>	<i>13</i>	<i>73,7</i>
KSB	<i>UPA 200B-80</i>	<i>11,5</i>	<i>77,28</i>
Lowara	<i>Z875 02-L6W</i>	<i>11</i>	<i>76</i>

(Fuente: Elaboración Propia)

Una vez obtenidos los resultados de cada uno de los modelos de bombas, se ha seleccionado el modelo UPA 200B-80 del fabricante KSB, ya que presenta un mejor rendimiento que la bomba de Lowara.



Figura 23. Bomba sumergible KSB de la serie UPA (Fuente: KSB)

8.3. Pretratamiento

El pretratamiento es una etapa fundamental en el proceso de desalación por ósmosis inversa, ya que no permite que componentes orgánicos e inorgánicos deterioren las membranas y disminuyan el rendimiento de la instalación. En el proyecto se han escogido los tratamientos más beneficiosos para el cultivo de plataneras, no obstante, al depender del software de diseño de la empresa Suez (Winflows) los procedimientos están limitados. Se encuentran tanto los pretratamientos físicos como químicos.

Los métodos de pretratamiento físico principalmente están compuestos por filtros de arena y filtros de cartuchos, además de una posible filtración más restrictiva en caso de que sea necesario. El software únicamente permite colocar filtros de cartucho que garanticen un nivel de filtración mínimo de cinco micras, el requerido por los fabricantes de membranas. De esta manera para evitar las posibles consecuencias que conlleva una mala retención de los sólidos, se han dispuesto varios filtros de la marca Suez.



Figura 24. Filtros de cartucho High Flow Z (Fuente: Suez)

En la Figura 24 se puede observar el modelo seleccionado para la instalación, que ha sido la serie HFZ (High Flow Z) que trabaja con tecnología Z. Plex, es el HFZ05. Se establecerán catorce filtros con una distribución en la que el flujo atraviese verticalmente para su correcto funcionamiento.

Por otro lado, los pretratamientos químicos que se utilizarán en la instalación de desalación será la regulación de pH, debido a que la composición del agua de mar de la zona no cumple con los requisitos mínimos de las membranas. Un valor óptimo de pH

sería de siete, no obstante, debido a que sobrepasa los índices de saturación, se ha decidido reducir hasta 6,5 como medida de prevención. Para este proceso se ha escogido el ácido clorhídrico con una gran concentración, evitando a su vez inconvenientes como la precipitación sobre las membranas.

8.4. Núcleo de desalación

El núcleo de desalación está formado por todos los elementos que realizan el proceso de desalinización por ósmosis inversa. El estudio de los siguientes apartados se ha realizado con los resultados obtenidos anteriormente y las soluciones propuestas.

8.4.1. Bastidor de membranas

Las membranas que se utilizarán serán diseñadas por el fabricante Suez mediante el software de cálculo que ofrecen, Winflows. El catálogo que ofrece es muy amplio, que se observa en la Figura 25. Para la aplicación en el proceso de ósmosis inversa, no obstante, se ha seleccionado para el proyecto la serie A de membranas. Además, si se desea una filtración menos permisiva, permite escoger tratamientos como la nanofiltración, la ultrafiltración y hasta la microfiltración. La serie de membranas optada abarca tanto el tratamiento de agua salobre como de agua de mar, caracterizándose por un excelente rechazo al cloruro de sodio.

El tipo de membranas seleccionadas dentro de la serie son las AE frente a las AD, ya que ofrecen unas características similares, menos por el consumo energético que sería menor, debido a que uno de los requisitos de la planta de desalación es que su producción no sea de gran tamaño y pueda ser abastecida por la fuente de alimentación renovable escogida. Asimismo, existen varios tipos de membranas dentro de este grupo que son: la AE-90, la AE-400.34, y la AE-440.

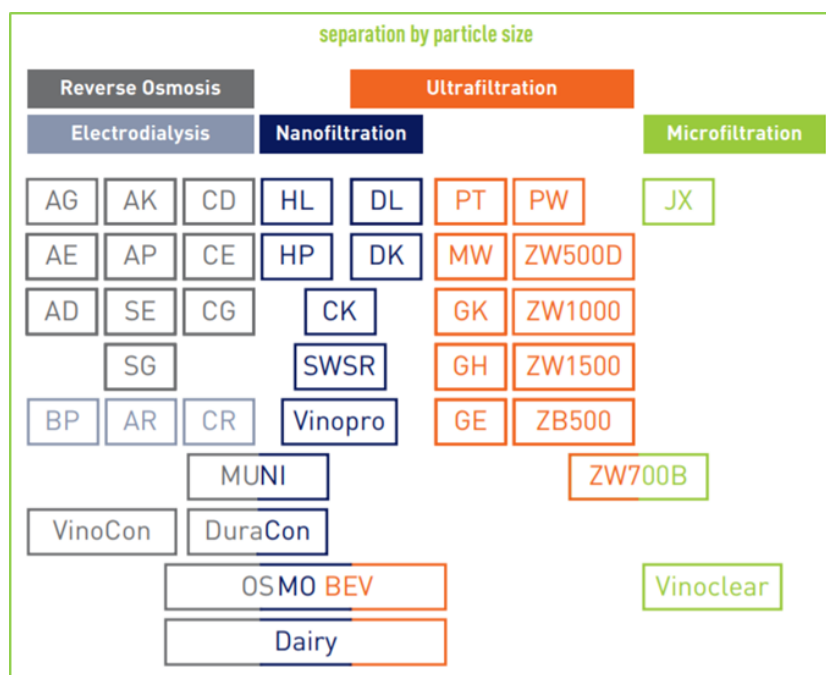


Figura 25. Tipos de membranas de la marca Suez (Fuente: Suez)

Una vez obtenidos los datos de cada una de las membranas por medio del fabricante, se realizarían las simulaciones en el software de diseño Winflows. El cálculo del número de membranas necesarias depende del flujo de permeado, el flujo típico de funcionamiento y el área activa de la membrana. Además, la composición química del agua afectaría a la selección de las membranas porque afecta a la calidad de producción de la planta. Todos son datos ya conocidos, y el procedimiento de estas operaciones se encuentra en el anexo 1 del proyecto.

Tras esto, se estima el número de tubos dependiendo de la agrupación de las membranas, siendo las más típicas de seis o siete. Su modulación se caracteriza por colocarse en unas estructuras resistentes, ya que deben soportar las altas presiones a las que son sometidas. Uno de los problemas que se evita con ello son los golpes de ariete que se producen en los arranques de la instalación.

Tabla 7. Resultados de los cálculos del número de membranas y del número de tubos de presión

<i>Modelo</i>	<i>Flujo típico de funcionamiento (L/m²h)</i>	<i>Área Activa (m²)</i>	<i>N.º de membranas</i>	<i>N.º de tubos de presión (6 membranas)</i>	<i>N.º de tubos de presión (7 membranas)</i>
AE-90	15,5	8,4	641	107	92
AE-400,34	15,5	37,2	145	25	21
AE-440	15,5	40,9	132	22	19

(Fuente: Elaboración Propia)

Según los resultados obtenidos en la Tabla 7, en cuya simulación se ha establecido un porcentaje de conversión del 45%, que estaría en el rango óptimo para la desalación de agua de mar, se observa que los valores para el modelo AE-90 son muy elevados. Asimismo, se descartaría como opción para la planta, quedando los otros dos modelos con características similares. De esta manera, se ha decidido simular para ambos casos comparando únicamente los consumos específicos.

Tabla 8. Consumos específicos según el modelo de membranas

<i>Modelo</i>	<i>Consumo específico 6 membranas (KWh/m³)</i>	<i>Consumo específico 7 membranas (KWh/m³)</i>
AE-400,34	4,83	4,82
AE-440	4,85	4,84

(Fuente: Elaboración Propia)

Entre los dos modelos estudiados, se observa en la Tabla 8 que los consumos específicos no varían considerablemente entre ellos. Sin embargo, se ha optado por el modelo AE-440 con siete membranas y diecinueve tubos de presión, ya que ofrece una menor cantidad de tubos entre todas las analizadas.

8.4.2. Bomba de alta presión

La bomba de alta presión forma una parte fundamental del núcleo de desalación y su consumo específico presenta una mayor influencia debido a su función, no solo en el proceso de desalación, sino que su consumo es el máximo gasto energético de la instalación, contando únicamente los dispositivos estudiados. De igual manera que en casos anteriores, se han establecido dos puntos de estudio, uno a la entrada de la bomba y el otro a la entrada del bastidor de membranas. La presión que llega a la entrada de la bomba sería igual a la del flujo de alimentación, mientras que el dato de la presión a la entrada del bastidor se obtiene de los datos del simulador y las hojas de cálculo empleadas.

Según los cálculos realizados en el anexo 2, el punto de operación para la bomba de alta presión sería igual a un caudal de 0,0234 m³/s y una altura de la bomba de 616,81 metros. El estudio de esta bomba para los mismos fabricantes ha sido imposible, ya que los modelos ofrecidos no se podían considerar como una posibilidad para el proyecto. Asimismo, se ha optado por consultar otras dos empresas que permitan dar una solución apta en la instalación, estas son Sulzer y Flowserve.

Tabla 9. Fabricantes de la bomba de alta presión

<i>Fabricante</i>	<i>Modelo</i>	<i>Potencia (kW)</i>	<i>Rendimiento (%)</i>
Grundfos	-	-	-
KSB	-	-	-
Lowara	-	-	-
Sulzer	<i>MSN50-215</i>	<i>189</i>	<i>74,62</i>
Flowserve	<i>3X10DMX-B</i>	<i>250</i>	<i>68</i>

(Fuente: Elaboración Propia)

En la Tabla 9 se observa una clara diferencia en cuanto a los parámetros característicos de las bombas, por lo tanto, sin tener en cuenta los costes, el modelo de bomba seleccionada sería el MSN50-215 del fabricante Sulzer. Tanto la potencia consumida como el rendimiento presentan valores muy favorables y aptos para el proceso de ósmosis inversa.

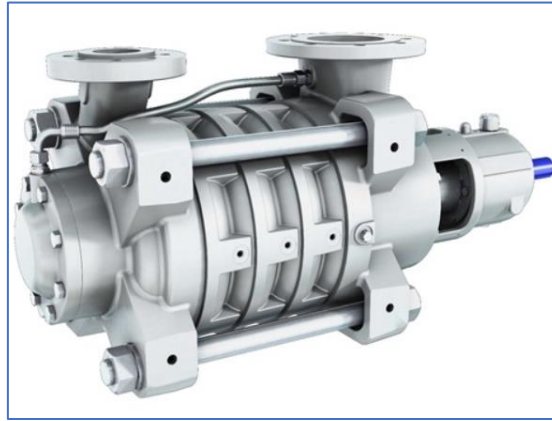


Figura 26. Bomba Sulzer de la serie MBN (Fuente: Sulzer)

8.4.3. Intercambiadores de presión

Los equipos recuperadores de presión se suelen utilizar en las plantas de desalación como medida de reducción del consumo energético. Este dispositivo se encarga de aprovechar el flujo de salmuera que es rechazado por el bastidor de membranas, que se encuentra a una elevada presión. Entre los sistemas más destacables se encuentran: la turbina Pelton, el turbo-charger y el intercambiador de presión.

En el proyecto se ha decidido utilizar los intercambiadores de presión ya que ofrecen muchas más ventajas en cuanto al proceso de desalación por ósmosis inversa, destacando el consumo específico de los mismos. Los resultados obtenidos en la Tabla 10 se han realizado por medio del software de dimensionamiento de las membranas, utilizando los valores por defecto de rendimientos.

Una vez seleccionado el intercambiador de presión como recuperador de energía de la planta, se ha decidido comparar entre dos fabricantes distintos, Danfoss y Energy Recovery Inc. Estas empresas ofrecen una facilidad para el estudio de sus dispositivos, que son hojas de cálculo que permiten introducir los datos de la planta e indican los modelos más óptimos de intercambiadores de presión y su consumo específico.

Tabla 10. Consumos específicos de los recuperadores de energía

<i>Recuperador de energía</i>	<i>Consumo específico (KWh/m³)</i>
<i>Sin recuperador de energía</i>	4,84
<i>Turbo-charger</i>	3.057
<i>Turbina Pelton</i>	2.850
<i>Intercambiador de presión</i>	2.344

(Fuente: Elaboración Propia)

Los datos introducidos en las hojas de cálculo en un principio no darían como resultado el consumo específico real de la planta, ya que los valores de rendimiento de la bomba de alta presión y de la bomba booster han sido los predeterminados de las hipótesis. De esta manera, los resultados se usarán para poder comparar entre los modelos de ambos fabricantes, sin tener en cuenta los costes de la instalación. En los siguientes apartados se establecerá un consumo específico real de la planta de desalación.

Los resultados obtenidos de las hojas de cálculo han sido para el modelo iSave50 de la marca Danfoss. Su consumo específico sería igual a 2,64 KWh/m³, con un número de dos unidades, mientras que para el modelo PX-Q300 de la marca Energy Recovery Inc. su consumo específico daría como resultado 2,28 KWh/m³ con las mismas unidades que el anterior. En la Figura 26 se puede observar la hoja de cálculo utilizada para la resolución del último fabricante.

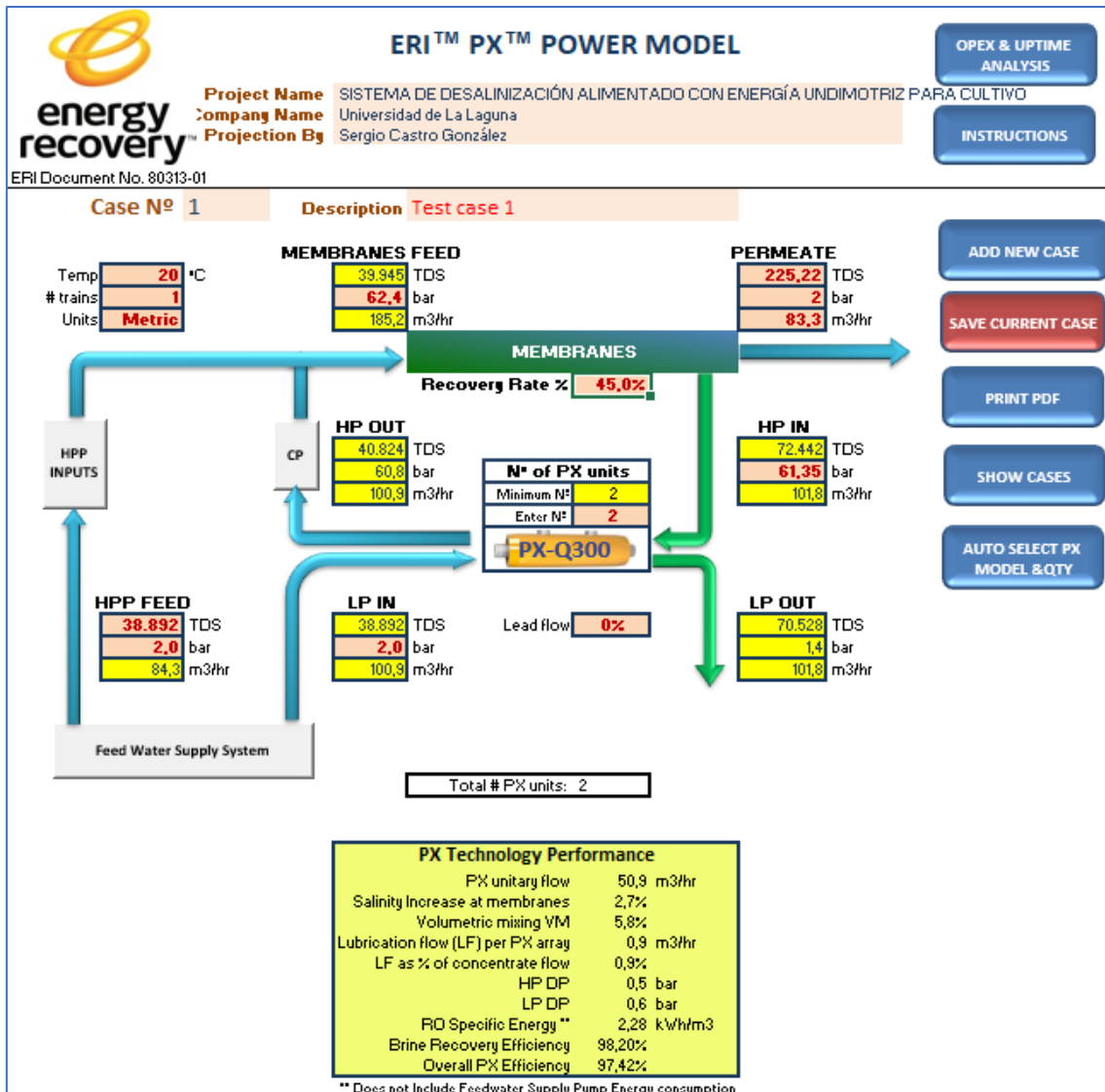


Figura 27. Herramienta de cálculo de Energy Recovery Inc.

Para el caso del proyecto de la planta de desalación se ha decidido utilizar el modelo de intercambiador de presión PX-Q300 del fabricante Energy Recovery Inc. Según los criterios establecidos en las elecciones de los dispositivos de la instalación, el mínimo consumo energético es fundamental para el tipo de abastecimiento de la planta. Asimismo, el valor se utilizará como valor orientativo hasta realizar el cálculo de todas las bombas del núcleo de desalación.

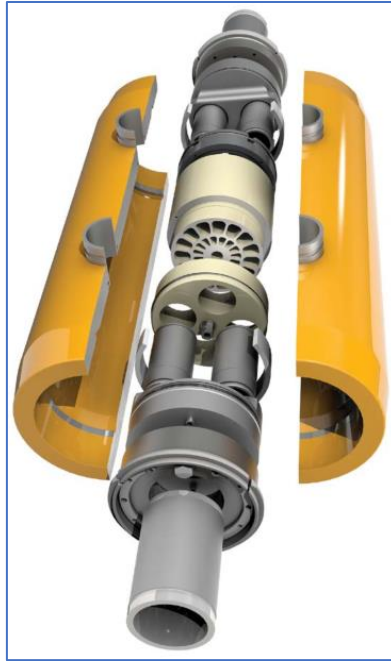


Figura 28. Intercambiador de presión de la serie PX-Q (Fuente: Energy Recovery Inc.)

8.4.4. Bomba Booster

La bomba booster, con respecto a la bomba de alta presión, presentará un menor consumo y una eficiencia mucho mayor, debido a que la diferencia de presiones no será tan grande. El primer punto de estudio será la entrada de la bomba que procede de la salida del intercambiador de presión y el segundo punto es la entrada del bastidor de membranas. Los datos se obtendrán de la hoja de cálculo ofrecida por el fabricante de Energy Recovery Inc. para la comparación de los modelos ofrecidos por los mismos fabricantes que la bomba de captación.

El punto de operación para la bomba booster calculado sería igual a un caudal de $0,0280 \text{ m}^3/\text{s}$ y una altura de la bomba de 16,34 metros. Teniendo en cuenta las mismas hipótesis que en casos anteriores, se obtienen los parámetros característicos de cada uno de los modelos en la Tabla 11. Además, no se han considerado los costes en la selección de esta bomba en la planta de desalación.

Tabla 11. Fabricantes de la bomba booster

<i>Fabricante</i>	<i>Modelo</i>	<i>Potencia (kW)</i>	<i>Rendimiento (%)</i>
Grundfos	<i>NB 65-125/137</i>	6,97	83,7
KSB	<i>080-065-125</i>	5,61	79,91
Lowara	<i>Z875 02-L6W</i>	5,96	80,8

(Fuente: Elaboración Propia)

Según los resultados obtenidos se ha decidido elegir el modelo NB 65-125/137 del fabricante Grundfos. Aunque sea de una empresa diferente a las otras bombas se ha priorizado el rendimiento que ofrece. La diferencia del consumo energético no se considera tan variable como para ser significativa su opción, por ello se optará por la bomba que trabaje con un rendimiento más alto.



Figura 29. Bomba Grundfos modelo NB 65-125/137 (Fuente: Grundfos)

8.5. Postratamiento

La composición del agua producto de la planta de desalación debe tener las propiedades adecuadas para el correcto riego del cultivo de plataneras. En el caso del proyecto el agua saldría del bastidor de membranas con un pH de 5,11 que sería un valor no válido para regadío.

TDS, mg/l		225.22
Flow	m ³ /day	1999.08
Temperature	C	20.00
Pressure	bar	2.00
Osm. Pressure	bar	0.19
pH		5.11
Conductivity at 25C	µS/cm	465.00

Figura 30. Resultados de pH de la simulación en Winflows

Según los datos ofrecidos por AgroCabildo y por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación se debe elevar hasta siete, con objeto de corregir el pH. Este inconveniente es producido por el propio proceso de desalinización de ósmosis inversa. Para solucionarlo se decide realizar la adición de bases en el flujo de producción, más concretamente el hidróxido de sodio (NaOH).

Debido a que la finalidad del agua producida por la planta es el riego de cultivos no es recomendable realizar otros procesos de tratamiento, ya que pueden resultar perjudiciales para el fruto. Si el agua se fuese a destinar para abastecimiento humano sería necesario un proceso de cloración para cumplir la normativa sanitaria en cuanto a la presencia de cloro residual en la red. No obstante, el único factor que resultaría desfavorable para la platanera es el contenido de boro, el cual también se encuentra en un rango óptimo, por lo que no sería necesario otro postratamiento.

8.6. Sistema de distribución

El sistema de distribución que se establecerá en la planta se encuentra más detalladamente en el anexo 1, donde se implanta como solución la construcción de un depósito de 74000 m³. De esta manera, la producción de la planta sería continua durante todo el año, permitiendo abastecer las necesidades hídricas cuando sea imprescindible y almacenarlo cuando ocurra lo contrario.

El depósito se ha decidido ubicar en la parte más cercana a los cultivos de plataneras de la parcela, es decir, en la zona más al sur de la misma. Cerca de la ubicación se encuentra el embalse de la montaña de Taco, el cual también se ha considerado como posibilidad para la distribución del agua desalada. No obstante, se ha optado por la

primera propuesta ya que permite obtener el control sobre el proceso de producción de la planta. Asimismo, tanto el proceso de desalación como el riego de los cultivos de plataneras se realizaría de manera continua.

La planta de desalación, como se comentó con anterioridad, se encuentra en un terreno inclinado con cierta elevación, según los datos obtenidos de la herramienta Goolzoom. Asimismo, suponiendo un valor aproximado de diecisiete metros como cota de la instalación sobre el nivel del mar, el nivel de agua del depósito se establecería a dieciocho metros con respecto a la salida del bastidor de membranas y el postratamiento.

8.6.1. Tuberías de distribución

Una vez definido el depósito para la distribución del agua producto de la planta, se deben dimensionar las tuberías que permitan el abastecimiento de los cultivos de plataneras. Los puntos que comprendería serían la salida del bastidor de membranas con el postratamiento hasta la superficie libre de líquido en el depósito. La diferencia de cota entre las dos posiciones, estableciendo la media del terreno de la planta, sería de dieciocho metros en total.

El depósito abierto estará situado a 35 metros por encima del nivel del mar, y la distancia con respecto a la planta sería de unos 320 metros, que será la longitud de tuberías estimada. El material utilizado será el mismo que para todas las tuberías de la instalación, el poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Además, el diámetro se ha calculado suponiendo las mismas hipótesis del criterio de Bonnet, con el cual se obtendría un diámetro calculado de 185 milímetros, que según el fabricante seleccionado de tuberías tendría un diámetro nominal de 200 milímetros. Cabe destacar que a las pérdidas de carga del tramo de distribución se les ha añadido las pérdidas de dos codos de 90°, como pérdidas de carga secundarias. El depósito se supondrá con las condiciones propuestas, pero no serían resultados reales en el proyecto ya que no lo abarcaría. No obstante, para que sea ejecutable sería necesario un estudio previo de ello.

Tabla 12. Datos de la tubería de distribución

Caudal (m^3/seg)	0,0231
Diámetro (mm)	200
Longitud (m)	320
Velocidad (m/seg)	0,735
Coefficiente de fricción	0,0176
Pérdidas de carga TOTALES (m)	0,825

(Fuente: Elaboración Propia)

En la Tabla 12 se pueden observar los parámetros característicos de las tuberías de distribución que se han obtenido a partir del caudal de producción supuesto como condición de 2000 $m^3/día$, pudiendo abastecer la zona de cultivos seleccionada.

8.6.2. Bomba de distribución

La bomba de distribución es la encargada de pasar el flujo de permeado, una vez que haya salido del bastidor de membranas y el postratamiento, desde la planta hasta el depósito. Las condiciones iniciales de estudio se realizarán de igual manera, comparando los parámetros más relevantes de potencia y rendimiento entre los fabricantes seleccionados. En este caso se ha cambiado de empresa debido a que el catálogo que ofrecía Lowara no permitía un modelo válido para este caso, por lo que se ha recurrido a Flowserve para realizar la comparación.

El punto de la bomba de distribución calculado sería igual a un caudal de 0,0231 m^3/s y una altura de la bomba de 18,8 metros. En la Tabla 13 se pueden observar los resultados obtenidos de las herramientas de selección ofrecidas por cada empresa, sin tener en cuenta los costes.

Tabla 13. Fabricantes de la bomba de distribución

<i>Fabricante</i>	<i>Modelo</i>	<i>Potencia (kW)</i>	<i>Rendimiento (%)</i>
Grundfos	<i>NK 65-125/137</i>	<i>6,87</i>	<i>82,7</i>
KSB	<i>080-065-125</i>	<i>6,41</i>	<i>81,31</i>
Flowserve	<i>SMP 3X3X6</i>	<i>6,91</i>	<i>75,4</i>

(Fuente: Elaboración Propia)

Según los resultados obtenidos y siguiendo los criterios de selección de las demás bombas, se ha seleccionado la bomba de distribución de modelo NK 65-125/137 del fabricante Grundfos. No presenta la potencia absorbida más pequeña de todas, sin embargo, el rendimiento si sería el mayor de todas, de hasta un 82,7%. Sus parámetros son similares a la bomba booster por lo que no supondrá un gasto energético considerable en la planta de desalación.



Figura 31. Bomba Grundfos modelo NK 65-125/137 (Fuente: Grundfos)

8.7. Sistema de rechazo

El flujo de rechazo o salmuera que produce el bastidor de membranas no tiene ninguna función en este proyecto de desalación por lo que deberá ser depositada en el mar. El vertido en sí no es perjudicial, ya que se devuelve al mar una solución con las mismas sales que se captaron en una etapa anterior. El principal problema es que se debe diluir en el mar, ya que la tolerancia a la salinidad de muchas especies varía según la región. El objetivo de ello es evitar un impacto medioambiental en la zona costera cerca de la planta de desalación.

8.7.1. Tuberías de rechazo

El dimensionamiento de las tuberías de rechazo es fundamental para que el proceso de vertido se pueda realizar sin provocar un impacto medioambiental. La instalación que se ha decidido colocar en la planta de desalación es la de un emisario submarino. La profundidad que se designará debe ser suficiente para no afectar a la zona próxima y que permita diluirse con facilidad en el mar. Los datos empleados para el estudio de batimetría, que es un análisis para la medición de las profundidades marinas, son aportados por la herramienta de visualización de la Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias y del Instituto Español de Oceanografía. En la Figura 32 se determina que la distancia para la primera isóbata a unos veinte metros de profundidad es de 757 metros, por lo que se aproximará el valor para una mayor seguridad a 760 metros.

La diferencia de cota que presentarían ambos puntos de estudio sería de 37 metros, teniendo en consideración la altura media de la planta de desalación establecida. Al igual que los casos anteriores, aplicando el criterio de Bonnet para un caudal de 2444,44 m³/día se obtendría un diámetro calculado de 200 milímetros, que sería un diámetro nominal de 250 milímetros.

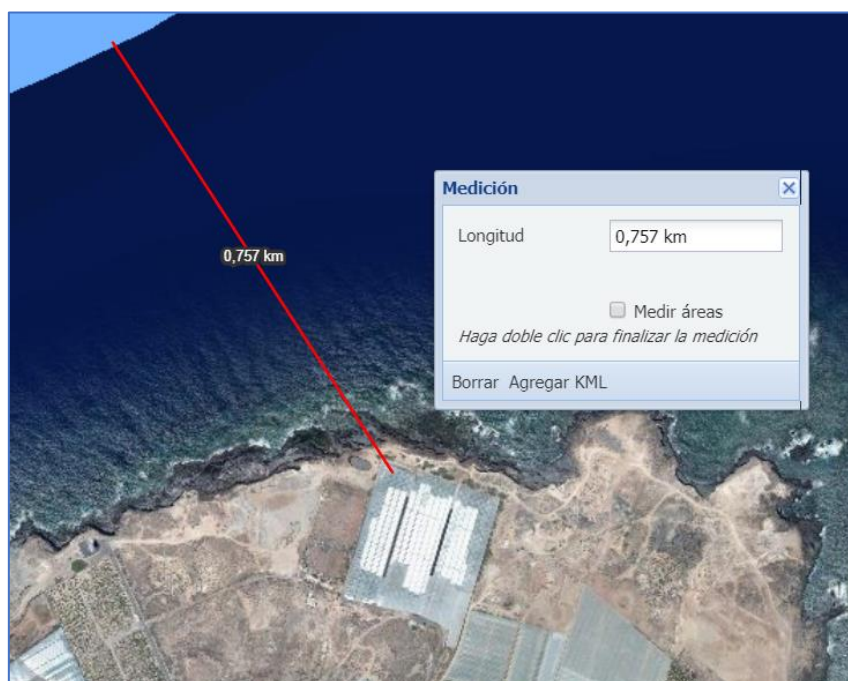


Figura 32. Longitud de tubería de rechazo

En la siguiente tabla se recogen los parámetros característicos de las tuberías de rechazo que se han calculado:

Tabla 14. Datos de la tubería de rechazo

Caudal (m^3/seg)	0,0283
Diámetro (mm)	250
Longitud (m)	760
Velocidad (m/seg)	0,577
Coefficiente de fricción	0,0174
Pérdidas de carga (m)	0,90

(Fuente: Elaboración Propia)

8.7.2. Bomba de rechazo

Según el estudio realizado para el flujo de rechazo de la planta de desalación, debido a la diferencia de cota, muestran que no es necesario la utilización de una bomba de rechazo. La altura de la bomba calculada daría un valor negativo, lo cual supone que la propia acción de la gravedad permitiría el desplazamiento del caudal de rechazo.

8.8. Consumo específico de la planta desaladora

Tras realizar el estudio de los consumos energéticos de todas las etapas de la planta, es necesario conocer el total que requerirá el sistema de abastecimiento por energía undimotriz. Únicamente se considerarán los consumos de los equipos estudiados, que serán las bombas presentes en el trayecto de producción de agua. La configuración de membranas que se ha usado es la misma considerada de siete membranas y diecinueve tubos de presión, para las membranas AE-440, y una conversión del 45% de la concentración de sales.

El cálculo del consumo específico de las bombas se ha realizado a partir de los resultados obtenidos en los apartados anteriores. Además, se ha considerado que el rendimiento del motor eléctrico que está acoplado sea igual en todos los casos al 95%.

Tabla 15. Consumos específicos de cada bomba de la planta

<i>Bombas</i>	<i>Consumo (kW)</i>	<i>Consumo específico (kWh/m³)</i>
<i>Captación</i>	22,98	0,248
<i>Alta presión</i>	189	2,24
<i>Booster</i>	6,97	0,07
<i>Distribución</i>	6,87	0,07
<i>TOTAL</i>	225,82	2,628

(Fuente: Elaboración Propia)

En la Tabla 15 se pueden observar los consumos específicos calculados, y como se consideró, la bomba de alta presión supone el más alto de la instalación. La diferencia de presiones que se analiza en la etapa de captación es el motivo principal de ello. No obstante, gracias a la incorporación de los intercambiadores de presión, el gasto energético de la planta ha disminuido bastante, como se puede comparar con los otros recuperadores de energía propuestos. En cuanto al consumo que presenta la planta de 2,628 kWh/m³, no resulta un valor excesivamente alto sino que se encuentra dentro del rango aceptable para una planta de desalación. Asimismo, la instalación consumirá 225,82 kW en su producción, por lo que se considerará como valor de referencia para el dimensionamiento del recurso energético que la abastecerá.

8.9. Dimensionado del sistema undimotriz

El sistema undimotriz debe suministrar el consumo energético de la planta de desalación. Para ello se realizará un estudio del recurso undimotriz en la zona escogida y se comprobará si es apta para las costas de Canarias. Los procesos realizados se basarán en la bibliografía descrita y los conocimientos que se asemejen del ámbito académico. Tras su estudio se deberá seleccionar un modelo apto para dichas condiciones, teniendo en cuenta que la tecnología se encuentra actualmente en desarrollo y no dispone de dispositivos que puedan competir comercialmente con otras energías renovables.

8.9.1. Estudio del recurso undimotriz

El estudio del recurso undimotriz debe comenzar con la ubicación seleccionada de la planta y las zonas próximas a ella que puedan obtener un oleaje que favorezca la potencia consumida establecida. Cabe destacar que se han comprobado, en apartados anteriores del proyecto, las zonas medioambientales próximas para evitar cualquier impacto.

El análisis de los parámetros característicos del oleaje se ha realizado mediante las herramientas que proporciona el Ministerio de Fomento del Gobierno de España, mediante Puertos del Estado. Por medio de ellas se pueden obtener parámetros oceanográficos como el oleaje, corrientes, temperatura del agua y salinidad; y meteorológicos: viento, temperatura del aire y presión atmosférica. El punto geográfico seleccionado pertenece al conjunto de datos SIMAR, que son una serie de predicciones y simulaciones que se han realizado con una eficiencia bastante alta. En la Figura 33 aparece la ubicación designada más próxima a la planta de desalación, es el punto SIMAR 4020014.

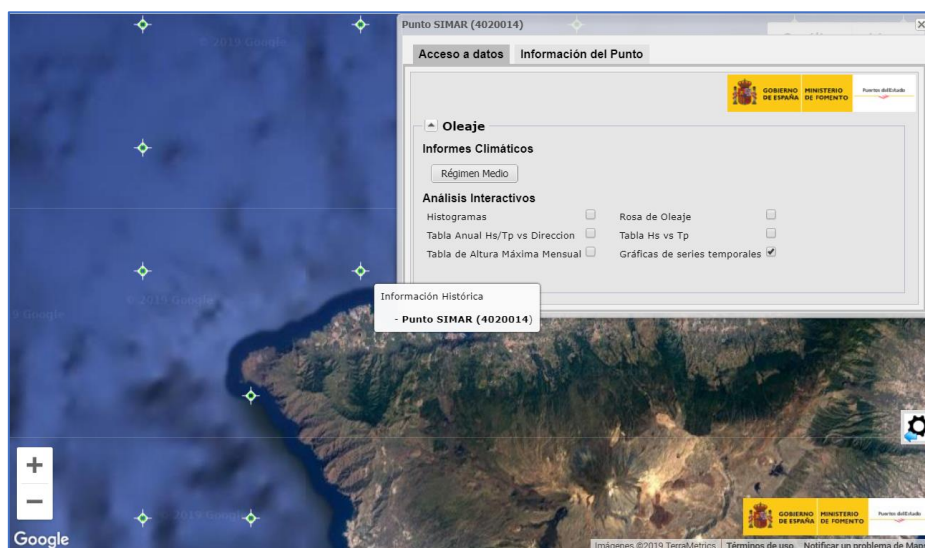


Figura 33. Punto SIMAR 4020014 (Fuente: Puertos del Estado)

El parámetro más característico del oleaje para la generación de potencia es la altura significativa de la ola. Para designarlo, antes habría que definir la dirección predominante de este recurso. Basándose en el estudio de los vientos del Atlántico, en la isla de Tenerife el oleaje es más alborotado en las zonas del norte y noroeste. Mediante los cálculos realizados y los gráficos aportados se pudo comprobar que las hipótesis tomadas eran correctas y la zona elegida era óptima. Una de estas gráficas empleadas es la rosa del oleaje, muy similar a la empleada en eólica que permite dividir en sectores la orientación medida del oleaje. Todos estos estudios se encuentran ampliados en el anexo 3 del proyecto.

Las olas presentan unas constantes más estables que muchas energías renovables empleadas actualmente, por lo que las medidas tomadas permiten dimensionar un sistema mucho más fiable. No obstante, la energía undimotriz, como otras renovables, siguen presentando un factor de variabilidad, que depende principalmente de las condiciones meteorológicas que se presenten.

Por otro lado, el periodo también es un parámetro muy importante en el dimensionado ya que representa el tiempo que tarda la ola en volver a pasar por el mismo punto. De esta manera, la mayoría de dispositivos se favorecen del movimiento alternativo que proporciona la ola, y una forma de controlar esto es determinando su periodo.

Tanto la altura significativa de la ola como el periodo se han establecido por medio de las gráficas, que aparecen en la Figura 34 y 35, una media de resultados entre los años 2015 y 2019. Se ha establecido un rango de tiempo similar a los que han determinado el diseño del proyecto en anteriores apartados. Asimismo, el valor de altura significativa de la ola designado es 1,70 metros y el periodo de 6,1 segundos. Estos datos son fundamentales para la selección del dispositivo undimotriz que abastecerá la planta de desalación.

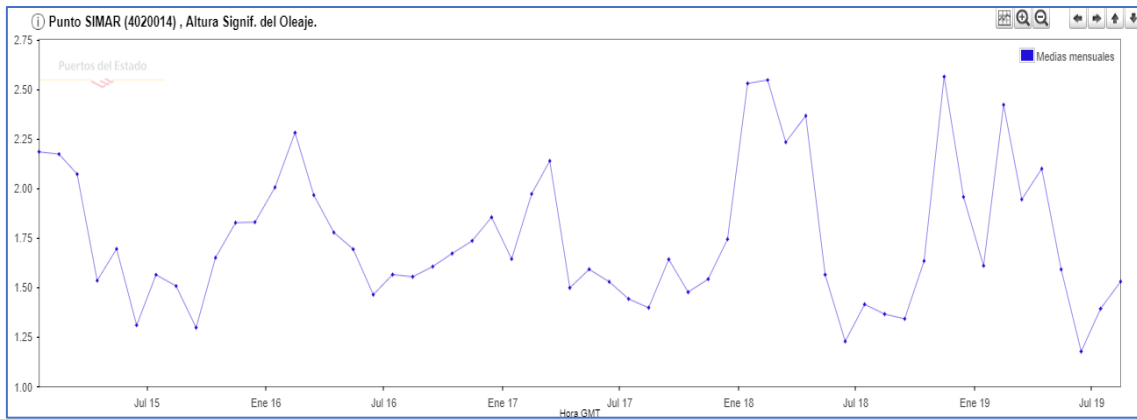


Figura 34. Gráfica de altura significativa del oleaje entre 2015 y 2019 (Fuente: Puertos del Estado)

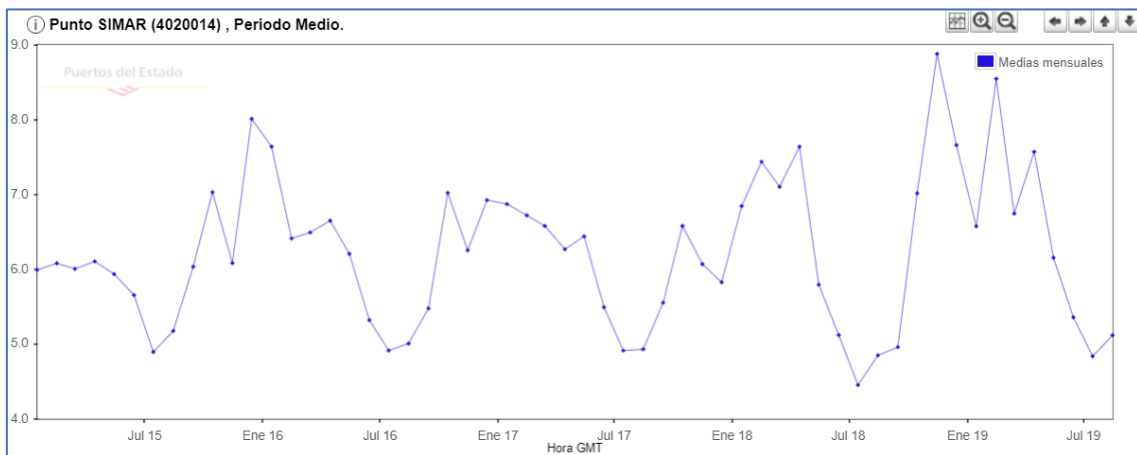


Figura 35. Gráfica de periodo medio entre 2015 y 2019 (Fuente: Puertos del Estado)

8.9.2. Selección del sistema undimotriz

La selección de un dispositivo que obtenga energía undimotriz no es una tarea fácil, ya que una vez calculados los parámetros característicos se debe determinar un sistema que sea capaz de aprovecharlo. La mayoría de artefactos se encuentran actualmente en desarrollo por lo que son prototipos y su estudio no permitiría hacer ejecutable el proyecto. La empresa seleccionada sería Rotary Wave S.L. que se caracteriza por ofrecer soluciones innovadoras para el desarrollo sostenible en el sector de la generación de energía renovable. El proyecto que abastecerá la planta de desalación es el dispositivo Butterfly, que permite captar la energía de las olas mediante un conjunto de flotadores, como aparece en la Figura 36.

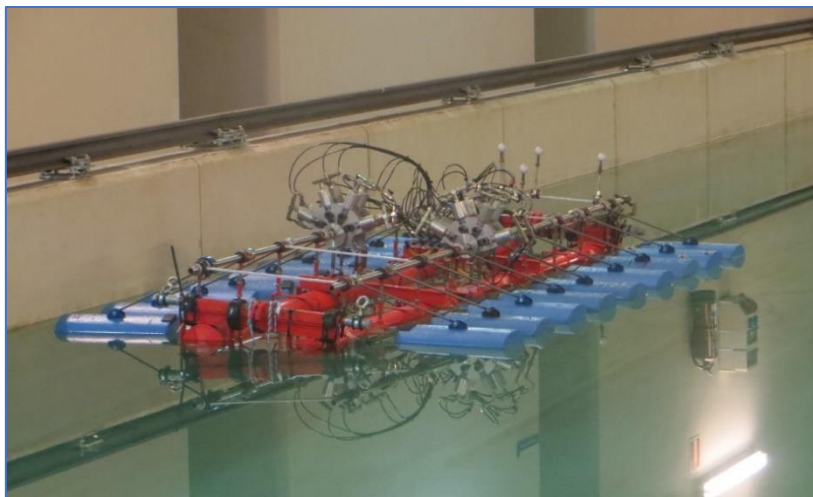


Figura 36. Dispositivo Butterfly a escala 1.14

El dispositivo está distribuido de forma modular, lo que permite mayor facilidad tanto en el mantenimiento como en las modificaciones que se puedan realizar. El sistema se compone de dos partes fundamentales que engloban el dispositivo: el convertidor de olas o *Wave Energy Converter* (WEC), que serían los flotadores y la estructura en sí que se encargan de captar la energía de las olas; y el *Power Take Off* (PTO), que serían tanto las bombas que tiene acopladas como el sistema que convierte su energía en electricidad.

El Butterfly está diseñado como una máquina hidráulica, es decir, no tendría aceite en su circuito y las bombas generarían agua a presión. Esto permite evitar inconvenientes de impactos medioambientales relacionados con el transporte de energía mediante cableado en el mar. Cabe destacar que el sistema de obtención de energía eléctrica no está incluido en este proyecto, ya que el estudio del dispositivo se encuentra aún en pruebas de desarrollo. No obstante, los resultados obtenidos son muy próximos a la realidad, los cuales han sido tomados directamente de la empresa para poder analizar la viabilidad en una planta de desalación; más concretamente se realizaron en Ferrol en el año 2018.

En el anexo 3, se pueden observar las diferentes potencias que se obtendrían en el dispositivo, ya que presentaría dos variantes; una con el dispositivo fijo o anclado y otra en flotante. Para el abastecimiento del proyecto se ha establecido el dispositivo en fijo, ya que los valores de potencia obtenida son mucho mayores, como se observan en la Tabla 16, que sería un extracto de las pruebas realizadas.

Tabla 16. Potencia en fijo del dispositivo Butterfly

FIJO POTENCIA EXTRAPOLACIÓN REGIMEN OLEAJE (3 módulos)								
H Ola	POT 1:14 W	POT 1:1 KW	H Ola	POT 1:14 W	POT 1:1 KW	H Ola	POT 1:14 W	POT 1:1 KW
1.5	5.6530	58.0404	3.5	11.7706	120.8505	5.5	21.2786	218.4701
1.6	5.8784	60.3542	3.6	12.1655	124.9047	5.6	21.8430	224.2649
1.7	6.1122	62.7550	3.7	12.5688	129.0460	5.7	22.4159	230.1466
1.8	6.3545	65.2428	3.8	12.9807	133.2743	5.8	22.9972	236.1154
1.9	6.6053	67.8177	3.9	13.4010	137.5896	5.9	23.5870	242.1712

(Fuente: Rotary Wave)

Según los parámetros característicos del oleaje y el estudio del dispositivo undimotriz, la potencia que se obtendría sería de 62,76 kW. En principio, el equipo en sí no sería capaz de abastecer los 225,82 kW que consumiría la planta de desalación. No obstante, como se mencionó, la estructura del sistema es modular por lo que se puede aumentar hasta cubrir la demanda. La solución más rápida sería establecer un número total de cuatro dispositivos que equivaldrían a 251,04 kW, por lo cual serían cuatro equipos de 36 metros de largo y 6 metros de ancho. La colocación de estas estructuras en el mar sería muy complicada, ya que son necesarios una gran cantidad de permisos para la puesta en marcha de un único dispositivo. El impacto ambiental que puede significar puede ser muy perjudicial para la zona. El método más efectivo para la distribución de este sistema sería un único dispositivo de hasta 144 metros de largo, compuesto por los cuatro módulos undimotrices, o incluso dos dispositivos situados en paralelo de 72 metros cada uno. En relación a la distribución, la estructura más efectiva sería de 33 pares de flotadores. No obstante, el análisis se realizará con las medidas proporcionadas por el fabricante. La consideración que se ha tomado para el diseño ha sido tanto la estructura modular que presenta como la obtención de potencia según la cantidad de flotadores colocados. Asimismo, una mayor cantidad de flotadores en el dispositivo supondrán una potencia obtenida también mucho más grande. Hay que tener en cuenta que el estudio de los costes no está incluido en el proyecto, por lo que no se puede comparar el método más óptimo para obtener la energía. Sin embargo, la inversión que se tendría que realizar

aumentaría con la cantidad de dispositivos, por lo que no tendría una viabilidad económica inicial como tal. De esta manera, la planta de desalación debería contar con un sistema que permita almacenar la energía en exceso que se generaría con el sistema undimotriz.

Por otro lado, el sistema undimotriz presenta otras posibilidades que serían más beneficiosas en una planta de desalación. La más simple sería reducir el número de dispositivos, lo cual reduciría los costes iniciales de la instalación, aunque no abastecería el consumo total de la planta. En este caso, sería importante la implantación de un sistema de respaldo energético, tanto en esta solución como en la anterior. La energía undimotriz depende directamente de los parámetros meteorológicos de la zona, como cualquier otra energía renovable, por lo que el uso de estos elementos para el abastecimiento de una producción industrial continua es imprescindible. Otra solución más innovadora sería la aplicación del dispositivo directamente como una etapa en el proceso de desalación, ya que el método de captación de energía sería mediante agua a presión. De esta forma, la bomba de alta presión, que sería la que mayor consumo energético de la planta, tendría una potencia mucho menor al disminuir la diferencia de presiones entre los puntos de estudio.

En definitiva, el dispositivo se establecería según la primera opción propuesta, ya que uno de los requisitos de este proyecto es el abastecimiento energético total de la planta de desalación. El sistema generaría una potencia superior a la consumida de 251,04 kW, por lo que se dispondría de un método de aprovechamiento para el exceso.

9. Resultados finales

En este apartado se mostrarán las soluciones que se han tomado en cada uno de los sistemas de la planta de desalación por ósmosis inversa y abastecimiento con energía undimotriz.

9.1. Esquema de la planta de desalación

En el siguiente esquema general se detallan cada uno de los equipos utilizados en las diferentes etapas del proyecto.

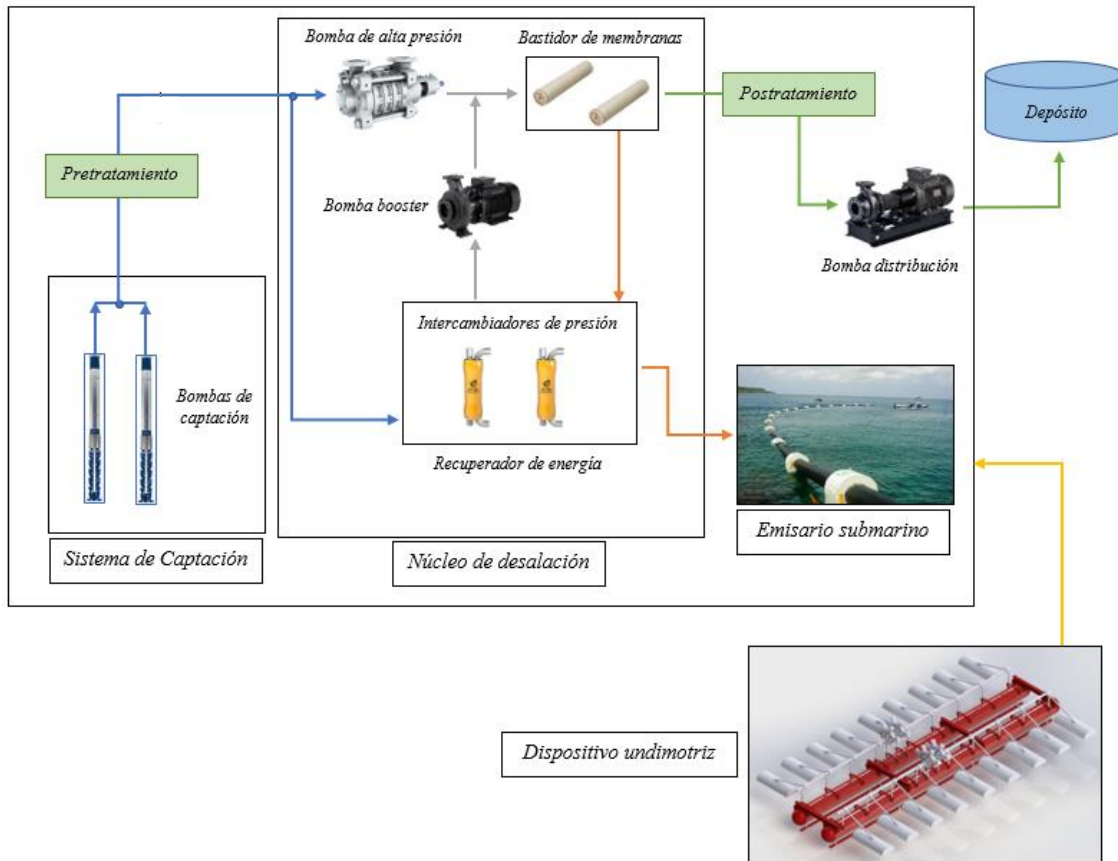


Figura 37. Esquema general de los sistemas de la planta de desalación (Fuente: Elaboración propia)

9.2. Capacidad de la planta desaladora

La planta de desalación contará con una capacidad de 2000 m³/día para regadío de cultivo de plataneras. La producción de agua se realizará de forma continua durante todo el año, menos en el mes de febrero cuando las necesidades hídricas son nulas. Durante ese tiempo las instalaciones contarán con un periodo de mantenimiento de sus sistemas

9.3. Ubicación

La instalación del proyecto se ubicará en el municipio de Buenavista del Norte, en la isla de Tenerife. Esta zona presenta características favorables, tanto para la fuente energética que abastecería la planta como para la propia planta de desalación. La parcela escogida para el proyecto sería de ocupación agrícola. No obstante, la instalación

favorecería el recurso hídrico de uno de los cultivos más abundantes de la zona, la platanera. Por lo tanto, la planta de desalación supondría un desarrollo favorable para la ubicación escogida en el ámbito industrial y agrícola.

9.4. Sistemas de captación y alimentación

El sistema de captación que abastecerá la planta de desalación será mediante tres tomas cerradas o pozos, de los cuales dos de ellos estarían operativos durante la producción. Su sistema de tuberías presenta una profundidad de 30 metros y otros 18 metros a nivel del suelo hasta el punto colector, siendo un total de 48 metros de longitud. El diámetro del tramo de captación sería de 200 milímetros. En cada uno de los pozos se colocará una bomba de captación del modelo UPA 200B-80 del fabricante KSB. Tendrían un consumo de 11,5 kW y un rendimiento del 77,28%. Destacar que el material seleccionado para las tuberías es el poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV).

Por otro lado, desde el punto colector hasta la planta de desalación comprendería el tramo de alimentación, donde el caudal de agua sería el doble por lo que sus parámetros serían diferentes. La longitud total sería de 40 metros y su diámetro de 300 milímetros.

9.5. Pretratamiento

La composición del agua de captación no sería favorable para el bastidor de membranas y podría dañar los sistemas de la planta, por lo que se ha optado por realizar un pretratamiento del agua de captación, tanto físico como químico.

9.5.1 Pretratamiento físico

El pretratamiento físico que se ha seleccionado para la planta de desalación sería únicamente de filtros de cartucho, ya que los filtros de arena no se permitían colocar en el software de dimensionamiento. De esta manera, se han dispuesto catorce filtros de cartucho HFZ05 de la empresa Suez, que es la misma que las membranas, ofreciendo un nivel de filtración óptimo de 5 micras.

9.5.2. Pretratamiento químico

El pretratamiento químico requerido en el agua de captación ha sido de regulación de pH, disminuyendo su valor hasta el permisible por el bastidor de membranas. Se ha aplicado el ácido clorhídrico para realizar este proceso, evitando así las precipitaciones en las membranas.

9.6. Núcleo de desalación

Los sistemas que componen el núcleo de desalación se han seleccionado según un estudio previo, en el que se ha priorizado el menor consumo específico y el mejor rendimiento que ofrece a la planta. Las tuberías en este sistema compartirían similitud en el material utilizado, es decir, el poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV).

El bastidor de membranas estará compuesto por 7 membranas por cada uno de los 19 tubos de presión que se encontrarían en total. El fabricante seleccionado será Suez, y la etapa será simple, con una conversión del 45%.

La bomba de alta presión que suministraría el flujo de agua a la entrada del bastidor será la bomba del modelo MSN50-215 del fabricante Sulzer. Presentaría un consumo de 189 kW y un rendimiento del 74,62%, siendo el consumo energético más alto de todos los equipos de la planta de desalación.

El recuperador de energía establecido es el intercambiador de presión del fabricante Energy Recovery Inc., habiéndose optado por dos unidades del modelo PX-Q300. Asimismo, disminuirán el consumo energético de la planta considerablemente.

Por último, la bomba booster encargada de elevar la presión del flujo a la salida de los intercambiadores de presión hasta la línea de alimentación es el modelo NB 65-125/137 del fabricante Grundfos. El consumo que tendría sería de 6,97 kW y su rendimiento del 83,7%.

9.7. Sistema de distribución

El sistema de distribución del agua de producción de la planta se ha diseñado de manera que el flujo de agua se dirija hacia un depósito abierto de unos 74000 m³ con el cual se disponga del abastecimiento de riego para los cultivos de plataneras. La estructura estaría situada en la misma parcela que la instalación, pudiendo suministrar agua dependiendo de las necesidades hídricas que presente a lo largo del año.

La bomba de distribución seleccionada para realizar su transporte hasta el depósito sería el modelo NK 65-125/137 del fabricante Grundfos. El consumo que presenta es de 6,87 kW y su rendimiento es de 82,7%. Destacar que el tramo de tuberías sería del material de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV).

9.8. Sistema de rechazo

El sistema de rechazo de la planta se realizaría por medio de un emisario submarino para el vertido del flujo de rechazo o salmuera al mar. La longitud de las tuberías sería de 760 metros, que con una diferencia de cota entre la profundidad marina y la planta de 37 metros, no sería necesario el uso de una bomba para realizar este proceso. El diámetro de tubería que comprendería sería de 250 milímetros, con el mismo material de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV).

9.9. Sistema undimotriz

El sistema undimotriz que abastecerá la planta de desalación será el dispositivo *Butterfly* de la empresa Rotary Wave S.L. Para el suministro energético completo de los equipos de desalación será necesaria la colocación de cuatro dispositivos que generarían una potencia en las costas seleccionadas de 251,04 kW de los 225,82 kW requeridos. No obstante, el estudio del dispositivo recomendaría una menor cantidad de unidades con un sistema energético de respaldo, que pueda favorecer la viabilidad del equipo.

10. Conclusiones

El presente proyecto trata sobre el estudio de una planta de desalación alimentada por energía undimotriz para regadío en la zona de la Isla Baja, en el norte de Tenerife. Los conocimientos requeridos para la realización del proyecto han sido los adquiridos durante el Grado de Ingeniería Mecánica y, además, se han obtenido nuevas competencias de tecnologías industriales no desarrolladas a lo largo de los estudios. Entre las asignaturas aplicadas en el proyecto destacar “Ingeniería Fluidomecánica”, “Instalaciones y Máquinas Hidráulicas”, “Oficina Técnica y Proyectos”, entre otras. Cabe señalar que el proyecto no es ejecutable, debido al corto alcance que tiene no se ha podido realizar un estudio más completo de la instalación. No obstante, el análisis de soluciones que se ha realizado considera tanto aspectos técnicos como requisitos que se han impuesto como condiciones iniciales del proyecto.

En cuanto al ámbito tecnológico, los conceptos tanto de desalación como la energía undimotriz no se han desarrollado durante el ámbito académico, por lo que ha sido necesario ampliar los conocimientos sobre dichos campos más especializados. El proceso de desalación presenta diferentes variables que se deben tener en cuenta para una óptima producción de agua. Además, el proceso de desalación por ósmosis inversa es una de las tecnologías más eficientes e innovadoras que existen para la extracción de recursos hídricos. El producto en sí de agua potable es uno de los más demandados no sólo en Canarias si no a nivel mundial. Por lo que el desarrollo del proyecto también permite comprender la importancia no sólo de la obtención de agua si no abastecer el consumo energético de la planta desaladora con energías renovables. En el archipiélago cada vez es más necesario la implantación de este tipo de tecnologías, ya que el abastecimiento mediante aguas superficiales cada vez es menor y se deben establecer nuevas posibilidades para la demanda originada.

Por otro lado, es destacable el uso de energías renovables para alimentar energéticamente la planta de desalación, ya que supone un recurso ilimitado y con efectos en el medioambiente casi nulos. En el caso de este proyecto se ha querido desarrollar con energía undimotriz para aumentar las posibilidades de energías renovables comerciales que pueden ser utilizadas en las industrias. Asimismo, poder mostrar que en Canarias el uso de este tipo de energía puede ser muy beneficiosa en determinados puntos de las islas,

y así aumentar el desarrollo tecnológico e industrial del archipiélago. De esta manera, las plantas desaladoras que presentan un consumo energético bastante elevado tienen una opción de reducir su consumo mediante el abastecimiento de energías renovables.

En conclusión, el proyecto ha permitido aplicar tanto los conocimientos adquiridos en la universidad como nuevos aplicados tanto del proceso de desalación como de las energías renovables. El desarrollo de la planta permite mostrar la viabilidad de la implantación de tecnologías avanzadas en la obtención de recursos hídricos, como la ósmosis inversa, y el estudio de nuevas técnicas de abastecimiento por medio de la energía undimotriz. A su vez, se muestra uno de los tipos de energías renovables que más avances ha tenido actualmente y que se deberá tener en cuenta de una forma comercial para el futuro, que puede ser determinante para la resolución de situaciones perjudiciales para el medioambiente.

10.1. Conclusions

This project is about the study of a desalination plant powered by wave energy for irrigation in the north of Tenerife. The knowledge required for the realization of the project has been given during the Mechanical Engineering Degree. In addition, there are new competences of industrial technologies not developed throughout the studies as desalination. The subjects applied in the project has been “Ingeniería Fluidomecánica”, “Instalaciones y Máquinas Hidráulicas” and “Oficina Técnica y Proyectos”. The project is not executable, because it has not been possible to carry out a more complete study of the installation. However, the analysis of solutions has been carried out considering technical aspects and requirements for initial project conditions.

In the field of technology, the concepts of desalination and wave energy have not been developed during academic's studies. So, it has been necessary to expand knowledge about these more specialized fields. Desalination process presents different variables that must be taken into account for optimal water production. In addition, the reverse osmosis desalination process is one of the most efficient and innovative technologies that exist for the extraction of water resources. Production of drinking water is one of the most demanded not only in the Canary Islands but worldwide. Then the development of the

project allows us to understand the importance of obtaining water and supplying the energy consumption of the desalination plant with renewable energy. In the islands, the implementation of this type of technologies is increasingly necessary, since the supply by surface water is becoming smaller and new possibilities for the originated demand must be established.

Furthermore, the use of renewable energy to power the desalination plant is remarkable. It is an unlimited resource with almost any environmental effects. For this project, it has been preferred to use the wave energy to increase the possibilities of commercial renewable energies that can be used in the industries. Also, in the Canary Islands the use of this energy can be beneficial in some areas of the islands. And thus, increasing the technological and industrial development of the archipelago. In this way, desalination plants have a high energy consumption, so a solution is to reduce their consumption by supplying renewable energy.

In conclusion, the project has allowed to apply the knowledge acquired in the university and new ones about desalination process and renewable energy. Development of the plant allows to show the viability of advanced technologies obtaining water resources, such as reverse osmosis, and the study of new supply techniques as wave energy. Actually, it's one of the renewable energies that has made more advances, and should be taken into account in a commercial way in the future, which can be decisive for the resolution of situations that are harmful to the environment.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO I

**DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE DESALACIÓN
POR ÓSMOSIS INVERSA**

Autor: Sergio Castro González

Tutor: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Dimensionado del sistema de desalación.....	1
2.1. Software de dimensionado	1
3. Temperatura del agua de alimentación.....	2
4. Composición del agua de alimentación	4
5. Capacidad de producción de la planta	6
6. Dimensionado del núcleo de membranas	11
6.1. Pretratamiento.....	13
6.1.1. Pretratamiento físico.....	13
6.1.2. Pretratamiento químico	15
6.2. Selección de membranas	16
7. Dimensionado del recuperador de energía.....	24
7.1. Turbina Pelton.....	24
7.2. Turbo-charger	25
7.3. Intercambiadores de presión.....	26
7.4. Análisis de resultados.....	27
7.5. Dimensionado del intercambiador de presión.....	28

Índice de figuras

Figura 1. Empresa SUEZ (Fuente: Suez)	2
Figura 2. Software de dimensionado Winflows (Fuente: Suez)	2
Figura 3. Temperaturas máximas, mínimas y medias de 2010 hasta 2018 (Fuente: Puertos del Estado)	3
Figura 4. Salinidad de los océanos (Fuente: www.nasa.gov/mission_pages/aquarius)	6
Figura 5. Necesidades Hídricas de Buenavista del Norte (Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación)	7
Figura 6. Parámetros de Necesidades Hídricas del cultivo de Plataneras (Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación)	7
Figura 7. Datos meteorológicos diarios de la evaporación de referencia en Buenavista del Norte (Fuente: Dirección General de Agricultura y Desarrollo Rural, de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias)	9
Figura 8. Guía de diseño de Winflows (Fuente: Winflows)	12
Figura 9. Datos del agua de alimentación en Winflows (Fuente: Winflows)	13
Figura 10. Datos del flujo en Winflows (Fuente: Winflows)	14
Figura 11. Filtros de cartucho High Flow Z (Fuente: Suez)	14
Figura 12. Selección filtros de cartucho en Winflows.....	15
Figura 13. Pretratamiento químico en Winflows	16
Figura 14. Membranas para ósmosis inversa de la marca Suez (Fuente: Suez)	16
Figura 15. Membranas de la marca Suez (Fuente: Suez)	17
Figura 16. Serie AE de Suez	17
Figura 17. Serie AD de Suez.....	17
Figura 18. Parámetros específicos serie AE (Fuente: Suez)	18
Figura 19. Parámetros de operación serie AE (Fuente: Suez)	19

Figura 20. Dimensiones serie AE (Fuente: Suez)	19
Figura 21. Análisis de la instalación de desalación.....	21
Figura 22. Análisis del bastidor de membranas	22
Figura 23. Resultados obtenidos de Winflows	23
Figura 24. Turbina Pelton.....	24
Figura 25. Análisis con turbina Pelton en Winflows.....	25
Figura 26. Turbo-charger (Fuente: Energy Recovery)	25
Figura 27. Análisis con turbo-charger en Winflows.....	26
Figura 28. Intercambiador de presión (Fuente: Energy Recovery)	26
Figura 29. Análisis con intercambiador de presión en Winflows	27
Figura 30. Danfoss.....	29
Figura 31. Energy Recovery Inc.	29
Figura 32. Herramienta de cálculo de Danfoss.	30
Figura 33. Herramienta de cálculo de Energy Recovery Inc.	31

Índice de tablas

Tabla 1. Temperaturas máximas de la boya de Santa Cruz de Tenerife	3
Tabla 2. Temperaturas mínimas de la boya de Santa Cruz de Tenerife	4
Tabla 3. Temperaturas medias	4
Tabla 4. Composición química del agua de alimentación.....	5
Tabla 5. Necesidades Hidráulicas.....	10
Tabla 6. Agua del depósito	11
Tabla 7. Resultados de los cálculos del número de membranas y del número de tubos de presión	20
Tabla 8. Consumos específicos según modelo de membrana	21
Tabla 9. Consumos específicos de los recuperadores de energía.....	27

1. Introducción

En este anexo se explicará la obtención del sistema de desalación por ósmosis inversa, en concreto del bastidor de membranas, parte fundamental en el estudio de este proyecto, ya que de éste dependen varios parámetros a tener en cuenta en el dimensionado de la planta. El principal es el consumo específico, dado que interesa tener el menor posible, además de ofrecer un caudal de permeado que satisfaga las demandas del cultivo.

La elección del mismo depende en un primer momento de la calidad del agua de alimentación, dado que los parámetros de entrada a la membrana son fundamentales y si no se asemejan se deberán realizar unos pretratamientos tanto físicos como químicos. Asimismo, el producto de las membranas debe tener unos parámetros óptimos para el riego para percatarse de concentraciones como la del boro que son perjudiciales.

Por tanto, en este anexo se realizará el dimensionado del bastidor de membranas, el recuperador de energía y su consumo específico. Para ello se efectuarán una serie de combinaciones posibles que puedan ser viables en nuestro estudio.

2. Dimensionado del sistema de desalación

La parte fundamental del sistema de desalación es el bastidor de membranas, el cual se debe seleccionar entre los posibles distribuidores que puedan proveer a este diseño de la planta de desalación. Los cálculos se realizarán en un principio con los valores estándar que ofrecen los softwares de dimensionado.

2.1. Software de dimensionado

El software utilizado en este proyecto es el que ofrece la empresa SUEZ, la cual fue seleccionada como proveedora de las membranas que se utilizarán. La compañía está especializada, fundamentalmente, en los sectores de tratamiento de aguas y la gestión de residuos.



Figura 1. Empresa SUEZ (Fuente: Suez)

Asimismo, facilita un programa de dimensionado Winflows con el cual se probarán varias configuraciones que dependen del número de tubos de presión y de membranas. Este software permite diseñar y simular el sistema de desalación por ósmosis inversa a partir de los datos característicos de entrada de la instalación, como la composición del agua de alimentación.



Figura 2. Software de dimensionado Winflows (Fuente: Suez)

3. Temperatura del agua de alimentación

La temperatura del agua de abastecimiento es uno de los parámetros fundamentales a tener en cuenta a la hora de seleccionar las membranas que se usarán para el método de ósmosis inversa.

Los siguientes datos se han obtenido de la página web de Puertos del Estado en los que se muestran las temperaturas recogidas por boyas. En el caso de este proyecto, se ha elegido la boya de Santa Cruz de Tenerife, ya que es la más próxima a la ubicación de la planta de desalinización en Buenavista del Norte. No obstante, se ha descartado la utilización de los datos SIMAR ya que no es una posibilidad válida en la herramienta de estudio.

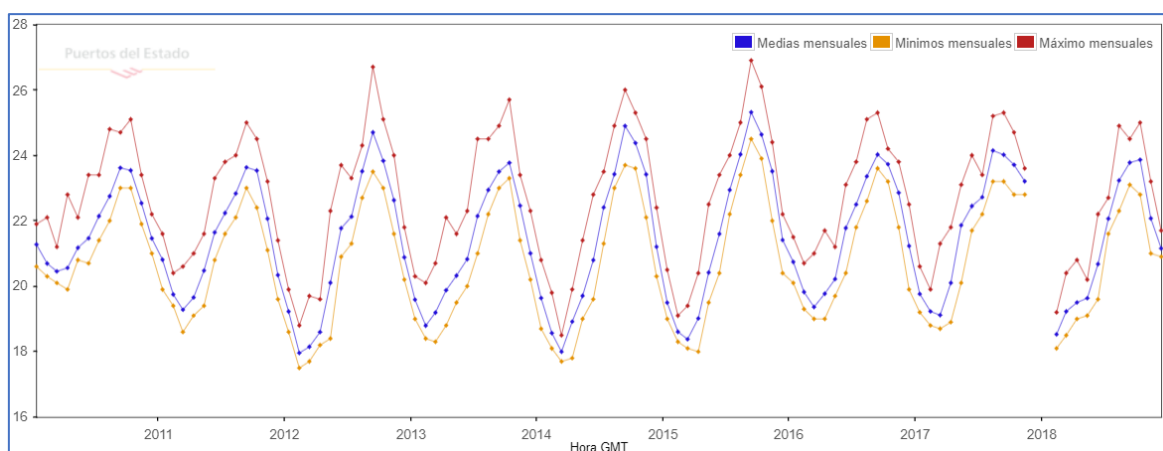


Figura 3. Temperaturas máximas, mínimas y medias de 2010 hasta 2018 (Fuente: Puertos del Estado)

Como se observa en la Figura 3, la temperatura varía considerablemente a lo largo de los meses de cada año, por lo se ha decidido el uso de pozos de captación para el agua de alimentación de la planta. Esto permite una temperatura más estable, evitando a su vez el problema de variabilidad de la temperatura del agua.

Tabla 1. Temperaturas máximas de la boya de Santa Cruz de Tenerife

<i>Ts: Temperatura Superficial Media del Agua / Mean Surface Temperature of Water °C</i>		
<i>Boya de Santa Cruz de Tenerife 2009-2019</i>		
<i>Mes / Month</i>	<i>Ts Máx / Max Ts</i>	<i>Año / Year</i>
<i>Enero / January</i>	21.9	2010
<i>Febrero / February</i>	22.1	2010
<i>Marzo / March</i>	21.3	2017
<i>Abril / April</i>	22.8	2010
<i>Mayo / May</i>	23.1	2017
<i>Junio / June</i>	24.1	2009
<i>Julio / July</i>	24.9	2009
<i>Agosto / August</i>	25.2	2017
<i>Septiembre / September</i>	26.9	2015
<i>Octubre / October</i>	26.1	2009
<i>Noviembre / November</i>	24.6	2009
<i>Diciembre / December</i>	23.0	2009

(Fuente: Elaboración propia con los datos de Puertos del Estado)

Tabla 2. Temperaturas mínimas de la boya de Santa Cruz de Tenerife

<i>Ts: Temperatura Superficial Media del Agua / Mean Surface Temperature of Water °C</i>		
<i>Boya de Santa Cruz de Tenerife 2009-2019</i>		
<i>Mes / Month</i>	<i>Ts Mín / Min Ts</i>	<i>Año / Year</i>
<i>Enero / January</i>	18.6	2012
<i>Febrero / February</i>	17.5	2012
<i>Marzo / March</i>	17.7	2014
<i>Abril / April</i>	17.4	2019
<i>Mayo / May</i>	18.4	2012
<i>Junio / June</i>	19.6	2014
<i>Julio / July</i>	21.0	2013
<i>Agosto / August</i>	22.0	2010
<i>Septiembre / September</i>	23.0	2011
<i>Octubre / October</i>	22.4	2011
<i>Noviembre / November</i>	21.0	2018
<i>Diciembre / Decembre</i>	19.6	2011

(Fuente: Elaboración propia con los datos de Puertos del Estado)

Tabla 3. Temperaturas medias

Temperatura máxima media (°C)	23,7
Temperatura mínima media (°C)	19,8
Temperatura supuesta de agua de alimentación (°C)	22

(Fuente: Elaboración propia)

Una vez realizada la media de temperaturas, que se muestran en la Tabla 3, se tomará como valor aproximado los 20°C. Este parámetro disminuye con respecto a la primera suposición debido a que se captaría el agua por medio de pozos.

4. Composición del agua de alimentación

Es fundamental el estudio del agua de alimentación de la instalación desaladora, por lo que requiere un análisis de su composición. Se ha obtenido de la desaladora ubicada en Santa Cruz de Tenerife, puesto que no se dispone de un estudio más próximo al emplazamiento de la instalación. Además, son imprescindibles estos datos ya que varios parámetros dependen de estos para la correcta elección de membranas, como puede ser la presión de entrada, los tiempos de mantenimiento, el pretratamiento, entre otros.

Tabla 4. Composición química del agua de alimentación

Composición del agua de alimentación

<i>Iones</i>	<i>mg/L</i>
Calcio	431
Magnesio	1470
Potasio	451
Sílice	1.1
Sodio	11870
Bromo	0.5
Bicarbonatos	141.5
Cloruros	21280
Fluoruros	0.862
Nitratos	0.7
Sulfatos	3148
Bario	0.017
Boro	5.23
Cobalto	0.002
Cobre	0.002
Cromo total	0.006
Estroncio	10
Hierro total	0.025
Manganeso	0.003

(Fuente: Elaboración propia con los datos de la Desaladora de Santa Cruz de Tenerife)

Por otro lado, debemos definir otros parámetros físico-químicos como es el pH del agua de mar, que según el dato aportado por el Gobierno de Canarias es de 8,104. Asimismo, para los cálculos que se realizarán sobre las membranas se utilizará un pH igual a 8 del agua de alimentación.

Otro de los parámetros característicos es la salinidad la cual, según la siguiente imagen obtenida del instrumento *Aquarius*, podemos observar las cantidades de sal en gramos por litros de agua según la ubicación en el mapa. Canarias presenta un valor de 36 g/L.

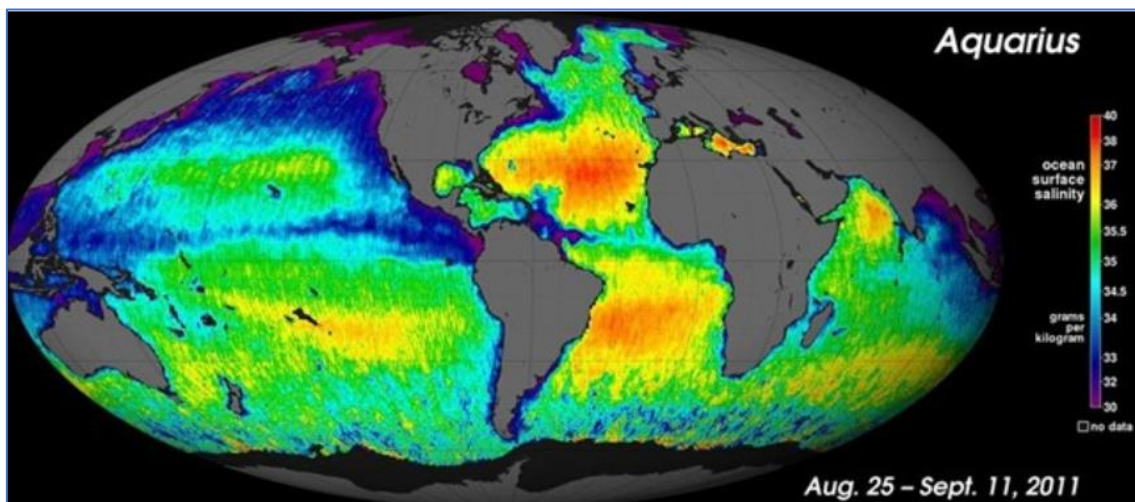


Figura 4. Salinidad de los océanos (Fuente: www.nasa.gov/mission_pages/aquarius)

Por último, otros factores que hay que tener en cuenta y que han sido extraídos de la misma fuente son: la conductividad a 25°C que es establece en 54767 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los sólidos en suspensión que serían 4 mg/L.

5. Capacidad de producción de la planta

El dimensionado de la planta depende fundamentalmente de la cantidad de agua que necesita producir para el riego de la zona elegida. Para el cálculo de la necesidad de agua de regadío se han utilizado las siguientes fuentes de información: *agrocabildo.org* y los datos ofrecidos por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Asimismo, en la Figura 17 y 18 se pueden observar las necesidades hídricas de Buenavista del Norte.

Mes	Nº Días	Temp Media (°C)	Temp Max (°C)	Temp Min (°C)	Hum Media (%)	Hum Max (%)	Hum Min (%)	Precip (mm)	P. Efect (mm)	Eto (mm)
1	31	16,95	22,32	11,64	66,63	91,40	39,16	40,53	14,54	73,56
2	28	16,27	21,94	11,98	67,92	94,00	33,22	93,41	44,10	74,98
3	31	18,15	26,74	13,52	70,68	94,10	35,21	17,74	8,85	104,32
4	30	17,97	23,07	13,32	69,61	92,00	35,42	14,04	0,82	110,08
5	31	18,63	24,20	14,72	67,58	90,40	40,10	5,85	0,78	125,07
6	30	20,38	26,00	16,45	71,94	95,40	50,14	8,39	1,73	134,26
7	31	21,75	25,54	18,27	72,88	90,20	54,03	0,00	0,00	148,91
8	31	22,72	27,07	19,60	75,15	94,90	50,94	3,51	0,00	127,44
9	30	23,04	28,14	19,94	74,94	95,00	50,81	0,59	0,00	118,40
10	31	21,70	28,49	16,33	73,35	95,50	46,59	0,98	0,00	90,83
11	30	19,14	23,68	12,98	71,44	93,60	48,20	16,77	8,62	69,93
12	31	18,61	27,68	13,18	62,49	94,00	14,53	0,39	0,00	73,43

Figura 5. Necesidades Hídricas de Buenavista del Norte (Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación)

Fecha	Kc	ETo(mm)	Etc(mm)	Pe(mm)	ETc-Pe(mm)
ene/2018	0,5	73,6	36,8	14,5	22,2
feb/2018	0,5	75,0	37,5	44,1	0,0
mar/2018	0,6	104,3	62,6	8,9	53,7
abr/2018	0,6	110,1	66,1	0,8	65,2
may/2018	0,6	125,1	75,0	0,8	74,3
jun/2018	0,6	134,3	80,6	1,7	78,8
jul/2018	0,7	148,9	104,2	0,0	104,2
ago/2018	0,8	127,4	102,0	0,0	102,0
sep/2018	0,9	118,4	106,6	0,0	106,6
oct/2018	1,0	90,8	90,8	0,0	90,8
nov/2018	1,0	69,9	69,9	8,6	61,3
dic/2018	1,0	73,4	73,4	0,0	73,4

Figura 6. Parámetros de Necesidades Hídricas del cultivo de Plataneras (Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación)

Una vez obtenidos los parámetros anteriores se puede calcular las necesidades de riego tanto mensuales, semanales o incluso diarias según el procedimiento que se explica en agrocabildo.org.

Para ello se necesitan los siguientes factores:

- La evapotranspiración de referencia (ET_o)
- El coeficiente de cultivo (K_c)
- La precipitación efectiva (P_{ef})

La necesidad de riego se calcula según la siguiente fórmula:

$$N_r = \frac{(ET_o \cdot K_c) - P_{ef}}{0,85} \text{ (l/m}^2\text{)}$$

Ecuación de la necesidad de riego

Cabe destacar que el valor de la evaporación de referencia (ET_o) variará dependiendo de la situación del cultivo, si se encuentra en un invernadero se adoptará el 80% de dicho valor, y si se encuentra al aire libre el 60%. En el caso de este proyecto se ha escogido el dato aportado directamente por la tabla, ya que la zona de regadío no se limitaría a una zona concreta si no que está destinada al cultivo de platanera de Buenavista del Norte. Se han tomado como referencia para los datos de este parámetro un listado meteorológico ofrecido por la Dirección General de Agricultura y Desarrollo Rural, de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas, del Gobierno de Canarias. En la Figura 19, los valores se corresponden a medidas diarias tomadas desde el año 2001 hasta 2019 en el punto de La Fuente en Buenavista del Norte.

En cuanto a la precipitación efectiva obtenida de los datos del Gobierno de Canarias cabe destacar que fueron recogidos el año 2018, por lo que finalmente se tomarán como valores para el cálculo del proyecto. Tanto las tablas como la gráfica serían aptas como referencia, no obstante, la segunda se descartará para utilizar una misma fuente para la resolución.

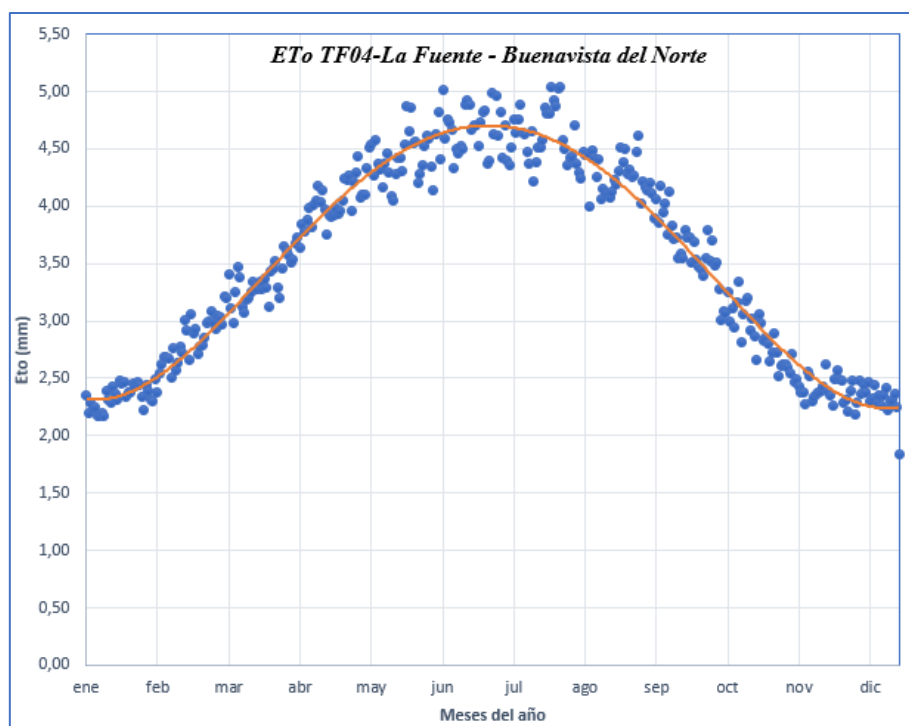


Figura 7. Datos meteorológicos diarios de la evaporación de referencia en Buenavista del Norte (Fuente: Dirección General de Agricultura y Desarrollo Rural, de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias)

Asimismo, el coeficiente de cultivo (K_c) nos permite adaptar los valores de evapotranspiración de referencia a las necesidades de riego de diferentes cultivos y dentro de estos a los distintos estados de desarrollo. Se pueden distinguir 4 periodos de cultivo: desde que siembra o plantación hasta emergencia o enraizamiento, desde el fin del periodo anterior hasta que el cultivo cubre prácticamente todo el terreno, el fin del periodo anterior hasta que se forma la cosecha y desde cosecha formada a recolección. Este factor es importante ya que variará dependiendo del cultivo y del mes en el que se encuentre. Los coeficientes de cultivo se pueden encontrar en el Estudio FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, o en los datos establecidos por el Gobierno de Canarias.

Por último, habría que definir el terreno del cultivo de plataneras que se encuentra en Buenavista del Norte. Según el Mapa de Cultivos de Tenerife de la Campaña 2015-2016 la superficie total de la categoría platanera correspondería a 294,15 hectáreas, de las cuales se ha decidido cubrir de regadío para un 20%, es decir, 58,83 hectáreas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 5. Necesidades Hídricas

<i>Mes</i>	<i>Coefficiente de cultivo, Kc</i>	<i>Precipitación efectiva, Pef [mm/mes]</i>	<i>Necesidad de riego [m³/mes]</i>	<i>Necesidad de riego [m³/semana]</i>	<i>Necesidad de riego [m³/día]</i>
<i>Enero</i>	0.5	14.5	15365.01	3841,25	495,65
<i>Febrero</i>	0.5	44.1	0.0	0.0	0.0
<i>Marzo</i>	0.6	8.9	37166.72	9291,68	1198,93
<i>Abril</i>	0.6	0.8	45126.07	11281,52	1504,20
<i>Mayo</i>	0.6	0.8	51424.34	12856,09	1658,85
<i>Junio</i>	0.6	1.7	54538.87	13634,72	1817,96
<i>Julio</i>	0.7	0.0	72118.66	18029,66	2326,41
<i>Agosto</i>	0.8	0.0	70596	17649	2277,29
<i>Septiembre</i>	0.9	0.0	73779.74	18444,94	2459,32
<i>Octubre</i>	1.0	0.0	62844.28	15711,07	2027,23
<i>Noviembre</i>	1.0	8.6	42426.81	10606,70	1414,23
<i>Diciembre</i>	1.0	0.0	50801.44	12700,36	1638,76

(Fuente: Elaboración Propia)

Como podemos observar, los valores de la necesidad de riego varían considerablemente desde febrero con un valor nulo de 0 m³/día o enero con 495,65 m³/día, hasta meses como julio con una necesidad de 2326,41 m³/día, quedando una media entre los doce meses de 1568,24 m³/día. Por ello para cumplir el requisito de la planta de que opere todo el año se ha dispuesto de una solución.

La instalación mientras se encuentre operativa requerirá de la realización de paradas de mantenimiento lo cual supondrían un inconveniente en la operación continua de desalación. Asimismo, se ha decidido realizar una parada de producción en febrero ya que como hemos comentado su valor de necesidad de riego es nulo. De esta manera se modificaría la cantidad media de agua de producción entre once meses a 1710,80 m³/día, no obstante, para el estudio se ha decidido aumentar hasta 2000 m³/día, un valor aceptable como la hipótesis inicial, de esta manera el excedente de agua sería menor y podría abarcar una zona mayor de cultivos. Teniendo en cuenta que una planta de desalación con esa capacidad se considera una instalación media, pero con unos requerimientos bajos.

Una vez decidida la producción se puede apreciar que en unos meses se produce un excedente y en otros una escasez, por este motivo se ha decidido construir un depósito para solucionar la distribución de agua cuando falte y el almacenamiento de la misma cuando sobre.

Los datos del depósito serían los siguientes:

Tabla 6. Agua del depósito

<i>Mes</i>	<i>Abastecimiento de agua [m³]</i>	<i>Agua del depósito [m³]</i>	<i>Agua depositada (+) /extraída (-) del depósito [m³/día]</i>
<i>Enero</i>	62000	53154.63	38952.48
<i>Febrero</i>	0	53154.63	0
<i>Marzo</i>	62000	59404.55	6249.92
<i>Abril</i>	60000	67093.66	7689.11
<i>Mayo</i>	62000	51957.15	-15136.51
<i>Junio</i>	60000	73765.46	21808.31
<i>Julio</i>	62000	27587.47	-46177.99
<i>Agosto</i>	62000	71481.47	43894
<i>Septiembre</i>	60000	20811.86	-50669.61
<i>Octubre</i>	62000	53078.28	32266.42
<i>Noviembre</i>	60000	49438.06	-3640.22
<i>Diciembre</i>	62000	14202,15	14202.15

(Fuente: Elaboración Propia)

Los resultados de la tabla 5 nos dan un volumen máximo que debe almacenar el depósito de 73765,46 m³ por lo que se supondrá un volumen final de 74000 m³, lo cual es un tamaño aceptable para la instalación de desalación.

6. Dimensionado del núcleo de membranas

El dimensionado del núcleo de membranas se realiza con todos los datos anteriores mencionados y con el software de la empresa Suez, Winflows. Además de utilizar la guía de diseño de elementos del propio programa que nos fija el índice de

densidad de sedimentos (SDI) igual a 4 aunque para el sistema de captación utilizado en la instalación que son pozos cerrados pasa a ser el valor igual a 3.

Winflows RO Element Design Guidelines															
Water Source			RO Permeate	Brackish Well Water	Brackish Surface Water		Seawater Well	Surface Seawater		Tertiary Treated Wastewater		MBR Permeate	HERO		
Pre-Treatment			RO		MF/UF	Conventional		MF/UF	Conventional	MF/UF	Conventional	MBR	City/Well	Waste Water	2nd Pass
Parameters	Condition	Unit													
SDI15	Max		1	3	3	5	3	3	5	3	5	2			
Permeate Flux	Max Avg.	gfd	24	18	18	14	12	12	10	10	14	14	30	25	35
	Typical Range	gfd	18-24	14-18	14-18	10-14	8-12	8-12	6-10	8-12	6-10	10-14			
Lead Element Flux	Max	gfd	30	26	24	20	25	25	18	18	16	20	32	28	40
Element Recovery	Max/flux >18 ...	%	35	15	15	15	15	15	15	15	15	15	40	33	50
	Max/flux <12 ...	%	35	22	20	20	20	20	20	20	20	20	40	33	50
A-value, % annual	Default Value	%	2	3	3	5	4	5	7	10	15	5	3	5	2
B-value, % annual	Default Value	%	2	5	5	7	5	5	7	10	15	5			
Max Feed Flow	16" elem	gpm	300.0	300.0	260.0	240.0	300.0	260.0	240.0	220.0	200.0	260.0	0.0	0.0	0.0
	8" elem	gpm	75.0	75.0	65.0	60.0	75.0	65.0	60.0	55.0	50.0	65.0	0.0	0.0	0.0
	4" elem	gpm	18.0	18.0	14.0	13.0	16.0	14.0	13.0	12.0	11.0	14.0	0.0	0.0	0.0
	2.5" elem	gpm	6.0	6.0	5.0	4.0	6.0	5.0	4.0	4.0	4.0	5.0	0.0	0.0	0.0
Min Conc. Flow	16" elem	gpm	32.0	32.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	56.0	80.0	40.0
	8" elem	gpm	8.0	8.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	14.0	20.0	10.0
	4" elem	gpm	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	4.0	5.0	2.0
	2.5" elem	gpm	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0

Figura 8. Guía de diseño de Winflows (Fuente: Winflows)

Asimismo, se introducen los correspondientes datos del agua de alimentación de la instalación en Winflows: composición química, temperatura, TDS, pH, SDI y se establece una conversión del 45%. Este valor se ha escogido como promedio ya que cuanto mayor es la conversión menor es el consumo específico del sistema, pero mayor es la operación de la membrana.

Feed Water Analysis

Select Water Source: Sea Wellwater

Select Water Type: User Defined

Ion	mg/l	meq/l	ppm as CaCO3
Calcium (Ca)	431.00	21.5081	1076.34
Magnesium (Mg)	1470.00	120.9628	6053.40
Sodium (Na)	11870.00	516.3114	25838.03
Potassium (K)	451.00	11.5351	577.26
Ammonia - N (NH4)	0.00	0.0000	0.00
Barium (Ba)	0.00	0.0000	0.00
Strontium (Sr)	10.00	0.2283	11.42
Iron (Fe)	0.00	0.0000	0.00
Manganese (Mn)	0.00	0.0000	0.00
Total Cations	14232.00	670.5456	33556.45
Sulfate (SO4)	3148.00	65.5396	3279.83
Chloride (Cl)	21364.26	602.6081	30156.62
Fluoride (F)	0.00	0.0000	0.00
Nitrate (NO3)	0.00	0.0000	0.00
Bromide (Br)	0.00	0.0000	0.00
Phosphate (PO4)	0.00	0.0000	0.00
Boron (B)	5.00	0.0386	1.93
Silica (SiO2)	1.00	0.0003	0.01
Hydrogen Sulfide (H2S)	0.00	0.0000	0.00
Bicarbonate (HCO3)	139.45	2.2854	114.37
Carbon Dioxide (CO2)	0.90	0.0000	0.00
Carbonate (CO3)	2.18	0.0727	3.64
Total Anions	24659.89	670.5457	33556.45

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

Parameters

Total Alkalinity (ppm CaCO3) 120.00

TDS (mg/l) 38891.89

pH 8.00

Temperature (C) 20.00

SDI 4.00

Recovery (%) 75

Saturation Data (Feed Water)

BaSO4 0.00 %

CaF2 0.00 %

CaSO4 24.90 %

SiO2 0.79 %

SrSO4 22.57 %

Struvite 0.000 %

LSI 0.53

Stiff-Davis Index 0.06

Osmotic Pressure 401.42 psi

Conductivity at 25C 56294 µS/cm

Density 1025.4 kg/m3

Multiple Feed

Design Guidelines

Add Sodium

Add Chloride

Clear Values

Balance

Export

Import

Cancel

OK

Figura 9. Datos del agua de alimentación en Winflows (Fuente: Winflows)

Por otro lado, se establecen otros parámetros de la instalación como es el número de etapas, el cual se ha decidido como una única etapa. Esto se debe a que la capacidad de la desaladora es baja y porque el modelo de membranas puede ser de una menor calidad lo cual tendría un menor consumo específico.

Flow	
<input checked="" type="radio"/> Specify Product	2000.00 m3/day
<input type="radio"/> Specify Feed	m3/day
<input type="radio"/> Specify Concentrate	m3/day
RO Recoveries	
Recovery	45.00 %
Concentrate Recycle	
<input checked="" type="radio"/> Specify Flow Rate	<input type="radio"/> Specify Percent
RO1 to RO1Feed	0.00 m3/day
Feed Bypass	
<input checked="" type="radio"/> Specify Flow Rate	<input type="radio"/> Specify Percent
	0 %

Figura 10. Datos del flujo en Winflows (Fuente: Winflows)

6.1. Pretratamiento

El pretratamiento es un paso fundamental en la instalación ya que mejora tanto la vida útil de las membranas como la calidad del agua de alimentación. Esta medida depende directamente del sistema de captación y la composición química del agua de mar, ya que los componentes orgánicos e inorgánicos que provienen de ahí deterioran las membranas y disminuyen el rendimiento de la instalación. Los inconvenientes que se provocan sin el pretratamiento pueden ser la obstrucción del flujo a través de las membranas, el desgaste de los materiales e incluso la formación de precipitados debido a la acumulación de dichas partículas. Se encuentran dos tipos: pretratamiento físico y pretratamiento químico.

6.1.1. Pretratamiento físico

Como pretratamiento físico en la instalación de desalación se pueden establecer varios métodos como filtros de arena y filtros de cartucho, no obstante, únicamente se colocarán los últimos ya que el software de Winflows solo permite colocar de este tipo.

En cuanto a los tipos de filtros el programa dispone de varios modelos de los cuales se elige para la instalación la serie HFZ (High Flow Z) que trabaja con la tecnología Z. Plex de la empresa Suez y está especializada en pretratamiento de ósmosis inversa. Las características que presenta son:

- Baja resistencia al flujo que pasa a través de él.
- Excelente capacidad de retención de suciedad.
- Resistencia a la obstrucción de la superficie.
- Gran resistencia química debido a su composición de polipropileno.



Figura 11. Filtros de cartucho High Flow Z (Fuente: Suez)

La exigencia mínima de los fabricantes de membranas para estos filtros es que garanticen una filtración mínima de 5 μm (micras). Por este motivo se selecciona el modelo HFZ05 dando el resultado de 14 filtros con unas pérdidas de carga insignificantes que mejora el funcionamiento de la instalación notablemente.

Estos filtros se disponen verticalmente y utilizan como método de filtración unos cartuchos provistos de unos orificios, sobre el que se enrolla un hilo de polipropileno a unas determinadas tensiones que garantizan la separación de los sólidos. Sin embargo, esta limpieza no es tan eficaz como la de los filtros de arena, debido a que los sólidos de un tamaño muy pequeño se quedan atrapados. Esto conlleva a la colmatación de los mismos por lo que se deben sustituir periódicamente.

Filter	P/N	TIE	Micron	View Fact Sheet
RO.Zs 05-50-XK		5	5	-.-
RO.Zs 05-60-XK		6	5	-.-
RO.Zs 05-70-XK		7	5	-.-
SWRO.Zs 01-40-XK		4	1	-.-
SWRO.Zs 01-50-XK	3048110	5	1	-.-
SWRO.Zs 01-60-XK		6	1	-.-
SWRO.Zs 01-70-XK		7	1	-.-
SWRO.Zs 05-40-XK		4	5	-.-
SWRO.Zs 05-50-XK		5	5	-.-
SWRO.Zs 05-60-XK		6	5	-.-
SWRO.Zs 05-70-XK		7	5	-.-
HFZ01		4	1	-.-
HFZ05		4	5	-.-
HFZ15		4	15	-.-
HFZ25		4	25	-.-

Flow (m3/day)

Number of Filters

Filter DP (bar)

Actual Flow / TIE (m3/da)

Flow per TIE (m3/day)

14 HFZ05 Filter Cartridges at 81.76492 m3/day Flow per TIE.
dP for new filters = 0,01 bar.

Figura 12. Selección filtros de cartucho en Winflows

6.1.2. Pretratamiento químico

Como pretratamiento químico en una instalación de desalación el proceso más habitual es la regulación del pH ya que el agua de mar tiene un valor de 8 y así no puede ser enviada directamente a las membranas. Un valor óptimo para el pH sería de 7, no obstante, si se establece para la instalación aparece otro factor que resulta un inconveniente y es el Índice de Saturación de Langelier (LSI) que indica un rango ideal entre -0,3 y 0,3 que si se sobrepasa aparecen problemas con la corrosión. Por este motivo se impone un valor de pH a la entrada del bastidor de membranas de 6,5.

Este proceso comúnmente se solía realiza con una dosificación de ácido sulfúrico (H_2SO_4) con una concentración bastante elevada. Así se evita la precipitación de carbonato cálcico de las membranas al volverse más soluble. Por otro lado, este método no se emplea en la actualidad ya que implica graves riesgos para la seguridad y la salud. De esta manera se ha escogido el ácido clorhídrico con una gran concentración para el proceso de pretratamiento químico.

Figura 13. Pretratamiento químico en Winflows

6.2. Selección de membranas

Las membranas que ofrece la marca Suez tienen una gran variedad, las cuales se dividen según su aplicación o el filtrado que se necesite. Las que trabajan con agua de mar para ósmosis inversa son las que se encuentran en la Figura 14 en la parte izquierda de la misma, de todas ellas nos fijaremos en las series AE y AD.



Figura 14. Membranas para ósmosis inversa de la marca Suez (Fuente: Suez)

La serie A de membranas seleccionada abarca tanto el tratamiento de agua salobre como la de productos especializados en la ósmosis inversa con agua de mar. Además, se caracterizan por un excelente rechazo de cloruro de sodio. Esta gama de membranas se diferencia de otras debido a sus finas películas que la componen.

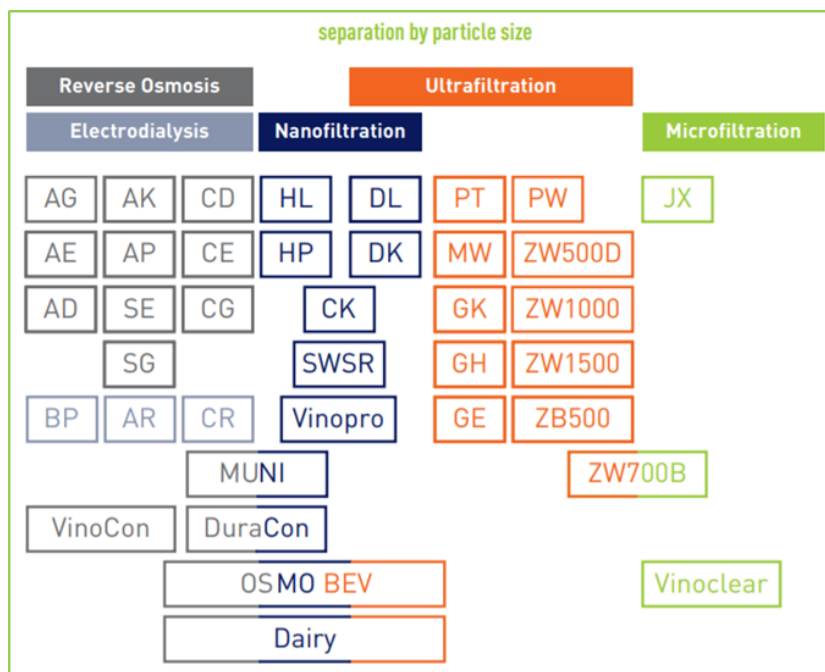


Figura 15. Membranas de la marca Suez (Fuente: Suez)

La selección de los dos tipos de membranas depende fundamentalmente del coste económico, el consumo específico y la calidad del agua permeada. No obstante, este último factor no influye en gran medida ya que el agua producto será para el riego de plataneras por lo que no se exigirá tanto como si fuese para consumo humano.

AE Series
high rejection low energy seawater RO elements

Figura 16. Serie AE de Suez

AD series
high rejection seawater RO elements

Figura 17. Serie AD de Suez

Entre las dos posibles elecciones se ha decidido seleccionar la serie AE, debido a que tiene un menor consumo energético. Además, por ser una planta de desalación de una capacidad pequeña, que el agua de producción sea de uso agrícola y de la limitación de la fuente de la instalación desaladora, la energía undimotriz. Otra característica sobre el funcionamiento es que estas membranas operan de manera óptima con presiones superiores a los 800 psi, factor a tener en cuenta durante el diseño.

En esta serie de membranas podemos diferenciar tres posibles modelos, que varían tanto en sus dimensiones como en el caudal con el que pueden trabajar:

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

Las características de estos modelos son proporcionadas tanto por el fabricante como por el propio software, así como sus parámetros de funcionamiento típicos, los cuales se mostrarán a continuación.

Membrane				
Thin-film membrane (TFM*)				
Model	Average permeate flow GPD (m ³ /day) (1) (2)	Ave. NaCl rejection (1) (2)	Min. NaCl rejection (1) (2)	Min. Boron Rejection (2)
AE-90	2000 [7.6]	99.8%	99.3%	90.0%
AE-400, 34	9000 [34.1]	99.8%	99.3%	90.0%
AE-440	9900 [37.5]	99.8%	99.3%	90.0%

(1) Average salt rejection after 24 hours of operation. Individual flow rate may vary ±20%.

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

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

Figura 18. Parámetros específicos serie AE (Fuente: Suez)

Typical Operating Pressure	800psi (5,516kPa)
Typical Operating Flux	7-11GFD (12-19LMH)
Maximum Operating Pressure	1,200psi (8,274kPa)
Maximum Temperature	Continuous operation: 122°F (50°C) Clean-In-Place (CIP): 122°F (50°C)
pH range	Optimum rejection pH: 7.0-7.5, Continuous operation: 2.0-11.0, Clean-In-Place (CIP): 2.0 – 12.0 (1)
Maximum Pressure Drop	Over an element: 12 psi (83 kPa) Per housing: 50 psi (345 kPa)
Chlorine Tolerance	1,000+ ppm-hours, dechlorination recommended
Feedwater	NTU < 1 SDI ₁₅ < 5

(1) Please refer to Cleaning Guidelines Technical Bulletin TB1194.

Figura 19. Parámetros de operación serie AE (Fuente: Suez)

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

Figura 20. Dimensiones serie AE (Fuente: Suez)

Una vez obtenido estos datos antes de realizar las simulaciones correspondientes en Winflows es necesario elegir el modelo, número de membranas y número de tubos de presión. Antes de todo debemos extraer de las tablas anteriores el flujo de funcionamiento típico (Typical Operating Flux) que ofrece un rango de valores 12-19 LMH (l/m²h) del cual se utiliza un valor promedio de 15,5 LMH.

El siguiente paso será calcular el número de membranas, que depende del flujo de permeado de la instalación 2000 m³/día, el flujo típico de funcionamiento 15,5 LMH, y el área activa de la membrana, que es un dato proporcionado por el fabricante Suez que se encuentra recogido en las tablas. Se recurre a la siguiente ecuación:

$$\text{Número de membranas} = \frac{\text{Flujo producción}}{\frac{\text{Flujo típico de funcionamiento}}{\text{Área activa de la membrana}}}$$

Posterior al cálculo de membranas se estima el número de tubos de presión dependiendo de la agrupación de las membranas, se estudia las dos más típicas seis o siete membranas según la capacidad del mismo.

Tener en cuenta que para un mayor número de membranas menor será el número de tubos de presión, este caso será beneficioso siempre y cuando la colocación de una membrana más rentabilice el costo adicional y el consumo específico que requiera.

Asimismo, realizamos los cálculos que se agrupan en la siguiente tabla:

Tabla 7. Resultados de los cálculos del número de membranas y del número de tubos de presión

<i>Modelo</i>	<i>Flujo típico de funcionamiento (L/m²h)</i>	<i>Área Activa (m²)</i>	<i>N.º de membranas</i>	<i>N.º de tubos de presión (6 membranas)</i>	<i>N.º de tubos de presión (7 membranas)</i>
AE-90	15,5	8,4	641	107	92
AE-400,34	15,5	37,2	145	25	21
AE-440	15,5	40,9	132	22	19

(Fuente: Elaboración Propia)

En un primer cálculo se puede observar una clara diferencia de uno de los modelos con los otros dos, se trata del AE-90, el cual al tener un área activa considerablemente menor se obtiene un número de tubos de presión bastante elevado. Por este motivo se descarta para su uso en la instalación de desalación.

Para la elección entre los dos modelos restantes se decide simular en el software para obtener los consumos específicos que se obtendrían con las dos configuraciones. Las características del flujo de abastecimiento en el paso por las membranas son fundamentales por lo que se estudia justo a la entrada antes de realizar el proceso. Ahí se encuentra el agua con un pH de ocho por lo que habría que realizar un pretratamiento químico, como se comentó, de ácido clorhídrico. Además, se colocan catorce filtros de cartucho como pretratamiento físico al flujo antes de pasar a la membrana.

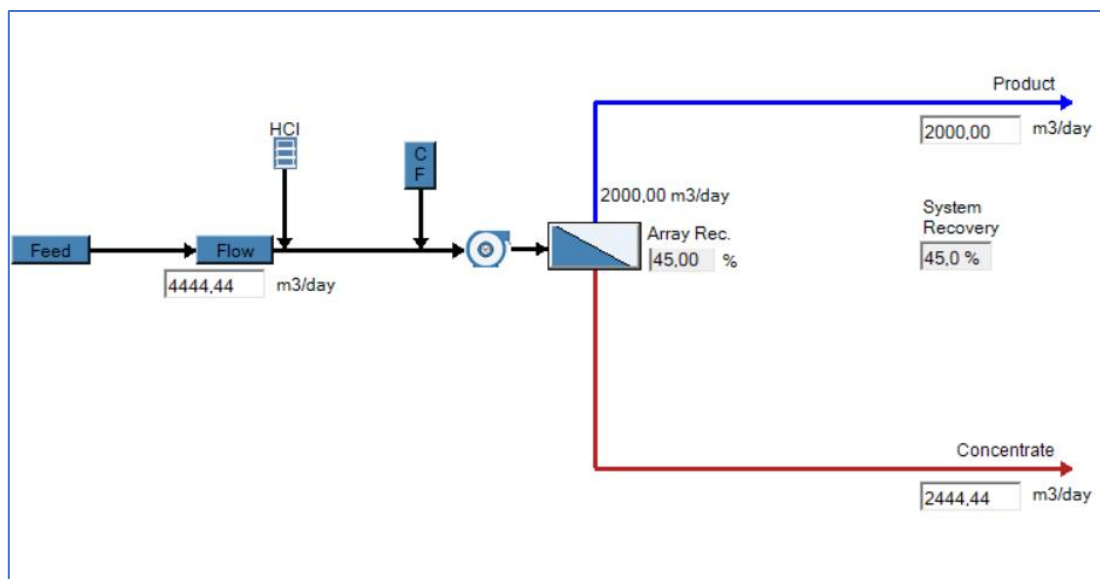


Figura 21. Análisis de la instalación de desalación

Asimismo, se establecen varios parámetros a tener en cuenta en la simulación que se establecerán constantes para compararlos únicamente por el consumo específico de la instalación. La edad de las membranas se establece en tres años, ya que no se recomienda colocar cero años debido a que no sería un valor real si no un concepto ideal como si la membrana trabajase perfectamente desde el inicio. Por ello también se debe establecer un porcentaje de reducción de flujo y de rechazo anual, los cuales quedan establecidos en la Guía de diseño de Winflows como un cuatro y un cinco por ciento respectivamente. También tener en cuenta que la bomba de alta presión que se muestra en el software se establece un rendimiento del 80% para ambos casos. Se obtienen los siguientes resultados con la simulación:

Tabla 8. Consumos específicos según modelo de membrana

Modelo	Consumo específico 6 membranas (KWh/m ³)	Consumo específico 7 membranas (KWh/m ³)
AE-400,34	4,83	4,82
AE-440	4,85	4,84

(Fuente: Elaboración Propia)

Se puede observar que no varía considerablemente el consumo específico entre los dos modelos, aunque al realizar un estudio de resultados obtenidos se decide utilizar la configuración del modelo AE-440 con 7 membranas y 19 tubos de presión en cada una de ellas. De esta manera, la instalación tendría un menor número de tubos de presión por cada membrana.

Stage	Pressure Vessels	Elements Per Vessel	Application	Element Group	Element Model	Element Age (yr)	Flux Annual % Change	Salt Passage Annual % Change	Permeate Pressure (bar)	Interstage Pressure Loss (bar)	Interstage Boost Pressure (bar)	Boost Energy Efficiency %	Element Info
1	19	7	Seawater RO	Low Energy	AE-440	3.00	4.00	5.00	2.00	0.00			...
2	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
3	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
4	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
5	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
6	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...

Figura 22. Análisis del bastidor de membranas

Los motivos principales de esta elección son:

- Presenta el menor número de tubos de presión posible, por lo tanto, el bastidor de membranas será menor y se facilitarán las tareas de mantenimiento.
- La cantidad de boro que presenta en su composición de agua producto es menor que la otra configuración lo cual es beneficioso para el riego de cultivos de plataneras.
- La diferencia de consumo específico no es notable.
- Presenta un total de sólidos disueltos (TDS) más aceptable.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que la instalación de desalación está alimentada por energía undimotriz la cual no se encuentra tan desarrollada como otras energías renovables por lo que se busca el menor consumo específico posible, aunque en este caso no hay una diferencia notable entre los modelos de membranas.

De esta manera con la simulación obtendríamos los resultados del agua permeada y la de rechazo. Destacar la cantidad de boro del agua permeada que sería de 1,37 mg/L

un valor ya aceptable para el riego de plataneras cuyo límite se encuentra en 2. Además, el pH del agua de permeado es demasiado bajo de 5,11 por lo que debe ser sometido a un postratamiento que se detallará más adelante.

Ions, mg/l		Product	Concentrate
Calcium		0.63	782.06
Magnesium		1.66	2667.73
Sodium		80.80	21486.41
Potassium		4.43	815.27
Ammonia - N (NH4)		0.00	0.00
Barium		0.00	0.00
Strontium		0.01	18.15
Iron		0.00	0.00
Manganese		0.00	0.00
Sulfate		2.68	5713.64
Chloride		131.85	38720.10
Fluoride		0.00	0.00
Nitrate		0.00	0.00
Bromide		0.00	0.00
Phosphate		0.00	0.00
Boron		1.37	7.96
Silica		0.01	1.81
Hydrogen Sulfide		0.00	0.00
Bicarbonate		1.80	201.13
Carbon Dioxide		22.58	22.47
Carbonate		0.00	0.16
TDS, mg/l		225.22	70414.41
Flow	m3/day	1999.08	2447.79
Temperature	C	20.00	20.00
Pressure	bar	2.00	59.85
Osm. Pressure	bar	0.19	52.01
pH		5.11	6.60
Conductivity at 25C	µS/cm	465.00	93035.00
Saturation Data			
BaSO4	%	0.00	0.00
CaF2	%	0.00	0.00
CaSO4	%	0.00	51.81
SiO2	%	0.00	1.31
SrSO4	%	0.00	43.10
Struvite	%	0.00	0.00
LSI		-5.57	-0.49
S&DI		-6.72	-1.05

Figura 23. Resultados obtenidos de Winflows

7. Dimensionado del recuperador de energía

Uno de los requisitos de la instalación de desalación como ya se comentó es la de tener el menor consumo específico posible por ese motivo se colocarán recuperadores de energía para optimizar el proceso. De esta forma permite pasar energía de la etapa de rechazo hacia la alimentación disminuyendo el consumo considerablemente. Asimismo, mediante el software de dimensionado de membranas nos permite simular cada uno de los tres recuperadores de energía que encontramos: el turbo-charger, la turbina Pelton y el intercambiador de presión.

7.1. Turbina Pelton

La turbina Pelton se utiliza en las instalaciones desaladoras para transformar de la salmuera que expulsa el sistema en energía cinética. El líquido a una alta presión golpea la rueda con álabes y el cual se acoplaría al motor de la bomba de alta presión. No obstante, este sistema se ha dejado de utilizar por los intercambiadores de presión ya que ofrecen unos resultados mucho mejores. En las plantas de desalación de pequeñas dimensiones tiene una gran eficiencia, mientras que en las grandes requiere de un diseño especial que evite las averías y pérdidas que se puedan formar. Un ejemplo de ello se da en centrales hidroeléctricas. En el caso de este proyecto, como una instalación pequeña con recuperación de energía el sistema sería una bomba multietapa-turbina Pelton.



Figura 24. Turbina Pelton

Por lo tanto, en la simulación del software con los parámetros establecidos para el cálculo del bastidor de membranas y con un rendimiento de la turbina Pelton del 85%, el consumo específico de la instalación es de 3,057 KWh/m³.

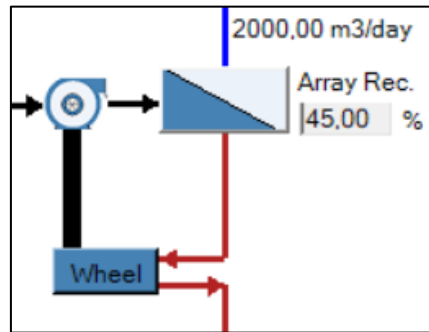


Figura 25. Análisis con turbina Pelton en Winflows

7.2. Turbo-charger

El turbocompresor es un dispositivo que aplicado a una instalación de desalación que trabaja transfiriendo energía de fluido a fluido desde la línea de alta presión de la salmuera hasta la línea de alimentación de la planta. La gran ventaja que presenta es que su funcionamiento hidráulico no necesita el accionamiento mediante un motor eléctrico. Este método de recuperación de energía se utiliza en plantas de pequeña y media producción tanto para agua salobre como para agua de mar.



Figura 26. Turbo-charger (Fuente: Energy Recovery)

Por lo tanto, en la simulación del software con los parámetros establecidos para el cálculo del bastidor de membranas y con un rendimiento del turbo-charger del 80%, el consumo específico de la instalación es de 2,850 KWh/m³.

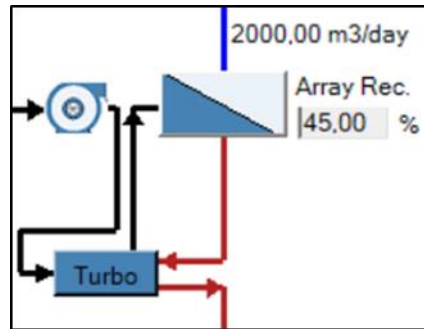


Figura 27. Análisis con turbo-charger en Winflows

7.3. Intercambiadores de presión

Los intercambiadores de presión son la mejor opción como recuperadores de energía cuyo concepto es parecido a los anteriores, transfiere energía del flujo de la salmuera a alta presión hacia el flujo de agua de alimentación, aunque en este caso se realiza directamente sin convertirla previamente en energía mecánica de rotación.



Figura 28. Intercambiador de presión (Fuente: Energy Recovery Inc.)

Se distinguen dos tipos de intercambiadores de presión: los intercambiadores de presión de rotación y los intercambiadores de presión fijos por desplazamiento. El primero de ellos se distingue por realizar directamente la transferencia de energía por medio de un rotor y por obtener rendimientos, un ahorro de energía y sobre todo un bajo coste de mantenimiento debido a su tamaño y disposición. No obstante, como inconveniente destacable es la acumulación de microorganismos indeseables si no se encuentra en un estado óptimo de trabajo. Por otro lado, los de desplazamiento son dos tubos horizontales con un disco separador entre la salmuera y el agua de mar, que transmite la presión por medio de unos pistones de uno a otro.

Por lo tanto, en la simulación del software con los parámetros establecidos para el cálculo del bastidor de membranas y con un rendimiento del intercambiador de presión del 94%, el consumo específico de la instalación es de 2,344 KWh/m³.

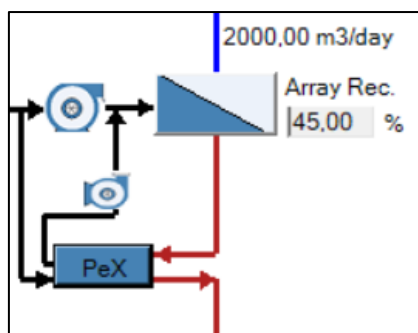


Figura 29. Análisis con intercambiador de presión en Winflows

7.4. Análisis de resultados

Los valores de consumos específicos obtenidos de las simulaciones en el software de Winflows para los recuperadores de energía son los siguientes:

Tabla 9. Consumos específicos de los recuperadores de energía

<i>Recuperador de energía</i>	<i>Consumo específico (KWh/m³)</i>
<i>Sin recuperador de energía</i>	4,84
<i>Turbo-charger</i>	3.057

<i>Turbina Pelton</i>	2.850
<i>Intercambiador de presión</i>	2.344

(Fuente: Elaboración Propia)

La primera valoración de la incorporación de recuperadores de energía es que reducen considerablemente el consumo específico por lo que deben añadir. Entre los tres recuperadores el más destacable es el intercambiador de presión por lo que será el que se coloque en la instalación de desalación y de sus dos tipos se optan por el intercambiador de presión de rotación. Por otro lado, no solo afecta al consumo específico si no que modifica varios parámetros importantes que son los siguientes:

- Aumenta el total de sólidos disueltos (TDS) del agua de alimentación.
- Aumenta el total de sólidos disueltos (TDS) del agua de permeado.
- Aumenta la presión de alimentación de las membranas.
- Aumenta la presión de la línea de rechazo.
- Aumenta la salinidad.

7.5. Dimensionado del intercambiador de presión

En la instalación de desalación como ya se mencionó se deben añadir intercambiadores de presión para la mejora de consumo específico, no obstante, se disponen varios fabricantes de los cuales se estudiarán dos fabricantes Danfoss y Energy Recovery Inc. Estas dos empresas han sido seleccionadas no solo por la capacidad de proporcionar el intercambiador de presión para la instalación, sino también por la facilidad de estudio que proponen gracias a una herramienta de selección de sus dispositivos que proveen de forma gratuita. Asimismo, se hace uso de estas herramientas para el estudio del intercambiador de presión.



Figura 30. Danfoss



Figura 31. Energy Recovery Inc.

Los dispositivos que ofrece la empresa de Danfoss son los dispositivos iSave que los definen como un dispositivo de recuperación de energía 3 en 1 optimizado para aplicaciones de ósmosis inversa de agua de mar. Dispone de un intercambiador de presión, una bomba booster y un motor integrados en una unidad compacta con una elevada eficiencia y un corto periodo de amortización de la inversión. Una solución cuando se dispone de limitación de espacio son estos dispositivos iSave.

Para el estudio de estos intercambiadores se recurre a la herramienta proporcionada por el fabricante ya comentado que se encuentra en una hoja de Excel, a la cual se deben introducir varios valores de entrada para que nos devuelva un consumo aproximado de nuestra instalación. Destacar que este será un primer estudio sin el postratamiento ni las bombas definidas de la instalación por lo que se supondrán mismos datos en ambos casos para su comparación al igual que para el bastidor de membranas.

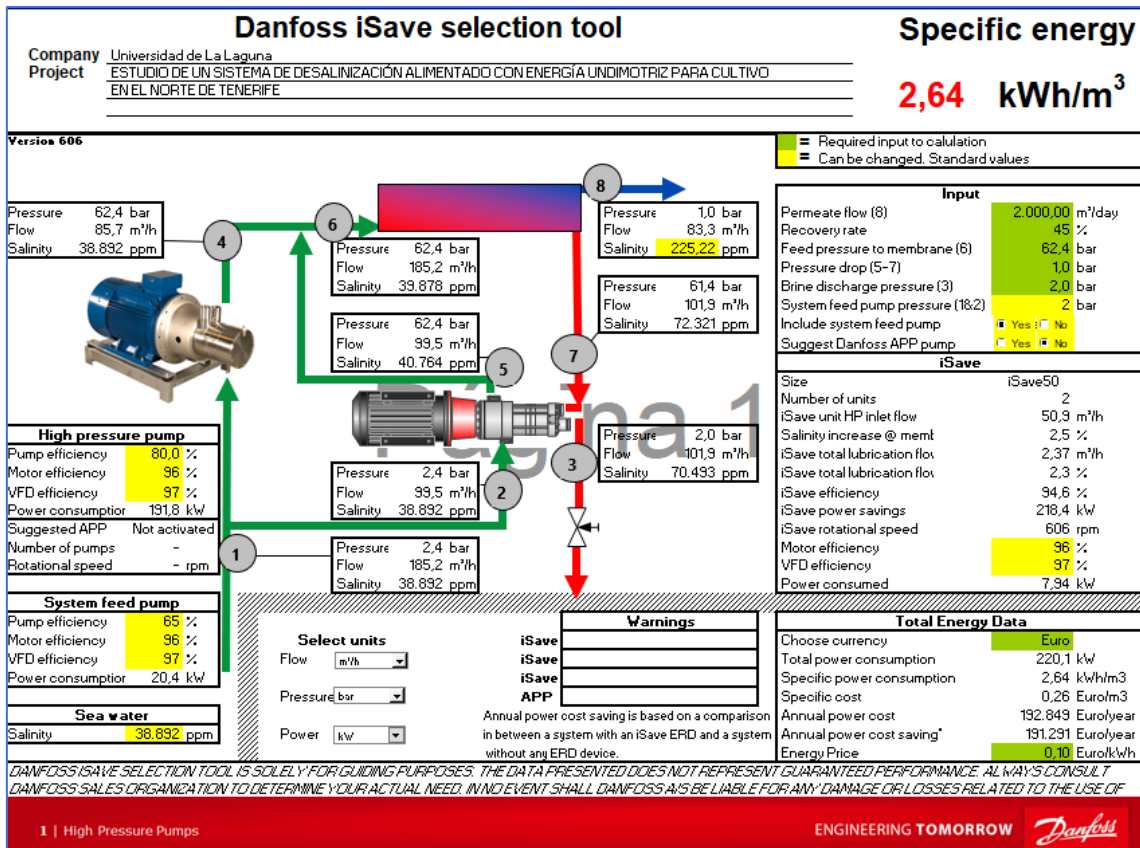


Figura 32. Herramienta de cálculo de Danfoss.

Se ha seleccionado para el estudio de Danfoss el dispositivo que mejor se adapta a la instalación de desalación, el iSave50. El consumo específico obtenido es de 2,64 kWh/m³ y el número de unidades sería de 2.

Por otro lado, en cuanto a la empresa de Energy Recovery Inc. dispone de varios modelos de intercambiadores PX tanto de la serie Q como de la serie S. Estos dispositivos están diseñados para plantas desaladoras de ósmosis inversa de cualquier tamaño. Se obtienen eficiencias de hasta un 98%, lo cual es un valor bastante alto para un intercambiador de presión. Otra parte destacable es el modularidad de estos modelos que facilitan el mantenimiento y ofrecen una gran durabilidad debido a sus materiales resistentes.

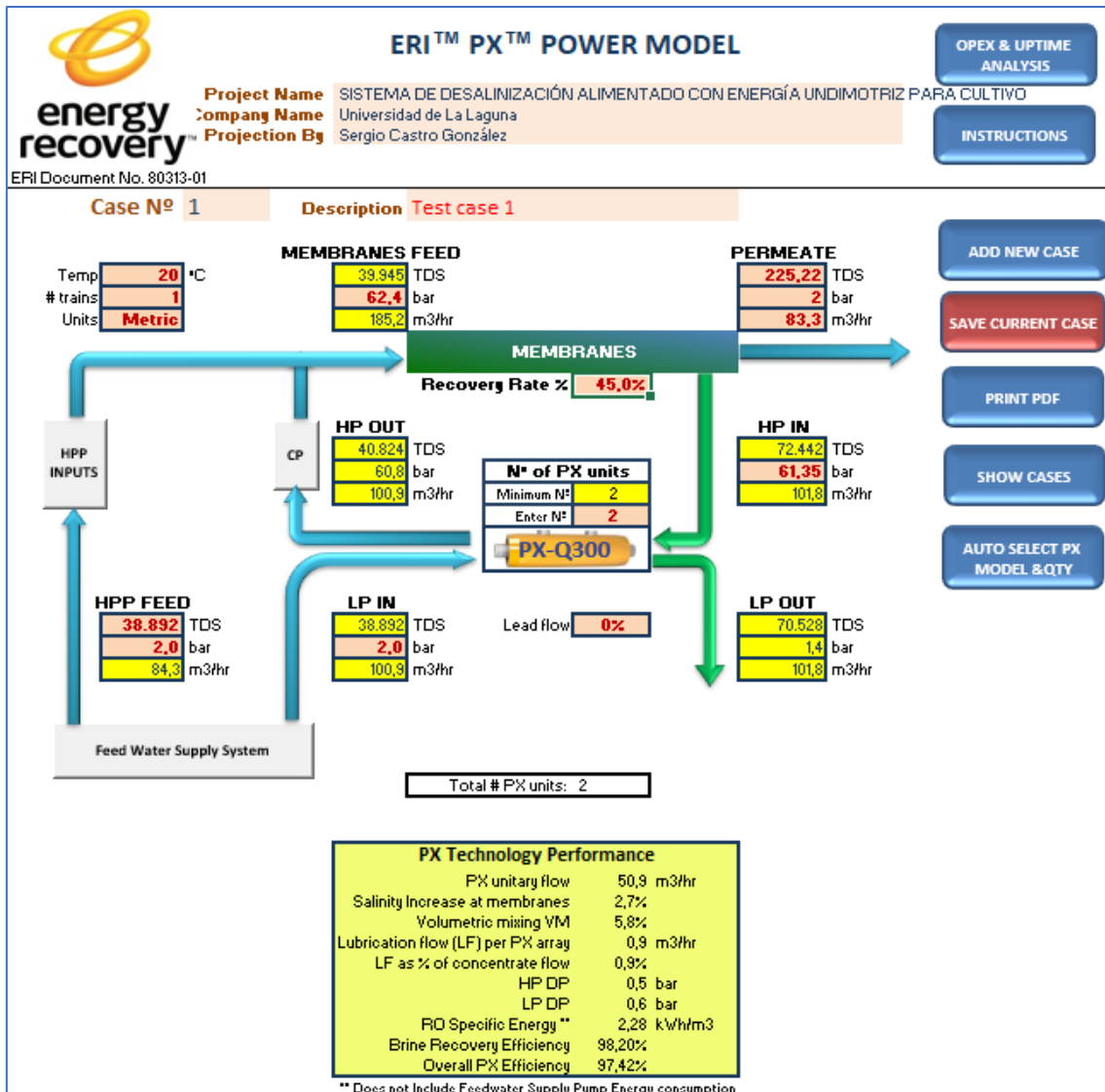


Figura 33. Herramienta de cálculo de Energy Recovery Inc.

Para el caso de la instalación de desalación se ha optado por el modelo PX-Q300, el cual se trata del dispositivo más eficiente de la serie PX-Q, y tiene la ventaja de ser uno de los más silenciosos del mercado. El consumo específico obtenido es de 2,28 KWh/m³ y el número de unidades sería de 2.

Con los resultados obtenidos y con la consideración de los requisitos de diseño de nuestra instalación se decide optar por los intercambiadores de presión PX-Q300 de Energy Recovery Inc. El valor del consumo específico del sistema de desalinización es

orientativo, pero sirve como base para el cálculo de las bombas que se realizará en un anexo posterior.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO II

**DIMENSIONADO DE LOS SISTEMAS DE LA
PLANTA DE DESALACIÓN, TUBERÍAS Y
SELECCIÓN DE BOMBAS**

Autor: Sergio Castro González

Tutor: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Dimensionado de los sistemas de captación.....	1
2. 1. Dimensionado de los pozos cerrados de captación	2
2. 2. Dimensionado de las tuberías de captación y de alimentación	6
2. 3. Selección de bombas de captación.....	9
3. Dimensionado de los sistemas del núcleo de desalación	21
3.1. Selección de la bomba de alta presión	21
3.2. Selección de la bomba booster	26
4. Dimensionado del sistema de distribución.....	30
4.1. Dimensionado de las tuberías de distribución	30
4.2. Selección de bomba de distribución	32
5. Dimensionado del postratamiento.....	40
6. Dimensionado del sistema de rechazo	40
6.1. Dimensionado de las tuberías de rechazo.....	41
6.2. Selección de bomba de rechazo	42
7. Cálculo del consumo específico final de la planta de desalación	45

Índice de figuras

Figura 1. Diseño de establecimiento de pozos de captación	4
Figura 2. Estadística de bajamares y pleamares (Fuente: Puertos del Estado)	5
Figura 3. Análisis de la altura del terreno (Fuente: Goolzoom)	5
Figura 4. Diámetros nominales de las tuberías (Fuente: Flowtite)	8
Figura 5. Tabla de propiedades físicas del agua.....	12
Figura 6. Bomba Grundfos SP 95-3 – 19001903 (Fuente: Grundfos)	17
Figura 7. Curvas de la bomba de Grundfos SP 95-3 – 19001903 (Fuente: Grundfos) ..	18
Figura 8. Bomba sumergible KSB de la serie UPA (Fuente: KSB)	19
Figura 9. Curvas de la bomba KSB de la serie UPA modelo 200B-80 (Fuente: KSB) .	19
Figura 10. Bomba Lowara serie Z8(Fuente: Lowara)	20
Figura 11. Curvas de la bomba Lowara modelo Z875 02-L6W (Fuente: Lowara)	20
Figura 12. Bomba Sulzer serie MBN (Fuente: Sulzer)	23
Figura 13. Curvas de la bomba Sulzer modelo MBN50-215 (Fuente: Sulzer)	24
Figura 14. Bomba Flowserve serie DMX (Fuente: Flowserve)	25
Figura 15. Curvas de la bomba Flowserve 3X10DMX-B (Fuente: Flowserve)	25
Figura 16. Bomba Grundfos modelo NB 65-125/137 (Fuente: Grundfos)	27
Figura 17. Curvas de la bomba Grundfos modelo NB 65-125/137 (Fuente: Grundfos)	27
Figura 18. Bombas KSB serie Etanorm/Etabloc (Fuente: KSB)	28
Figura 19. Curvas de la bomba KSB de la serie Etanorm/Etabloc 080-065-125 (Fuente: KSB)	28

Figura 20. Bomba Lowara NSCF 80-250/75/P45VCC4 (Fuente: Lowara)	29
Figura 21. Curvas bomba Lowara NSCF 80-250/75/P45VCC4 (Fuente: Lowara)	29
Figura 22. Altura del emplazamiento del depósito designado	31
Figura 23. Bomba Grundfos modelo NK 65-125/137 (Fuente: Grundfos)	36
Figura 24. Curvas bomba Grundfos modelo NK 65-125/137 (Fuente: Grundfos)	37
Figura 25. Curvas de la bomba de distribución KSB de la serie Etanorm/Etabloc 080-065-125 (Fuente: KSB)	38
Figura 26. Bomba Flowserve serie SMP (Fuente: Flowserve)	39
Figura 27. Curvas de la bomba Flowserve modelo SMP 3X3X6 (Fuente: Flowserve) ..	39
Figura 28. Resultados de pH de la simulación en Winflows.....	40
Figura 29. Longitud de tubería de rechazo	41
Figura 30. Consumo específico real con el Excel del PX-Q300	47
Figura 31. Consumo específico real obtenido de Winflows.....	47

Índice de tablas

Tabla 1. Proceso iterativo del coeficiente de fricción para tubería de alimentación y captación.....	13
Tabla 2. Datos de la tubería de alimentación.....	13
Tabla 3. Datos de la tubería de captación.....	14
Tabla 4. Proceso iterativo del coeficiente de fricción para tubería de distribución.....	34
Tabla 5. Datos de la tubería de distribución.....	35
Tabla 6. Proceso iterativo del coeficiente de fricción para tubería de rechazo.....	44
Tabla 7. Consumos específicos de cada bomba de la planta.....	49

1. Introducción

El objetivo de este anexo es el dimensionado de los sistemas de la planta de desalación, ya que en el anexo anterior se definió el bastidor de membranas y se supuso un consumo específico de la planta, no obstante, no sería el valor real de la instalación. Por ello, se debe realizar un estudio en cada uno de los sistemas que componen la planta: la captación y alimentación, el núcleo de desalación, la distribución y el rechazo de salmuera.

En el sistema de captación se establecerá un sistema que pueda suministrar el agua necesaria para la producción del agua de riego. Además, se seleccionará la bomba que se utilizará para transportar el agua hasta la planta de desalación. Por lo tanto, las pérdidas de carga que ocurren tanto en el tramo de captación como en el de alimentación quedarán reflejadas, así como sus longitudes y diámetros.

El núcleo de desalación se estudiará de nuevo para obtener los valores reales del sistema. Las bombas de alta presión y la booster quedarán definidas del mismo modo que sus consumos específicos. Este valor real se comparará tanto con el del anexo anterior como el obtenido por el software del distribuidor de membranas.

De igual manera, los sistemas de distribución y de rechazo se definirán tanto para el transporte del agua de producción al riego como para el transporte de la salmuera hasta una ubicación donde no afecte a la planta de desalación.

Asimismo, quedará especificado el proceso de postratamiento que se incluirá en el proceso de producción.

2. Dimensionado de los sistemas de captación

La instalación de desalación debe contar con un sistema de captación que satisfaga varios objetivos de nuestro sistema:

- Garantizar el caudal de agua de alimentación necesario.

- Minimizar la variación de sus características fisicoquímicas y biológicas, dado que cuanto más constantes sean, será más fácil el mantenimiento de la instalación.
- Garantizar el mínimo impacto físico y medio ambiental. En el caso de Canarias se debe tener en cuenta las zonas especiales de conservación y las zonas especiales de protección de aves, de igual forma que se realizó para establecer la ubicación de la planta.
- Garantizar el menor coste posible, sabiendo que la etapa de captación es una etapa determinante para el resto de procesos de la instalación de desalación.

Considerando las propuestas anteriores, se decide establecer como sistema de captación por tomas cerradas frente al de tomas abiertas, en concreto unos pozos cerrados que se colocarán junto a la instalación de desalación. Al ser una captación cerrada y aislada presenta una mayor limpieza que la captación abierta, ya que la propia agua pasa por un filtrado natural antes de ser captada con unos niveles bajos de turbidez (NTU) y de colmatación (SDI). Además, favorece a la ausencia de actividad biológica que pueda afectar a la vida útil de las membranas.

Por otro lado, este tipo de captación presenta una serie de aspectos que perjudican a la instalación de desalación, aunque no son muy relevantes como para desestimar su utilización. Al extraer el agua de captación mediante la excavación en una zona próxima a los cultivos de plataneras ésta puede estar sometida a pesticidas u otra medida de cuidado, por lo que variarían la composición del agua. Asimismo, la propia tierra del pozo aparte de que no permite una extracción muy abundante puede traer consigo varios minerales que no son beneficiosos para el agua de captación. Por ello, todas estas medidas deben ser cubiertas por un pretratamiento a la entrada de las membranas de la instalación.

2. 1. Dimensionado de los pozos cerrados de captación

Antes de realizar el estudio de los pozos cerrados de captación hay que tener en cuenta que para su correcta ubicación y dimensionamiento se debe hacer un análisis

especial para esta parte del proyecto. No obstante, debido al alcance limitado de este proyecto se omitirá este procedimiento y se supondrá que el terreno elegido como más próximo a la instalación y al mar es el más óptimo para su colocación.

El modo de establecer la cantidad de pozos necesarios para esta instalación de desalación es la comparación con otras existentes, y la bibliografía correspondiente. Según estas hipótesis para una captación de 2.000 m³/día se debe colocar un mínimo de 2 pozos de los cuales uno estará operativo y el otro como reserva, para posibles mantenimientos o paradas no previstas durante el proceso de operación. Por ello para esta instalación se ha decidido colocar 3 pozos en total: 2 operativos y 1 en reserva. El motivo principal para esta distribución es para evitar que la instalación sea suministrada por una única bomba con el caudal total de captación. De esta forma el sistema de captación no se vería saturado y estaría prevenido de este tipo de averías.

La disposición de los pozos cerrados de captación como se puede observar en la Figura 1 se encuentran cada uno de ellos a 20 metros del punto colector para asegurar una distancia de seguridad entre ellos, además de ser una disposición constructiva simple. La longitud desde el punto colector hasta la planta de desalación es de 40 metros.

El caudal de captación que deben suministrar los pozos está directamente relacionado con el caudal de captación y el porcentaje de conversión del bastidor de membranas seleccionado, en este caso del 45%. Este valor se puede calcular con la siguiente relación o directamente del software de dimensionamiento:

$$Q_{captación} = 45\% \cdot Q_{alimentación}$$

Relación del caudal de captación y el caudal de alimentación

El caudal de alimentación total se debe dividir entre dos ya que es el número de pozos activos de la instalación de desalación. Por lo tanto de un total de 4444,44 m³/día pasa a ser 2222,22 m³/día por pozo. El tercer pozo no se tendría en cuenta en estos cálculos ya que su objetivo es trabajar cuando uno de estos dos pozos no se encuentre operativo debido a algún mantenimiento o avería no planeada.

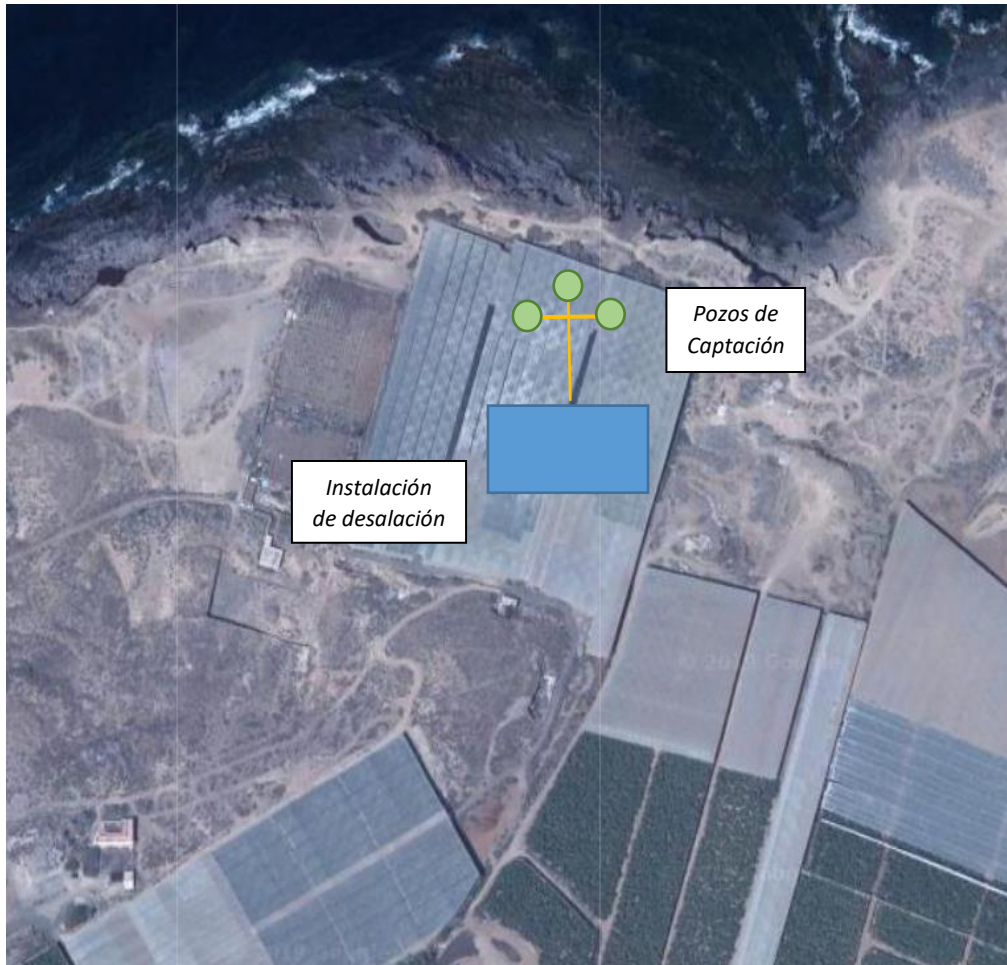


Figura 1. Diseño de establecimiento de pozos de captación

El siguiente cálculo sería la profundidad de los pozos para el cual se deben considerar varios aspectos:

- *La bajamar máxima.* Se recurre a la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado, un informe realizado por REDMAR en la estación de Tenerife que ofrece una estadística de bajamares y pleamares. Los datos fueron obtenidos desde el 2009 hasta el 2013 en Santa Cruz de Tenerife, por lo que se basarán los cálculos con dichos valores asumiendo una diferencia con la medida real. El valor que interesa sería la bajamar máxima extraída de la Figura 2 siendo 1,40 metros.

Estadística Bajamares		Estadística Pleamares	
Mínima (m):	-0.03	Mínima (m):	1.58
Máxima (m):	1.40	Máxima (m):	3.05
Media (m):	0.74	Media (m):	2.26
Desv.Est. (m):	0.24	Desv.Est. (m):	0.25
Moda (m):	0.72	Moda (m):	2.32
Mediana (m):	0.74	Mediana (m):	2.27
Sesgo:	0.02	Sesgo:	0.11
Curtosis:	-0.57	Curtosis:	-0.59

Figura 2. Estadística de bajamares y pleamares (Fuente: Puertos del Estado)

- *La altura máxima de los pozos sobre el nivel del mar.* Este valor se obtiene mediante la herramienta de Goolzoom que permite realizar análisis y estudios de información territorial, en este caso se consultará la altura del terreno donde se situarán los pozos. El terreno escogido presenta una gran pendiente y varía entre los 15 y 20 metros de altura, por lo que se aproximará a 17 metros como altura máxima de los pozos sobre el nivel del mar.

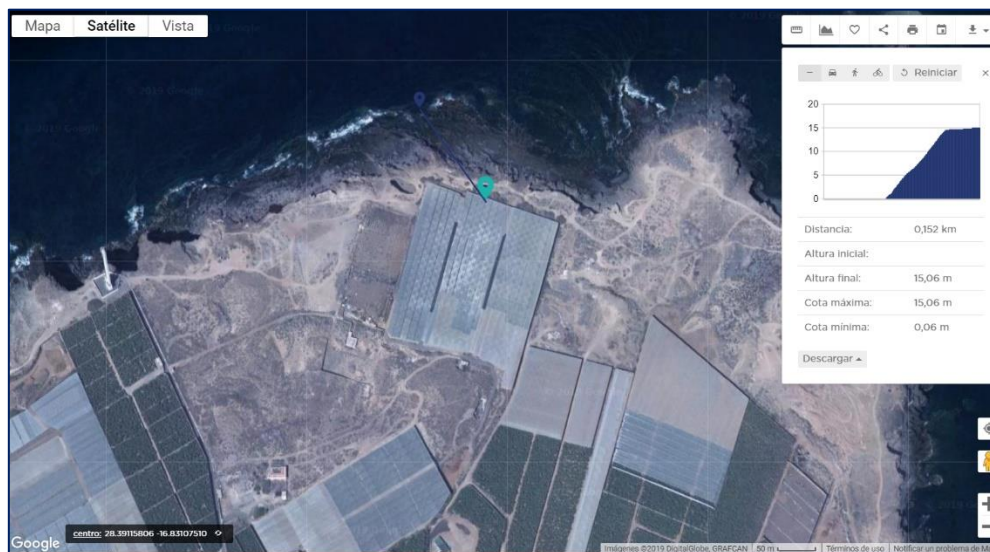


Figura 3. Análisis de la altura del terreno (Fuente: Goolzoom)

- *Las pérdidas de carga por filtración de la tierra.* Se considera 1 metro.
- *Las pérdidas de carga por el cono de succión,* cuando la bomba aspira agua del pozo. Se considera 1 metro.

Tras haber realizado el estudio de los parámetros que afectan a la profundidad de los pozos de captación se suman obteniéndose la altura mínima a la que se deben colocar que sería de 20,4 metros. Por ello, se establecerá una profundidad mucho mayor permitiendo un margen de seguridad que permita a las bombas de captación encontrarse sumergidas en todo momento. La profundidad elegida es de 30 metros y las bombas se encontrarán a 28 metros, que serían aproximadamente a 7 metros por debajo del límite de superficie del agua.

2. 2. Dimensionado de las tuberías de captación y de alimentación

Las tuberías de captación y alimentación para su dimensionado se debe establecer su material, longitudes y diámetros, ya que en apartados posteriores se estudiarán sus pérdidas de carga que afectarán a la instalación de desalación.

En cuanto a las longitudes se ha establecido una profundidad hasta la bomba de captación de 28 metros y desde la superficie hasta el punto colector habría una distancia de 20 metros, por lo que la suma de ambas sería la longitud total de tubería, 48 metros. Por otro lado, cabe destacar que la diferencia de altura sólo serían los 28 metros ya que a partir de ahí se considera que la tubería es completamente horizontal.

Los diámetros de las tuberías dependen directamente del material seleccionado, debido a que según el fabricante se establecen diferentes diámetros nominales. Asimismo, se selecciona el material previamente atendiendo a las propiedades que ofrece cada uno.

Los sistemas de transporte de fluidos, principalmente de agua, están continuamente sometidos a requisitos más estrictos ya que de ellos depende el bienestar de la sociedad actual. Entre todos los posibles plásticos que presentan compatibilidad con la instalación se decide que el material seleccionado sea el poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) para las diferentes aplicaciones de la planta.

Las características que presenta este material son las siguientes:

- *Resistencia a la corrosión.* Así que no son necesarios revestimientos, recubrimientos, protección catódica u otros medios. Por lo tanto, disponen de una larga vida útil y sus propiedades hidráulicas permanecen constantes con el paso del tiempo.
- *Alta resistencia mecánica.* Los tubos presentan resistencia a altas presiones, a la abrasión, entre otros. Se trata de un plástico termoestable.
- *Superficie interior lisa.* Las pérdidas por rozamiento son bajas por lo que supone una menor exigencia de energía de bombeo y unos menores costes operativos. Además, se acumula una menor cantidad de suciedad por lo que reduce tiempos de mantenimiento.
- *Ligereza.* El coste sería menor para su transporte, instalación y los equipos de su manipulación.
- *Uniones de precisión,* diseñadas para eliminar infiltraciones y exfiltraciones.
- *Diversidad de accesorios.* Permite el diseño específico y particular según el caso que lo requiera, así como una gran variedad de accesorios.
- *Conexiones con otros materiales,* ya sea para rehabilitaciones, reparaciones o sustituciones de tubos en mal estado.

Los tubos de PRFV se clasifican según las normas UNE-EN 1796 y UNE-EN 14364, en su diámetro nominal y serie, su rigidez nominal, su presión nominal y su tipo de unión. En el caso de la instalación de desalación se prestará más atención a sus dimensiones cuyos diámetros van desde 100 hasta 3.000 milímetros incluso hasta 4.000 milímetros bajo pedido, y las longitudes estándar son de 6 y 12 metros.

Teniendo en cuenta este último parámetro la longitud del tramo de captación será de 30 metros, debido a que con esas longitudes estándar no se podría realizar el primer valor propuesto. Por otro lado, la tubería horizontal desde la salida de los pozos hasta el punto colector también se debe modificar hasta un valor de 18 metros. Asimismo, la longitud total de la tubería de captación sería de 48 metros.

El fabricante seleccionado es la empresa Flowtite, que es distribuidor en España por la empresa Amiblu, debido a la amplia gama de productos que ofrece sobre las tuberías de PRFV. Los diámetros nominales que presenta este proveedor son de 80 a

3.000 milímetros, e incluso puede llegar a los 4.000 milímetros bajo pedido. Asimismo, esto permite una gran posibilidad dependiendo de las características de la planta, no obstante, para esta instalación se utilizarán los diámetros ofrecidos por el proveedor.

100 · 150 · 200 · 250 · 300 · 350 · 400 · 450 · 500
600 · 700 · 800 · 900 · 1000 · 1200 · 1400
1600 · 1800 · 2000 · 2400 · 2600 · 2800 · 3000

Figura 4. Diámetros nominales de las tuberías (Fuente: Flowtite)

Una vez fijados los diámetros nominales que ofrece Flowtite, se procede al cálculo de los diámetros de las tuberías de captación con una longitud total de 48 metros. Para ello se debe tener en cuenta unas velocidades límite aconsejadas, la velocidad mínima debe ser de 0,6 m/s, mientras que la máxima se calcula con el criterio de Bonnet que permite fijando la velocidad a $V = 2 \cdot \sqrt{D}$ calcular el diámetro mínimo que tendría la tubería para aproximarlos al nominal, siempre que los diámetros sean mayores de 150 milímetros.

$$D_{\text{mín}} = 0,835 \cdot \sqrt[5]{Q^2}$$

Criterio de Bonnet

Este cálculo depende directamente del caudal que pasa a través, en este caso sería el caudal de agua de captación que entra al sistema por cada una de las tuberías. El valor de dicho caudal, calculado anteriormente, es de 2.222,22 m³/día que equivaldría a 0,0257 m³/seg. Por otro lado para el caudal de alimentación de 4.444,44 m³/día serían 0,0514 m³/seg. Asimismo se determina los valores de diámetros mínimos para cada uno de los caudales:

$$D_{\text{mín,alimentación}} = 0,835 \cdot \sqrt[5]{0,0514^2} = 0,255 \text{ metros}$$

$$D_{\text{mín,captación}} = 0,835 \cdot \sqrt[5]{0,0257^2} = 0,193 \text{ metros}$$

Como se puede observar cumple el criterio de Bonnet por lo que son aplicables a la instalación, no obstante, antes se deben seleccionar los diámetros nominales del proveedor que den ser superiores ya que los calculados son los valores mínimos para dichos casos:

$$D_{n,alimentación} = 300 \text{ mm}$$

$$D_{n,captación} = 200 \text{ mm}$$

2. 3. Selección de bombas de captación

Las bombas de captación constan de un total de tres de ellas, una por cada pozo de la instalación. En la selección se calculará únicamente una, ya que las otras dos serían iguales debido a que la longitud de las tuberías, pérdidas de carga y caudales son idénticos.

Lo primero que se realizará será un balance de energía del sistema de captación del caso más desfavorable. Los dos puntos seleccionados para el estudio serían el punto 1 que se establece al mínimo nivel de agua de mar calculado y el punto 2 que se fija a la entrada de la planta pasando por el colector, es decir, la entrada de la bomba de alta presión. Una vez pasado el punto del colector el caudal aumentaría el doble, aunque hay que tener en consideración que trabajarían ambas bombas a partir de dicho tramo.

Se tendrá en cuenta la hipótesis para la correcta realización del estudio de que el sistema se encuentra en régimen estacionario, por lo tanto el balance de energía despejando la altura de la bomba quedaría de la siguiente forma:

$$H_B = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \Sigma H_r$$

Balance de energía para una bomba hidráulica

Una vez definidos los estados, obtenemos los datos del anexo anterior del recuperador de energía seleccionado, el PX-Q300. Por lo que se definen los siguientes parámetros conocidos:

$p_2 = 4 \text{ bar}$. Según el anexo anterior la entrada de la bomba de alta presión se encuentra a 2 bar, a lo que se sumará las pérdidas de carga en el pretratamiento que también son de 2 bar.

$p_1 = 0 \text{ bar}$. Este valor equivale a la presión que habría en los pozos cerrados.

$v_1 \cong 0$. Se aproxima a cero debido a que se toma la velocidad del nivel de agua en el pozo, que al ser despreciable no se tiene en cuenta para dicho cálculo.

Por lo tanto hay que calcular la velocidad del fluido a la entrada de la bomba de alta presión y las pérdidas de carga totales que se encuentran tanto en el tramo de captación como en el de alimentación con los accesorios correspondientes.

La velocidad del fluido la obtengo de la relación con el caudal y el área de la tubería en este caso se calcula para la de captación y la de alimentación:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

Ecuación de la velocidad de un flujo hidráulico

$$v_{\text{alimentación}} = \frac{0,0514}{\pi \cdot \left(\frac{0,3}{2}\right)^2} = 0,728 \text{ m/seg}$$

$$v_{\text{captación}} = \frac{0,0257}{\pi \cdot \left(\frac{0,2}{2}\right)^2} = 0,819 \text{ m/seg}$$

De los resultados anteriores se obtiene el valor de $v_2 = 0,728 \text{ m/seg}$ que correspondería a la velocidad del flujo a la entrada de la bomba de alta presión.

Lo siguiente a calcular serían las pérdidas de carga en las tuberías de captación y en las de alimentación. Para ello se supondrá la misma hipótesis inicial de régimen estacionario, y se emplearán las siguientes ecuaciones obtenidas de la asignatura de Ingeniería Fluidomecánica y la bibliografía señalada:

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

Ecuación de Darcy-Weisbach

Donde se pueden definir los parámetros de la fórmula: la f es el coeficiente de fricción, L es la longitud de la tubería y D su diámetro, v es la velocidad del flujo ya calculada y la g es la aceleración de la gravedad que se supondrá un valor de $9,81 \text{ m/s}^2$.

Para el cálculo del coeficiente de fricción f la ecuación que se utilizará será la de Colebrook-White si se encuentra el fluido en régimen turbulento, que se define como:

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

Ecuación de Colebrook-White

Donde se define el parámetro k es la rugosidad de la tubería según el material utilizado, en este caso tiene un valor de $0,029$ milímetros. Por otro lado, Re es el número de Reynolds, que es adimensional y caracteriza si el fluido sigue un régimen laminar, mixto o turbulento. Se define con la siguiente fórmula:

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

Ecuación del número de Reynolds

Donde ν es la viscosidad cinemática del fluido del agua que viene definida según su temperatura. El valor se ha extraído directamente de la tabla de las propiedades físicas del agua de la bibliografía señalada, cuyo valor para una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ es de

$1,003 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$. Destacar que el valor no sería exacto ya que para el agua de mar tendría una pequeña variación, pero al no ser sustancial se realizará el estudio con dicha aproximación.

TABLA 4. Propiedades físicas del agua a 1 bar

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

Figura 5. Tabla de propiedades físicas del agua

Asimismo, se calcula el número de Reynolds tanto para las tuberías de captación como para la de alimentación:

$$Re_{\text{alimentación}} = \frac{4 \cdot 0,0514 \left(\text{m}^3/\text{s} \right)}{\pi \cdot 0,3(\text{m}) \cdot 1,003 \cdot 10^{-6} \left(\text{m}^2/\text{s} \right)} = 217.666,32$$

$$Re_{\text{captación}} = \frac{4 \cdot 0,0257 \left(\text{m}^3/\text{s} \right)}{\pi \cdot 0,2(\text{m}) \cdot 1,003 \cdot 10^{-6} \left(\text{m}^2/\text{s} \right)} = 163.249,74$$

Al ser el número de Reynolds mayor a 4.000 se establece según el criterio de la bibliografía consultada que ambos casos se encuentran en régimen turbulento. Por lo tanto, se puede emplear la ecuación de Colebrook-White para el cálculo del coeficiente de fricción f . Como se puede observar la fórmula no permite la obtención directa del parámetro por lo que se realizará una iteración tomando como valor inicial 0,015 hasta

que no presente una variación considerable. En la siguiente tabla se muestra el proceso de iteración a partir de los datos obtenidos:

Tabla 1. Proceso iterativo del coeficiente de fricción para tubería de alimentación y captación

Tramo de Tubería	D (mm)	k (mm)	f ₁	f ₂	f ₃
Alimentación	300	0.029	0.0163	0.0162	0.0162
Captación	200	0.029	0.0175	0.0172	0.0173

(Fuente: Elaboración Propia)

Una vez calculado todos los parámetros se puede realizar el estudio de las pérdidas de carga primarias a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach para ambos tramos de tubería:

$$H_{r,primarias,alimentación} = 0,0162 \cdot \frac{40(m)}{0,3(m)} \cdot \frac{0,728^2 \left(\frac{m^2}{s^2}\right)}{2 \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right)} = 0,058 \text{ m}$$

$$H_{r,primarias,captación} = 0,0173 \cdot \frac{48(m)}{0,2(m)} \cdot \frac{0,819^2 \left(\frac{m^2}{s^2}\right)}{2 \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right)} = 0,142 \text{ m}$$

En las siguientes tablas se colocan los valores que se definirán para cada uno de los tramos de las tuberías:

Tabla 2. Datos de la tubería de alimentación

Caudal (m ³ /seg)	0,0514
Diámetro (mm)	300
Longitud (m)	40
Velocidad (m/seg)	0,728

Viscosidad cinemática (m^2/seg)	$1,003 \cdot 10^{-6}$
Número de Reynolds	217.666,32
Rugosidad (mm)	0,029
Coefficiente de fricción	0,0162
Pérdidas de carga (m)	0,058

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 3. Datos de la tubería de captación

Caudal (m^3/seg)	0,0257
Diámetro (mm)	200
Longitud (m)	48
Velocidad (m/seg)	0,819
Viscosidad cinemática (m^2/seg)	$1,003 \cdot 10^{-6}$
Número de Reynolds	163.249,74
Rugosidad (mm)	0,029
Coefficiente de fricción	0,0173
Pérdidas de carga (m)	0,142

(Fuente: Elaboración Propia)

A parte de estas pérdidas de cargas hay otras denominadas secundarias que hay que tener en cuenta producidas por los accesorios que van colocados tanto en el tramo de captación como en el de alimentación. En ellos se debe tener en cuenta un codo de 90°, que se coloca para variar el flujo de vertical a horizontal en la captación, y un empalme en T normal, que sirve para unir los tramos de captación al de alimentación. Asimismo, se hará uso de la siguiente ecuación:

$$H_{r,accesorios} = k \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación de pérdidas de carga en accesorios

Donde aparece otro parámetro k que es un coeficiente que depende del accesorio que se vaya a colocar. La empresa proveedora de las tuberías de la instalación no ofrece valor por lo que se sacará de la bibliografía consultada. El empalme en T normal tendrá un coeficiente de 1,8 mientras que para el codo a 90° será de 0,9.

$$H_{r,accesorios,alimentación} = 1,8 \cdot \frac{0,728^2 \left(\frac{m^2}{s^2} \right)}{2 \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2} \right)} = 0,049 \text{ m}$$

$$H_{r,accesorios,captación} = 0,9 \cdot \frac{0,819^2 \left(\frac{m^2}{s^2} \right)}{2 \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2} \right)} = 0,024 \text{ m}$$

Como podemos observar los valores de las pérdidas de carga de los accesorios influyen considerablemente en ambos casos ya que se consideran aproximadamente la mitad de las primarias. El total de dichas pérdidas de carga sería de 0,073 m.

Una vez calculados todos los parámetros necesarios para la resolución del balance de energía planteado, se puede obtener el valor de la altura de la bomba de captación necesaria para la instalación.

$$H_B = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \Sigma H_r$$

Sustitimos por los siguientes valores:

$$p_2 = 4 \text{ bar} = 40.000 \left(\frac{kg}{m^2} \right).$$

$$p_1 = 0 \text{ bar}.$$

$$\rho = 998,2 \left(\frac{kg}{m^3} \right). \text{ Valor aproximado para una temperatura de } 20^\circ \text{ C.}$$

$$g = 9,81 \left(\frac{m}{s^2} \right).$$

$$z_2 = 0 \text{ m.}$$

$$z_1 = -30 \text{ m.}$$

$$v_1 \cong 0.$$

$$v_2 = 0,728 \text{ (m/seg).}$$

$$\Sigma H_r = 0,058 + 0,142 + 0,073 = 0,273 \text{ m.}$$

$$H_B = 34,38 \text{ m}$$

Antes de la selección de las bombas de captación se debe atender a un parámetro importante que es la cavitación, se debe comprobar si ocurre según la altura mínima de aspiración facilitada por el fabricante como $NPSH_r$. Este fenómeno ocurre si dicha altura es igual o mayor a la altura neta de aspiración disponible conocida como $NPSH_d$. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$NPSH_d = \frac{p_a - p_v}{\gamma} + z_a - H_{ra}$$

Ecuación de la altura de aspiración disponible

Donde aparecen varios parámetros a definir: p_a es la presión atmosférica en el tramo de aspiración de la bomba, p_v es la presión del agua a una temperatura de 20° C, z_a es la altura que hay entre la tubería de alimentación de la bomba y su boca de entrada, y H_{ra} que son las pérdidas de carga en dicho tramo. Por lo quedaría de la siguiente manera:

$$NPSH_d = \frac{101.325 \text{ Pa} - 2.339 \text{ Pa}}{998,2 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot 9,81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} + (-21 + 30) - 0 = 19,11 \text{ m}$$

Para la selección de las bombas de captación se deciden comparar varios fabricantes, teniendo en cuenta el punto de operación de la bomba con un caudal de 92,59 m³/h y una altura de 34,38 metros.

- *Grundfos*: es una de las empresas más importantes a nivel mundial de bombas y posee una amplia gama de productos. Por ello a partir de la herramienta de selección y dimensionamiento online (*Grundfos Product Center*) que ofrece el fabricante se pueden observar varias bombas que cumplen para el tramo de captación. Para su búsqueda se a dimensionado por su aplicación, seleccionando el suministro de agua subterránea.

Los modelos que propone son las bombas de gama SP, las cuales son sumergibles y presentan una alta eficiencia y una alta resistencia a la corrosión. Entre ellos las recomendaciones son la SP 95-3, la SP 77-4 o la SP 125-2-A. Se decide seleccionar el primero de ellos ya que muestra el mayor rendimiento del 73,7%, y la potencia que consume la bomba es de 13 kW. Se debe tener en cuenta que para el estudio de esta planta de deslación no se realizará un estudio de los costes por lo que se omitirá este parámetro en la elección.



Figura 6. Bomba Grundfos SP 95-3 – 19001903 (Fuente: Grundfos)

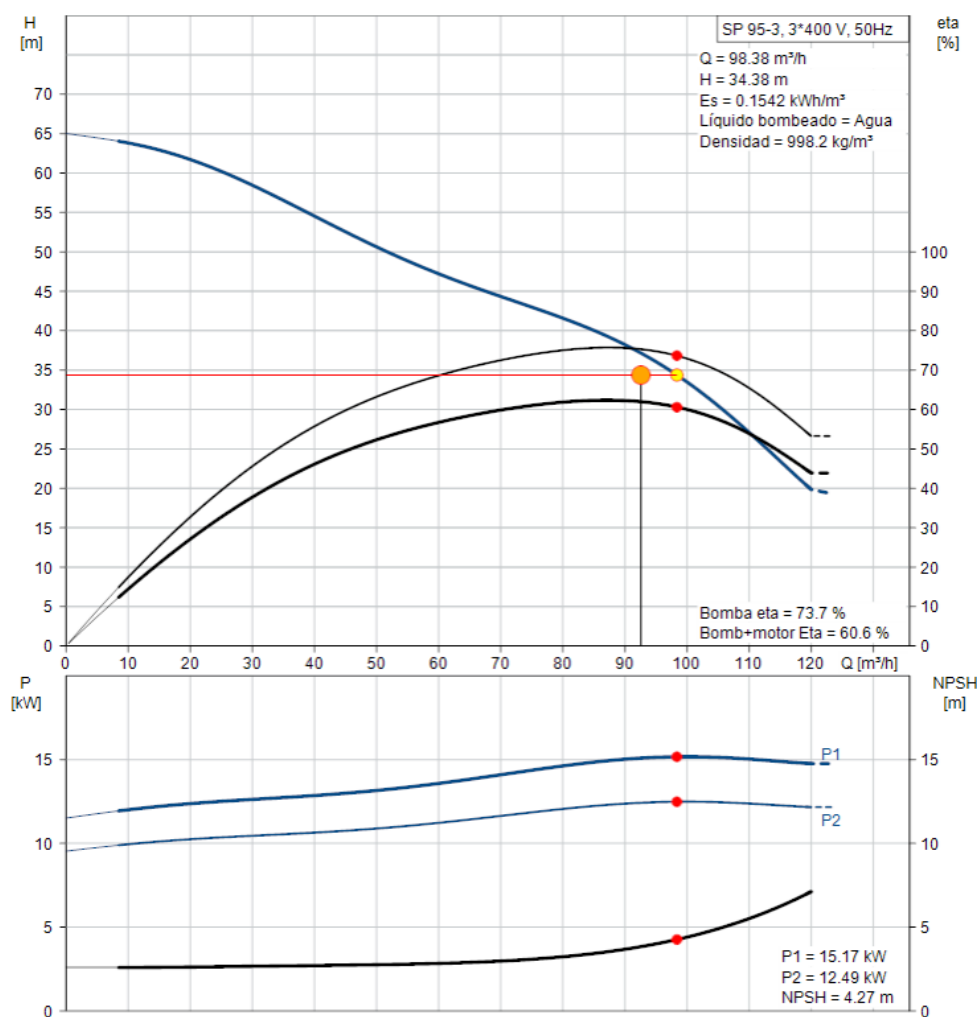


Figura 7. Curvas de la bomba de Grundfos SP 95-3 – 19001903 (Fuente: Grundfos)

- **KSB**: es uno de los mayores productores de bombas y ofrecen varios modelos para el suministro de agua en industrias. La empresa al igual que la anterior ofrece una herramienta para el estudio de selección de la bomba. Se ha obtenido por seleccionar la gama de UPA que son bombas sumergibles para su utilización de abastecimiento en pozos. Para la selección de un producto se ha decidido optar por el que mejor eficiencia ofrezca siendo éste la UPA 200B-80. No obstante este modelo es bastante parecido al UPAB 250C-120 pero sus parámetros son ligeramente peores. Las características más destacables del modelo seleccionado son una eficiencia del 77,28% y una potencia absorbida de 11,49 kW.



Figura 8. Bomba sumergible KSB de la serie UPA (Fuente: KSB)

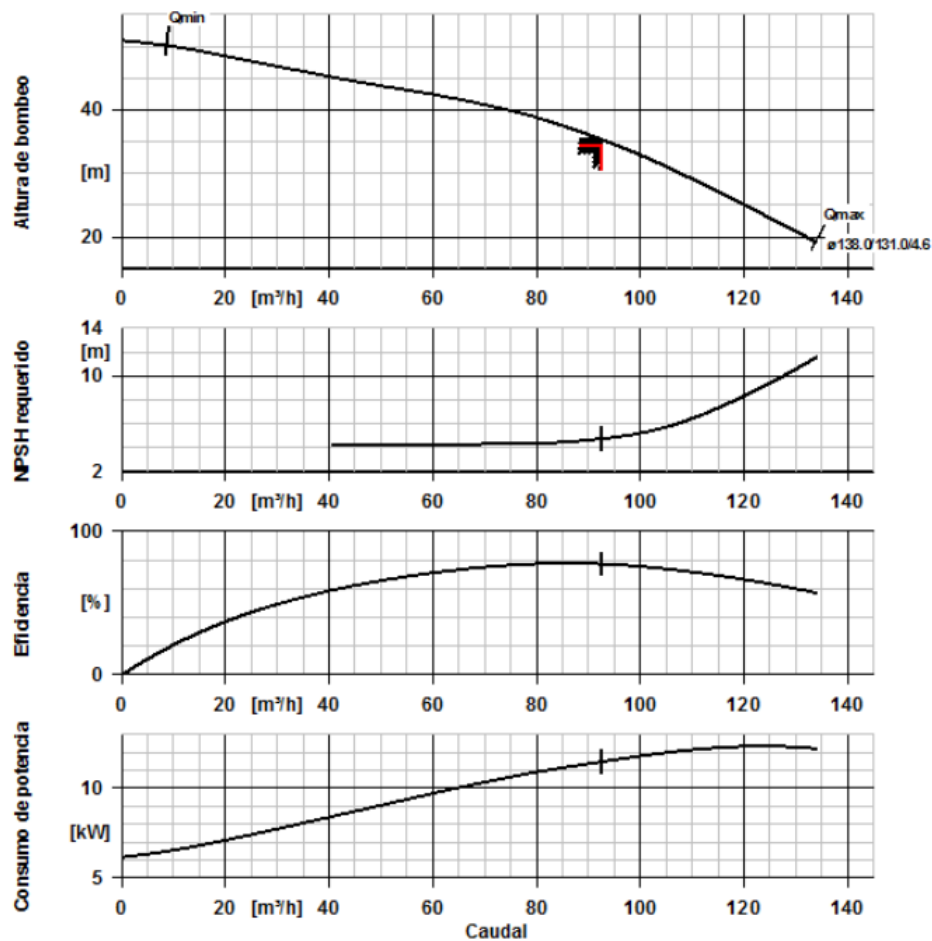


Figura 9. Curvas de la bomba KSB de la serie UPA modelo 200B-80 (Fuente: KSB)

- *Lowara*: es una empresa especializada en la fabricación de bombas sumergibles y de superficie. En comparación a los otros fabricantes ésta ofrece una amplia gama de modelos para este sector de la industria, como pueden ser las series Z6, ZN6, Z8, ZR8, Z10, Z12, entre otros. El modelo seleccionado como posible bomba de captación es

el Z875 02-L6W. Sus características son un rendimiento del 77,3% y una potencia absorbida de 10,6 kW. Sin embargo, el punto óptimo que ofrece esta bomba sería menor al que se requiere en la instalación, tanto el caudal como la altura son diferentes. Asimismo el valor del rendimiento cambiaría al igual que la potencia, sin embargo, la altura de la bomba no sería suficiente.



Figura 10. Bomba Lowara serie Z8(Fuente: Lowara)

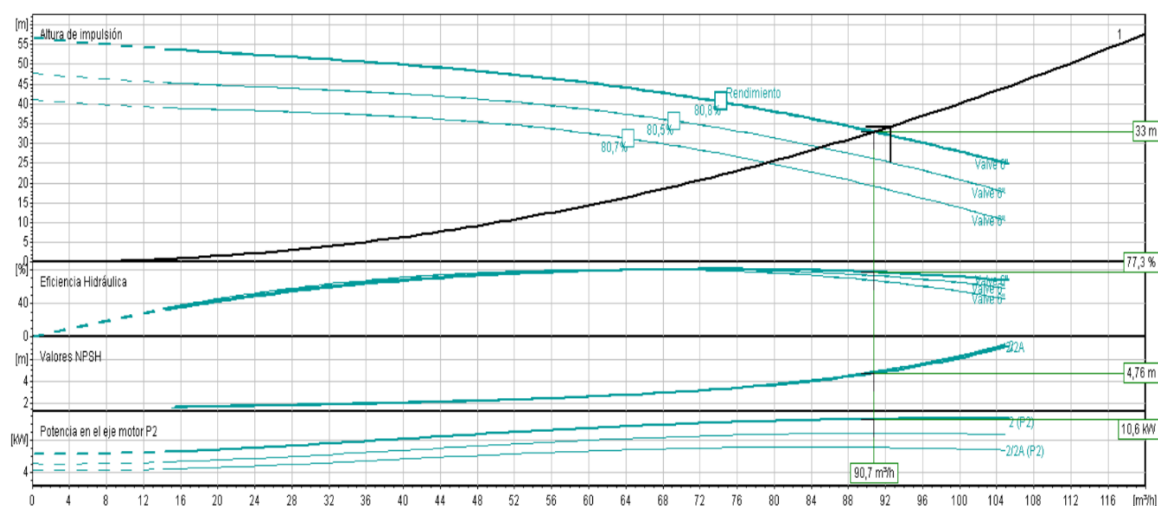


Figura 11. Curvas de la bomba Lowara modelo Z875 02-L6W (Fuente: Lowara)

Una vez obtenidas las eficiencias de las bombas de los fabricantes seleccionados se comparan entre ellas, observando que la diferencia entre la bomba del fabricante de KSB y la de Lowara es prácticamente nula. Ambas exigen un $NPSH_r$ por debajo del $NPSH_d$ por lo que no habría problemas de cavitación en ninguno de los casos. Otro parámetro destacable es la potencia absorbida en la que la serie Z8 consume aproximadamente 1 kW menos que la serie UPA. No obstante, se ha decidido optar por la bomba de KSB el modelo UPA 200B-80, ya que el caudal con el que trabajaría sería el óptimo para la planta de desalación.

3. Dimensionado de los sistemas del núcleo de desalación

El núcleo de desalación como se comentó en el anexo anterior está formado por el bastidor de membranas, el intercambiador de presión, la bomba de alta presión y la bomba booster, de los cuales queda por determinar los dos últimos. El consumo específico de este sistema quedará definido por ambas bombas, con una mayor influencia la bomba de alta presión debido a una mayor diferencia de presiones a la entrada y salida de la misma.

3.1. Selección de la bomba de alta presión

La selección de la bomba de alta presión se realizará siguiendo los mismos pasos que para las demás bombas. Los datos necesarios para el estudio se extraerán del sistema del recuperador de energía seleccionado por el fabricante Energy Recovery.

Lo primero que se realizará será un balance de energía entre un punto 1 establecido a la entrada de la bomba y un punto 2 a la entrada del bastidor de membranas. Hay que tener varias consideraciones respecto al balance de energía anterior para el cálculo de la altura de la bomba.

El balance anterior sería:

$$H_B = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \Sigma H_r$$

Se toman las siguientes consideraciones para el estudio de la altura de la bomba de alta presión:

- La diferencia de altura de cota se considera despreciable ya que no será un valor significativo para los cálculos.
- Las pérdidas de carga se consideran despreciables.
- La variación de velocidad del flujo se considera despreciable.

- $P_2 = 62,4 \text{ bar}$. La presión a la entrada del bastidor de membranas.
- $P_1 = 2 \text{ bar}$. La presión a la que llega el flujo desde la alimentación.

De esta forma se puede realizar el cálculo:

$$H_B = \frac{62,40 \cdot 10^5 \text{ Pa} - 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{998,2 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot 9,81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 616,81 \text{ m}$$

Antes de la selección de la bomba de alta presión se debe atender calcular la altura neta de aspiración disponible ($NPSH_d$). Tener en cuenta que para este estudio no varían las presiones ya que p_a sería la presión atmosférica y p_v sería la presión del agua a la temperatura de 20° C. Por otro lado, se supondrá condiciones similares al caso anterior: se desprecia la diferencia de altura cinética, las pérdidas de carga y la diferencia de velocidades del flujo. El estudio depende de la presión y quedaría de la siguiente manera:

$$NPSH_d = \frac{p_a - p_v}{\gamma} = \frac{101.325 \text{ Pa} - 2.339 \text{ Pa}}{998,2 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot 9,81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 10,11 \text{ m}$$

Una vez obtenido los parámetros para la selección de la bomba de alta presión se deciden comparar varios fabricantes para un caudal, que se extrajo de los resultados del recuperador de energía, de 84,3 m³/h.

- *Grundfos*: se decide comprobar en la herramienta proporcionada por el fabricante para comprobar si alguno de sus productos es válido, no obstante, no encuentra ningún producto que pueda realizar el trabajo requerido para la instalación de desalación.
- *KSB*: ocurre el mismo caso que para el fabricante anterior utilizando su herramienta de selección de bombas, aunque en éste da como resultado dos posibles modelos. El primero es la serie RPHb que al aceptar y seguir con el estudio no lo permite dando

error. Por otro lado, vuelve a ofrecer la serie UPA, pero el ser sumergible se descarta automáticamente.

- *Sulzer*: es una empresa especializada en soluciones de bombeo, la cual ha sido seleccionada debido a la dificultad de la obtención de datos para la bomba de alta presión. Esta empresa para la selección de bombas dispone de una herramienta que facilita varios modelos introduciendo el caudal y la altura que se establecen en la bomba. Entre ellos se descarta el modelo de bomba STJ, ya que su uso se especializa en pozos profundos, almacenamientos subterráneos artificiales o captaciones abiertas de líquidos. Por ello se ha seleccionado la serie MBN de la empresa Sulzer, el cual presenta uso para todas las necesidades de alta presión. La bomba que muestra mejores características es el modelo MBN50-215 con una eficiencia de 74,62% y una potencia de 189 kW.

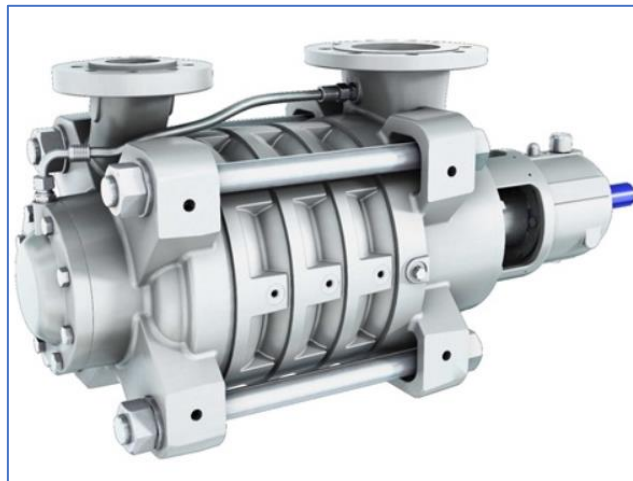


Figura 12. Bomba Sulzer serie MBN (Fuente: Sulzer)

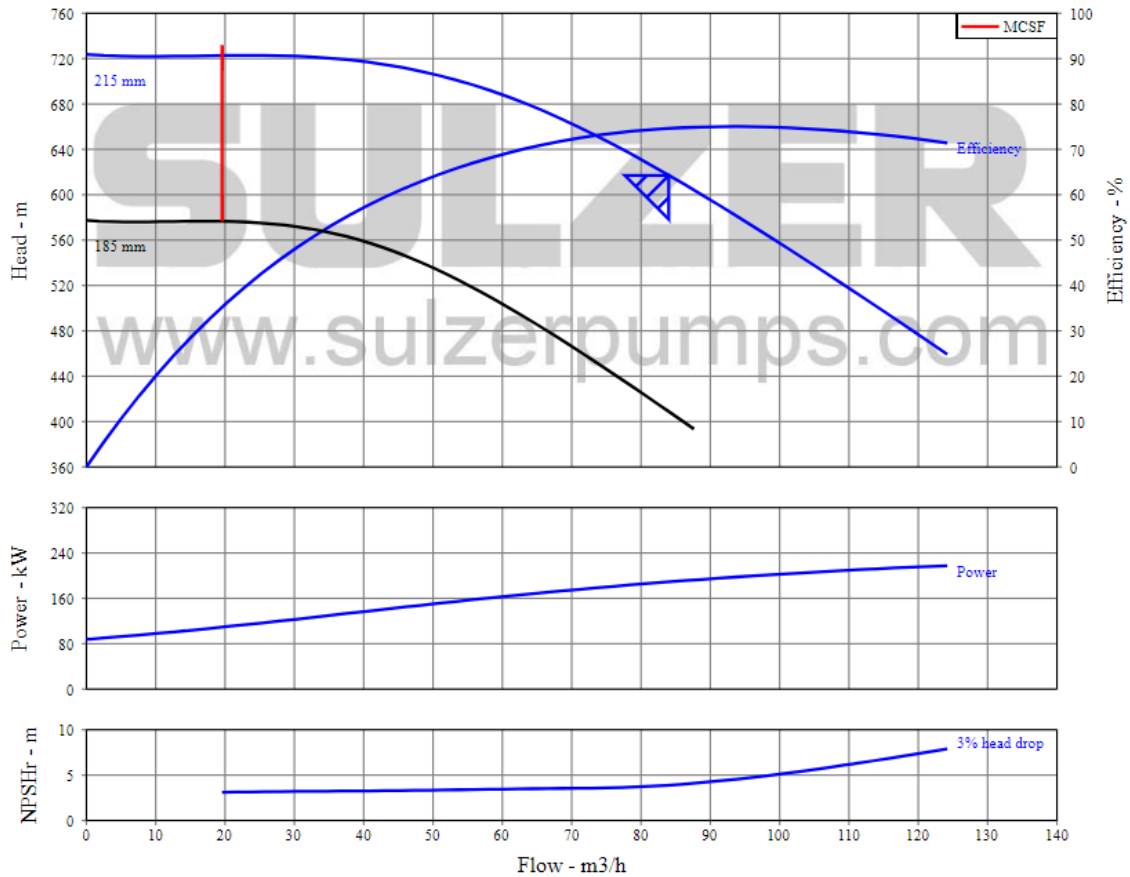


Figura 13. Curvas de la bomba Sulzer modelo MBN50-215 (Fuente: Sulzer)

- *Flowserve*: es otra de las empresas más reconocidas en el sector de la fabricación de bombas, la cual ofrece también una herramienta para la selección de sus productos (*Affinity*). Se ha recurrido a dicha empresa debido a que muchas de ellas no facilitan la información de una manera más sencilla como con las bombas anteriores. El producto ofrecido por dicha empresa es el modelo 3X10DMX-B de la serie DMX. Su rendimiento sería del 68% y la potencia eléctrica del motor sería de 250 kW.

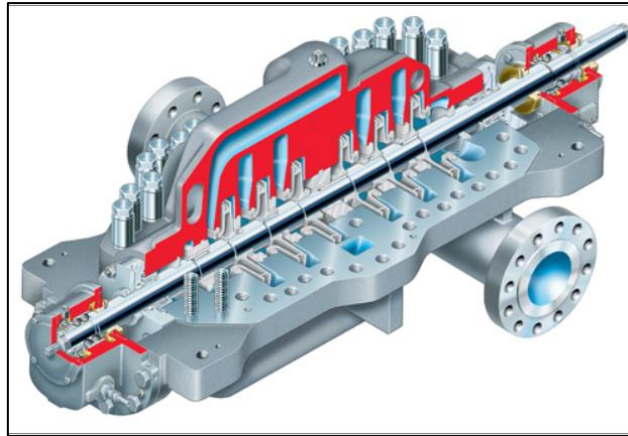


Figura 14. Bomba Flowserve serie DMX (Fuente: Flowserve)

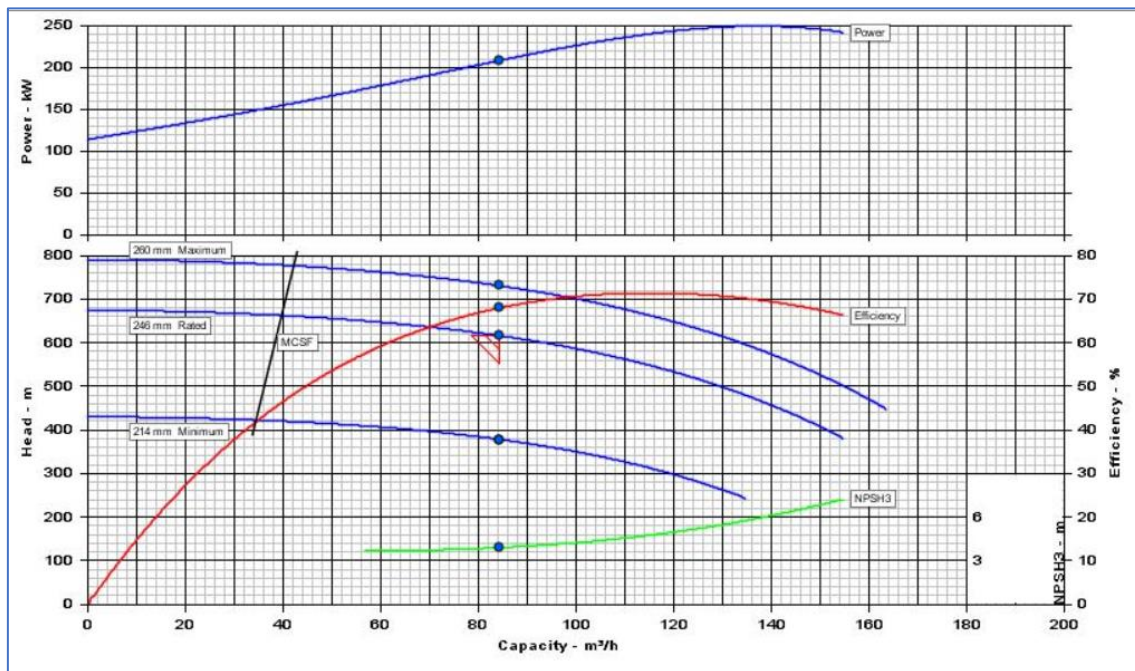


Figura 15. Curvas de la bomba Flowserve 3X10DMX-B (Fuente: Flowserve)

Entre las dos únicas empresas que disponen de una solución para la selección de la bomba de alta presión se decide elegir la bomba de Sulzer, ya que presenta una eficiencia mucho más alta para el sistema de la instalación. Asimismo, la bomba de alta presión será el modelo MBN50-215.

3.2. Selección de la bomba booster

La bomba booster a diferencia de las otras va a tener un menor consumo y una eficiencia mucho mayor, debido a que la diferencia de presiones y altura entre la entrada y salida será pequeña. Se utilizará la misma metodología que en apartados anteriores comenzando con el estudio del balance de energía entre la aspiración e impulsión de la bomba. Asimismo, los datos para este cálculo serán extraídos del sistema del recuperador de energía seleccionado por el fabricante Energy Recovery.

Se consideran mismas hipótesis que para la bomba de alta presión, quedando el cálculo de la altura de la bomba en el balance de energía de la siguiente forma:

$$H_B = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g}$$

Dejando los parámetros iguales de la aceleración de la gravedad y la densidad del fluido únicamente variará la diferencia de presiones con respecto al caso anterior. Se definen las presiones como la P_2 que es la presión de salida a 62,4 bar y la P_1 que es la presión de entrada a 60,8 bar. El resultado de la altura de la bomba sería:

$$H_B = \frac{62,40 \cdot 10^5 \text{ Pa} - 60,80 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{998,2 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot 9,81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} = 16,34 \text{ m}$$

Como se puede observar para este caso de la bomba booster no sería necesario el estudio del $NPSH_a$, ya que será un valor muy elevado debido a que las presiones de trabajo son mucho mayores a la presión de vapor del fluido.

La selección de la bomba booster se realiza con los datos calculados y con el caudal obtenido del recuperador de energía con un valor de 100,9 m³/h. Asimismo se realiza la comparación con los diferentes fabricantes.

- *Grundfos*: con ayuda de la herramienta de selección que proporciona el fabricante se da con ocho posibles bombas. Dos de ellas se descartan debido a que la altura de la bomba que presentan es de 16,33 m un valor menor al calculado, tanto el modelo NB 80-200/222 como el NBG 125-80-200/222. Para la selección de La bomba se ha

determinado como parámetro determinante la eficiencia. El modelo que presenta una eficiencia más alta de los restantes es el modelo NB 65-125/137 con un 83,7% y una potencia absorbida de 6,967 kW.



Figura 16. Bomba Grundfos modelo NB 65-125/137 (Fuente: Grundfos)

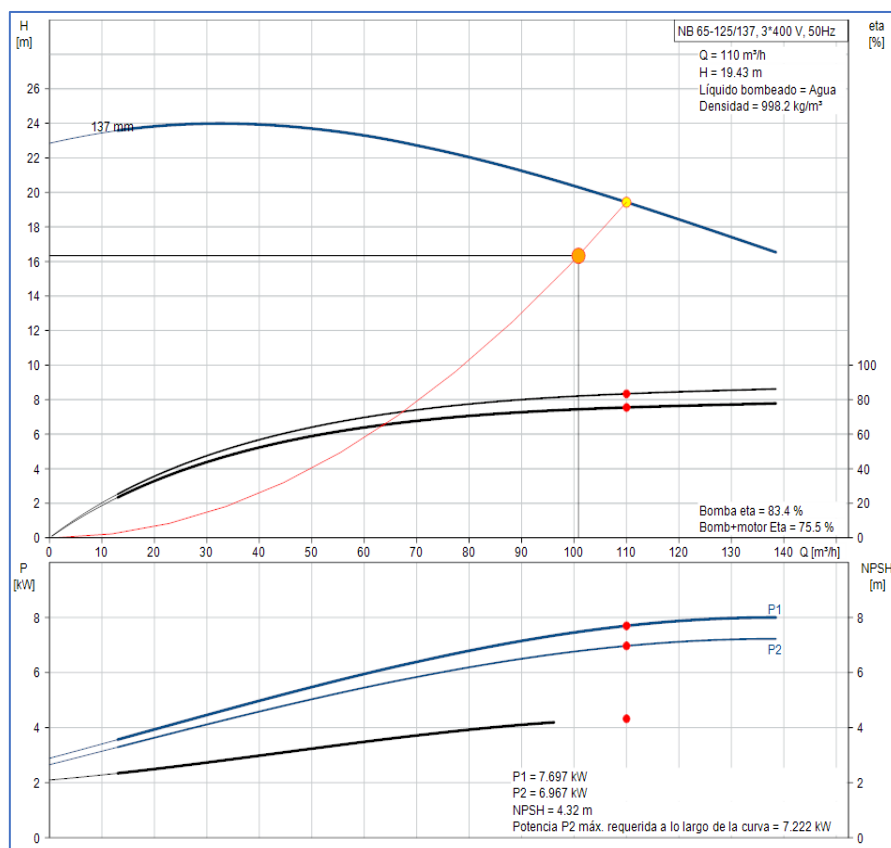


Figura 17. Curvas de la bomba Grundfos modelo NB 65-125/137 (Fuente: Grundfos)

- *KSB*: al igual que con el fabricante anterior dispone de una amplia gama de bombas para utilizar, no obstante, usando la misma metodología de descarte se selecciona el modelo que tenga una eficiencia más alta. La serie seleccionada es la Etanorm/Etabloc el modelo 080-065-125 con una eficiencia del 79,91%. Además, la potencia absorbida por dicha bomba es de 5,61 kW.



Figura 18. Bombas KSB serie Etanorm/Etabloc (Fuente: KSB)

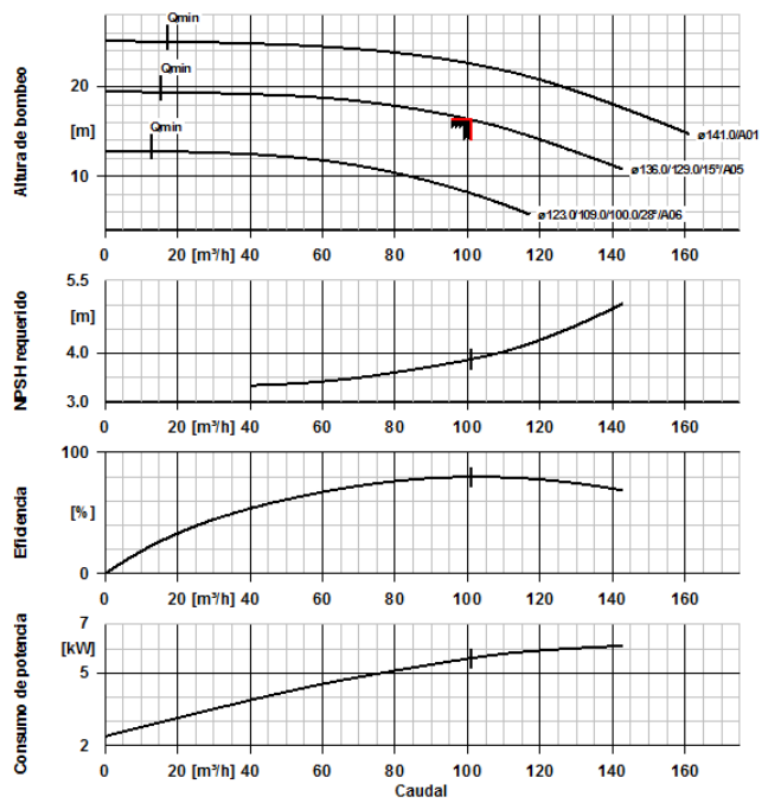


Figura 19. Curvas de la bomba KSB de la serie Etanorm/Etabloc 080-065-125 (Fuente: KSB)

- *Lowara*: en cuanto a las bombas que ofrece este fabricante se ha decidido optar por el modelo de bomba Lowara NSCF 80-250/75/P45VCC4. Sus características más notables es su eficiencia del 80,8% y su potencia absorbida de 5,96 kW.



Figura 20. Bomba Lowara NSCF 80-250/75/P45VCC4 (Fuente: Lowara)

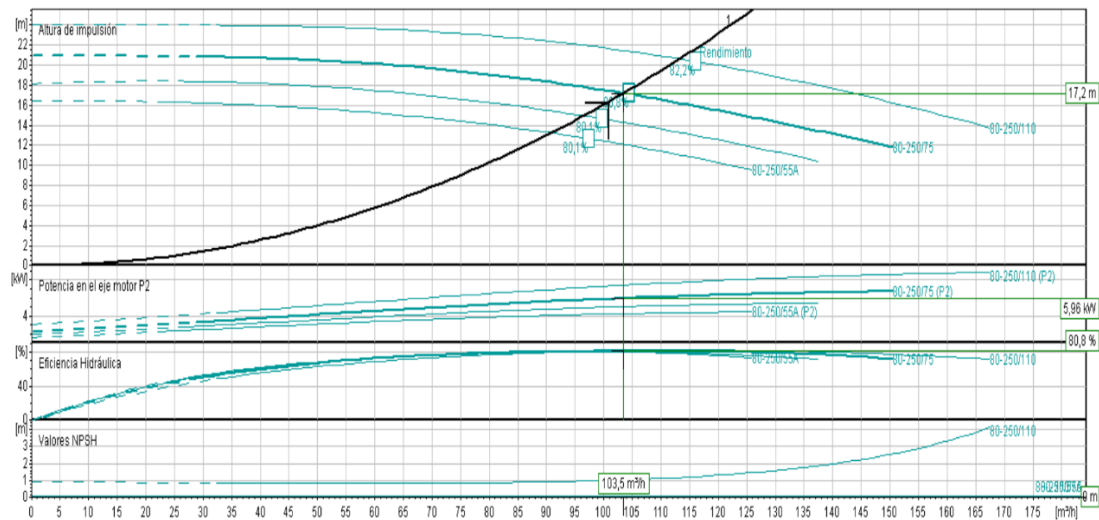


Figura 21. Curvas bomba Lowara NSCF 80-250/75/P45VCC4 (Fuente: Lowara)

Una vez obtenidas las eficiencias de las bombas de los fabricantes seleccionados se comparan entre ellas. Como se puede observar respecto a la eficiencia el mejor modelo es el del fabricante de Grundfos con un 83,7%, no obstante, la potencia absorbida se eleva hasta 6,967 kW. Asimismo, el modelo que presenta una menor potencia absorbida es el fabricante de KSB con 5,61 kW. En relación al criterio utilizado se selecciona el modelo NB 65-125/137 de la empresa Grundfos.

4. Dimensionado del sistema de distribución

El sistema de distribución como se propuso en el anexo anterior como solución a la distribución del agua de la planta desaladora la construcción de un depósito de 74000 m³, que permitiese el correcto abastecimiento del riego de plataneras en el municipio de Buenavista del Norte. El estudio se realizará sobre la tubería que saldría de la planta de desalación hasta el depósito.

4.1. Dimensionado de las tuberías de distribución

El diseño del depósito debido al alcance limitado del proyecto se omitirá, además de su procedimiento de cálculo y estudio, sin embargo, si se diseñarán las tuberías de este sistema de distribución. El depósito se ha decidido ubicar cercano a la planta de desalación debido a que el espacio del emplazamiento designado es bastante amplio. Como se puede observar en la Figura 20 la longitud total será de unos 320 metros y una diferencia de cota de 18 metros.

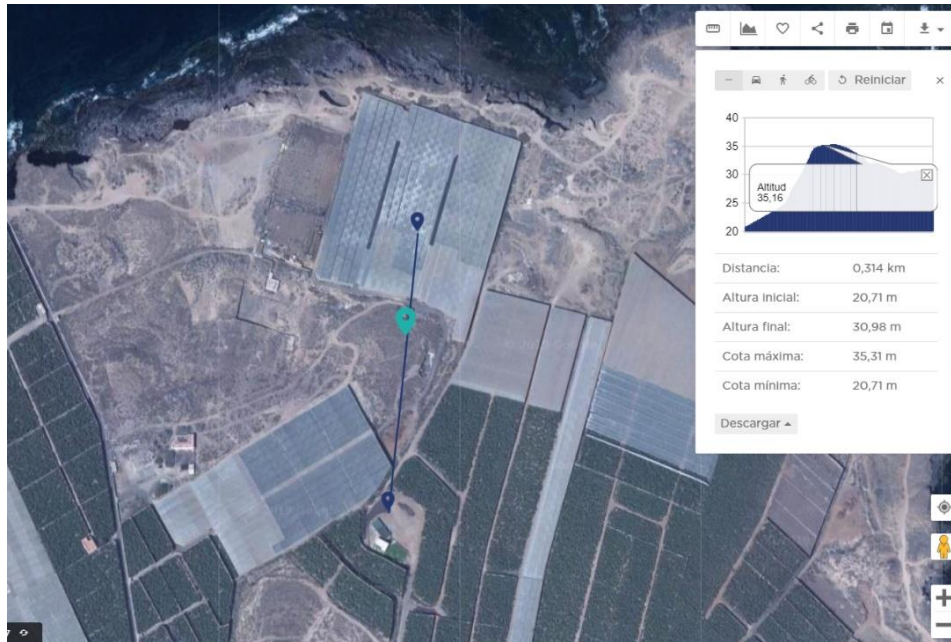


Figura 22. Altura del emplazamiento del depósito designado

El dimensionamiento de las tuberías de distribución se realizará con la misma metodología que para las tuberías de captación y de alimentación. El material utilizado será el mismo, el poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV).

El primer paso será el cálculo del diámetro nominal que tendrá la tubería de distribución a partir del caudal con un valor de $2000 \text{ m}^3/\text{día}$ que sería igual a $0,0231 \text{ m}^3/\text{seg}$. Para ello se aplicará el criterio de Bonnet obteniendo el siguiente resultado:

$$D_{\text{mín,distribución}} = 0,835 \cdot \sqrt[5]{Q^2} = 0,835 \cdot \sqrt[5]{0,0231^2} = 0,185 \text{ metros}$$

Como se puede observar cumple el criterio de Bonnet por lo que es aplicable a la instalación, no obstante, antes se debe seleccionar el diámetro nominal del proveedor que de un valor superior ya que el calculado es el valor mínimo para el caso de estudio siendo:

$$D_{n,\text{distribución}} = 200 \text{ mm}$$

4.2. Selección de bomba de distribución

La selección de la bomba de distribución, una vez calculado el diámetro de las tuberías, se puede estudiar realizando un balance de energía en el sistema completo. Éste se encuentra comprendido entre dos puntos, el 1 sería la salida de la bomba y de la planta de desalación, y el 2 correspondería a la superficie libre de líquido en el depósito. Se tendrá en cuenta la hipótesis para la correcta realización del estudio de que el sistema se encuentra en régimen estacionario, por lo tanto el balance de energía despejando la altura de la bomba quedaría de la siguiente forma:

$$H_B = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \Sigma H_r$$

Una vez definidos los estados, obtenemos los datos del anexo anterior del recuperador de energía seleccionado. Por lo que se definen los siguientes parámetros conocidos:

$p_2 = 0 \text{ bar}$. Esto se debe a que se encuentra en la superficie libre de líquido en el depósito que es abierto a la atmósfera.

$p_1 \cong 0 \text{ bar}$. No se tendrá en cuenta la variación de presión, ya que la distribución se realiza hacia un depósito abierto.

$\rho = 998,2 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$. Valor aproximado para una temperatura de 20° C .

$g = 9,81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$.

$z_2 = 35 \text{ m}$.

$z_1 = 17 \text{ m}$. Valor aproximado de la altura de la planta de desalación con respecto al nivel del mar.

$v_2 \cong 0$. Se aproxima a cero debido a que se trata de un depósito de gran tamaño la velocidad del nivel de flujo no es significativa.

Cabe destacar que diseño del depósito no se abarcaría en el alcance de este proyecto, por lo que se ha estudiado el sistema para que el flujo de permeado alcance la altura propia del terreno. De esta manera, el nivel de agua del depósito se encontraría a esa cota y para la estructura se debería realizar una excavación que permitiría el volumen total. Otra solución que se habría estudiado sería en lugar de disponer de un depósito, que el flujo de permeado se destruyera al embalse de la montaña de Taco, cercana a la planta de desalación. No obstante, se ha decidido la primera opción, ya que necesita un análisis menos complejo, y permite controlar la composición del agua productos para los cultivos.

Por lo tanto hay que calcular la velocidad del fluido a la salida de la bomba de distribución y las pérdidas de carga totales que se encuentran tanto en dicho tramo con los accesorios correspondientes. La velocidad del fluido la obtengo de la relación con el caudal y el área de la tubería para el tramo de distribución hasta el depósito abierto.

$$v_{distribución} = \frac{Q}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} = \frac{0,0231}{\pi \cdot \left(\frac{0,2}{2}\right)^2} = 0,735 \text{ m/seg}$$

Lo siguiente a calcular serían las pérdidas de carga en las tuberías de distribución. Para ello se supondrá la misma hipótesis inicial de régimen estacionario, y se emplearán las ecuaciones obtenidas de la asignatura de Ingeniería Fluidomecánica y la bibliografía señalada. Antes de aplicar la ecuación de Darcy-Weisbach es necesario el cálculo del coeficiente de fricción f , que depende del número de Reynolds por lo que se empezará el estudio desde este punto.

$$Re_{distribución} = \frac{4 \cdot 0,0231 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{\pi \cdot 0,2(m) \cdot 1,003 \cdot 10^{-6} \left(\frac{m^2}{s}\right)} = 146619,31$$

Al ser el número de Reynolds mayor a 4.000 se establece según el criterio de la bibliografía consultada que se encuentra en régimen turbulento. Por lo tanto, se puede emplear la ecuación de Colebrook-White para el cálculo del coeficiente de fricción f . Al

igual que en casos anteriores se realizará una iteración tomando como valor inicial 0,015 hasta que no presente una variación considerable. En la siguiente tabla se muestra el proceso de iteración a partir de los datos obtenidos:

Tabla 4. Proceso iterativo del coeficiente de fricción para tubería de distribución

Tramo de Tubería	D (mm)	k (mm)	f ₁	f ₂	f ₃
Distribución	200	0.029	0.0178	0.0175	0.0176

(Fuente: Elaboración Propia)

Una vez calculado todos los parámetros se puede realizar el estudio de las pérdidas de carga primarias a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach para el tramo de tuberías de distribución:

$$H_{r,primarias,distribución} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0176 \cdot \frac{320(m)}{0,2(m)} \cdot \frac{0,735^2 \left(\frac{m^2}{s^2}\right)}{2 \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right)} = 0,775 \text{ m}$$

Asimismo, se deben calcular las pérdidas de carga secundarias que corresponderían a los accesorios que se encuentran en este tramo de distribución. Se debe tener en cuenta dos codos de 90°, que se encontraran al final del tramo para su distribución hacia el depósito abierto. No se ha optado por la colocación de un mayor número de accesorios ya que como se comentó el propio diseño del depósito no abarcaría en este proyecto.

$$H_{r,accesorios,distribución} = k \cdot \frac{v^2}{2g} = 2 \cdot 0,9 \cdot \frac{0,735^2 \left(\frac{m^2}{s^2}\right)}{2 \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right)} = 0,05 \text{ m}$$

Como podemos observar los valores de las pérdidas de carga de los accesorios influyen en las pérdidas de carga primarias obteniendo un total de 0,825 m.

Una vez calculados todos los parámetros necesarios para la resolución del balance de energía planteado, se puede obtener el valor de la altura de la bomba de distribución. Para ello se definirá el tramo de tuberías del estudio:

Tabla 5. Datos de la tubería de distribución

Caudal (m^3/seg)	0,0231
Diámetro (mm)	200
Longitud (m)	320
Velocidad (m/seg)	0,735
Viscosidad cinemática (m^2/seg)	$1,003 \cdot 10^{-6}$
Número de Reynolds	146.619,31
Rugosidad (mm)	0,029
Coefficiente de fricción	0,0176
Pérdidas de carga TOTALES (m)	0,825

(Fuente: Elaboración Propia)

Aplicando el balance de energía propuesto, la altura de la bomba sería:

$$H_B = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \Sigma H_r =$$

$$= 0 + (35 - 17) + \frac{0^2 - 0,735^2 \left(\frac{m^2}{s^2}\right)}{2 \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right)} + 0,825 \text{ m}$$

$$H_B = 18,8 \text{ m}$$

Una vez obtenido la altura de la bomba se estudia debe la altura neta de aspiración disponible ($NPSH_d$). El cálculo se realizaría de igual manera que para la bomba de alta

presión. La diferencia de cotas y las pérdidas de carga se consideran despreciables, por lo que sería:

$$NPSH_d = \frac{p_a - p_v}{\gamma} = \frac{101.325 \text{ Pa} - 2.339 \text{ Pa}}{998,2 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot 9,81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 10,11 \text{ m}$$

La selección de la bomba de distribución se realiza con los datos calculados y con el caudal obtenido del recuperador de energía con un valor de 101,8 m³/h. Asimismo se realiza la comparación con los diferentes fabricantes.

- *Grundfos*: al colocar los datos de entrada en la herramienta de selección de bombas da como resultado una posibilidad de modelos. Entre todos ellos destacamos dos que presentan una eficiencia mucho más alta. Por un lado, el modelo NKE 65-125/137 presenta una eficiencia del 82,5%, no obstante, se decide optar por el modelo NK 65-125/137 con una eficiencia de 82,7% una diferencia bastante pequeña entre ambas opciones de bombas. Además, la potencia absorbida es de 6,866 kW.



Figura 23. Bomba Grundfos modelo NK 65-125/137 (Fuente: Grundfos)

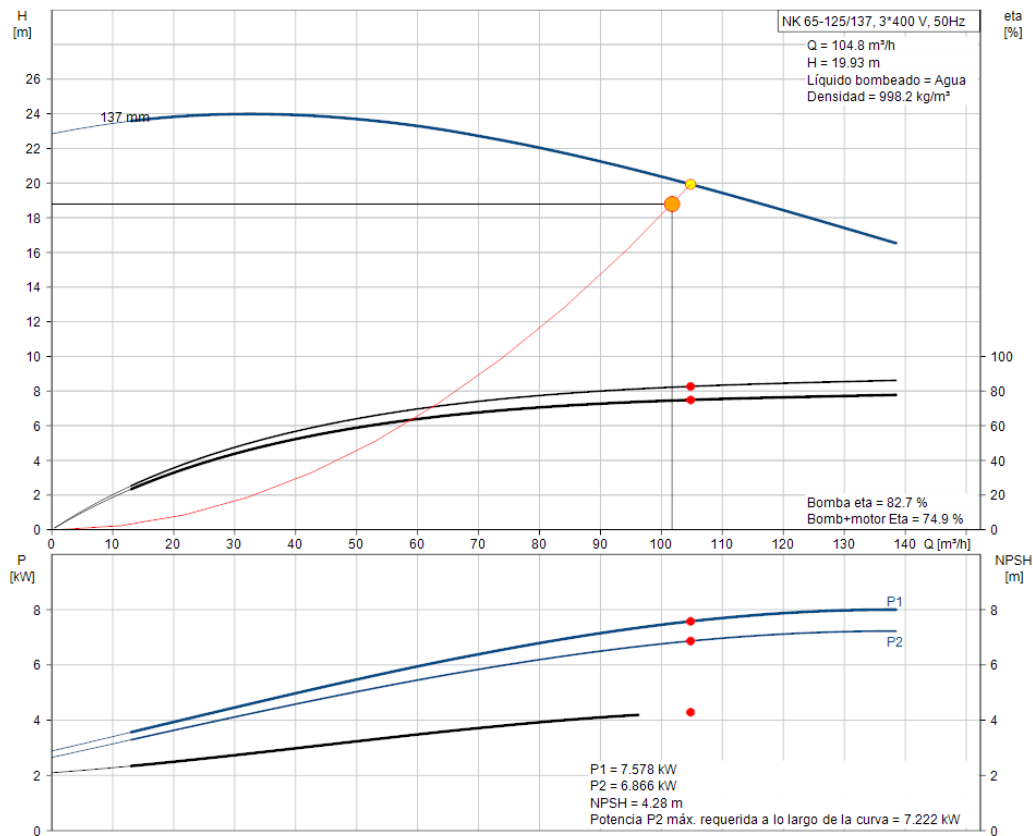


Figura 24. Curvas bomba Grundfos modelo NK 65-125/137 (Fuente: Grundfos)

- **KSB:** al igual que con la bomba booster, este fabricante ofrece con el mayor rendimiento el mismo modelo. La serie es la Etanorm/Etabloc el modelo 080-065-125 con una eficiencia del 81,31%. Además, la potencia absorbida por dicha bomba es de 6,41 kW. La imagen de la bomba sería la misma que la Figura 16, sin embargo, sus curvas variarían de la siguiente forma:

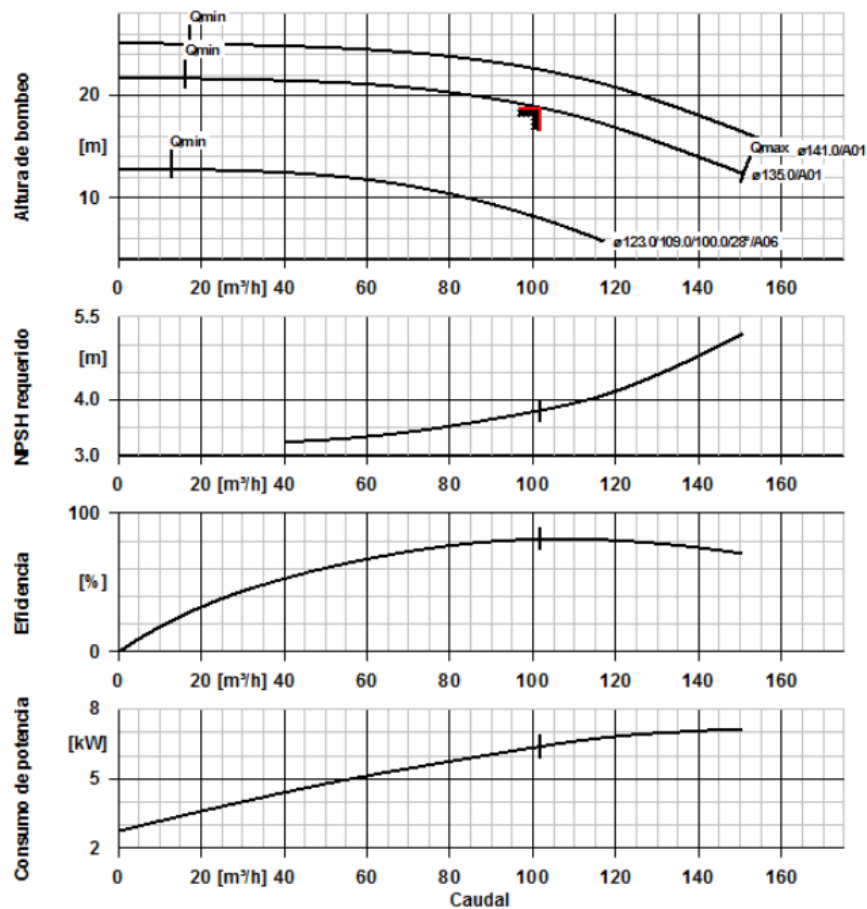


Figura 25. Curvas de la bomba de distribución KSB de la serie Etanorm/Etabloc 080-065-125 (Fuente: KSB)

- *Flowsolve*: en este caso este fabricante no dispone de una gran cantidad de bombas para este caso que ofrezca una eficiencia aceptable. Asimismo, se ha optado por estudiar el modelo SMP 3X3X6 que tiene una eficiencia del 75,4% y la potencia eléctrica del motor sería de 6,91 kW.

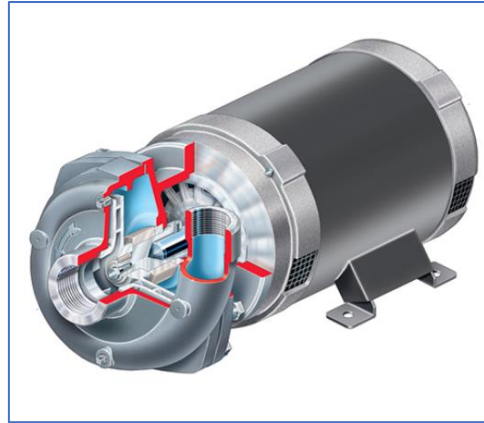


Figura 26. Bomba Flowserve serie SMP (Fuente: Flowserve)

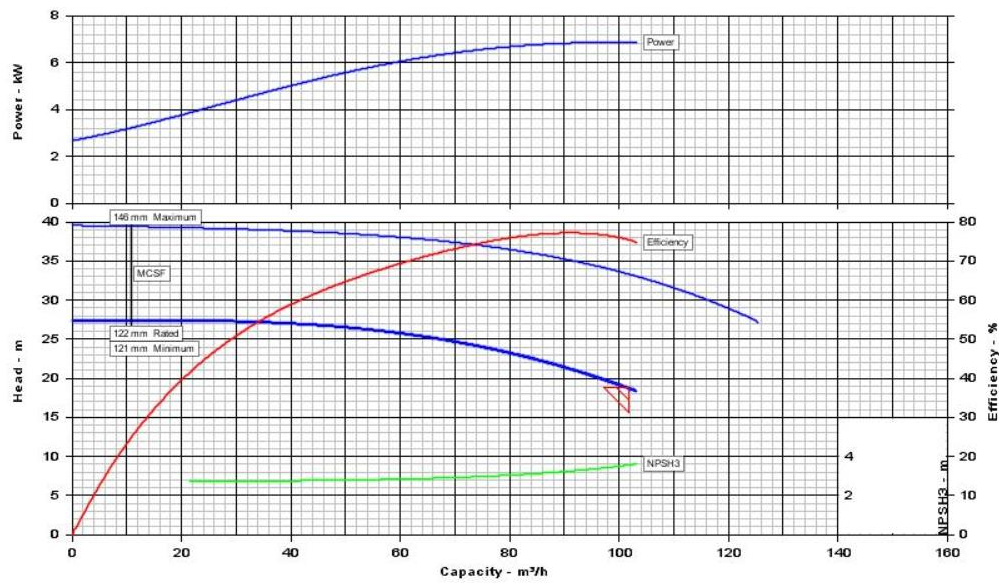


Figura 27. Curvas de la bomba Flowserve modelo SMP 3X3X6 (Fuente: Flowserve)

Una vez obtenidas las eficiencias de las bombas de los fabricantes seleccionados se comparan entre ellas. La bomba seleccionada para el tramo de distribución sería la de la marca Grundfos el modelo NK 65-125/137 con una eficiencia de 82,7% y una potencia absorbida de 6,866 kW. Por otro lado, no habría ningún problema en cuanto al fenómeno de cavitación ya que el $NPSH_r$ está por debajo del disponible calculado anteriormente.

5. Dimensionado del postratamiento

El postratamiento es un proceso que se realiza sobre el agua a la salida del núcleo de desalación, el cual permite modificar su composición química.

Según los resultados obtenidos de la simulación del Winflows el agua que sale del bastidor de membranas tendría un pH igual a 5,11, que no sería válido para el riego de las plataneras. Asimismo, se debe colocar un proceso de postratamiento para elevar dicho valor y evitar unas malas condiciones para el cultivo.

TDS, mg/l		225.22
Flow	m ³ /day	1999.08
Temperature	C	20.00
Pressure	bar	2.00
Osm. Pressure	bar	0.19
pH		5.11
Conductivity at 25C	µS/cm	465.00

Figura 28. Resultados de pH de la simulación en Winflows

El proceso que se decide llevar a cabo es con hidróxido de sodio (NaOH) que permite elevar el valor del pH hasta siete, debido que es óptimo para el riego de plataneras según *agrocabildo.org* y los datos ofrecidos por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Se ha optado por este postratamiento debido a la limitación en cuanto a los conocimientos de este tema, además de la escasa posibilidad en cuanto al programa de diseño Winflows. Además, al igual que en apartados anteriores al alcance limitado del proyecto no permite profundizar en ciertos aspectos como en este caso.

6. Dimensionado del sistema de rechazo

El sistema de rechazo que se utilizará en la instalación de desalación es un emisario submarino, el cual se instalará para la devolución de la salmuera generada en la instalación de desalación al mar. El vertido de la salmuera al mar debe ser en unas

condiciones que garanticen que su afección al medio sea lo menor posible. Por ello no debe devolverse sin más, se debe descargar a una profundidad y a un caudal determinado que permita su disolución gracias a las corrientes marinas, evitando que afecte a los pozos cerrados de captación.

6.1. Dimensionado de las tuberías de rechazo

Las tuberías de rechazo deben tener una longitud y un diámetro determinado para que se cumplan los requerimientos mencionados sobre el vertido de salmuera. La longitud se obtiene por medio de la herramienta proporcionada por la Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias con datos del Instituto Español de Oceanografía.

A partir de un estudio de barimetría se obtiene la primera isobata a una profundidad aproximada de 20 metros. Asimismo, la longitud de la tubería de rechazo será de unos 757 metros se aproximará a 760 metros para una mayor seguridad en los cálculos. Por otro lado, se debe conocer la diferencia de altura en la que se encontrará que serían los 20 metros de profundidad más los 17 metros de altura ya calculados de la planta desaladora sobre el nivel del mar, un total de 37 metros.

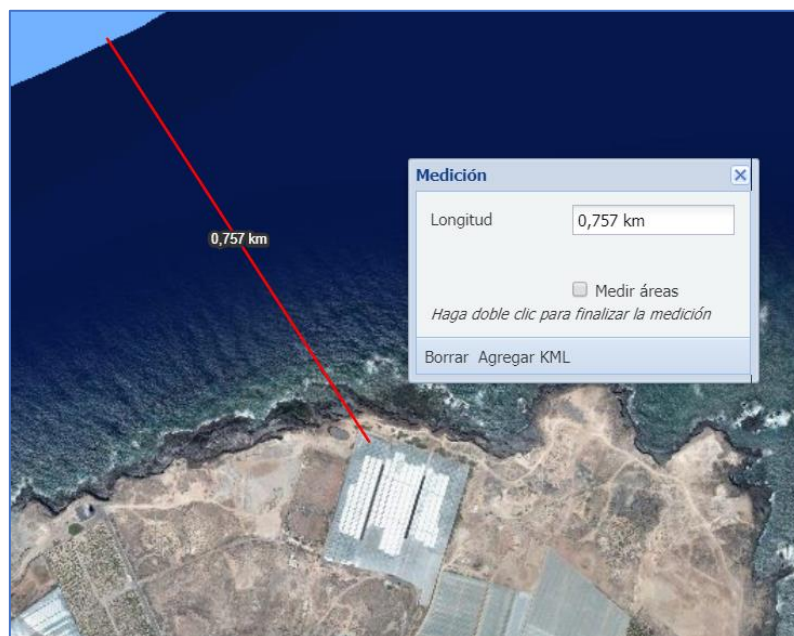


Figura 29. Longitud de tubería de rechazo

El caudal de flujo de salmuera que debe transportar el emisario es de 2444,44 m³/día lo que equivale a 0,0283 m³/seg. Los requisitos de dimensionamiento serán los mismos que para las tuberías anteriores. Se aplicará el criterio de Bonnet obteniendo:

$$D_{\text{mín, rechazo}} = 0,835 \cdot \sqrt[5]{Q^2} = 0,835 \cdot \sqrt[5]{0,0283^2} = 0,201 \text{ metros}$$

Como se puede observar cumple el criterio de Bonnet por lo que es aplicable a la instalación. Tener en cuenta que el valor obtenido es casi de un diámetro de 200 milímetros, sin embargo, al ser mayor por una escasa diferente se debe elegir el siguiente valor disponible del distribuidor.

$$D_{n, \text{ rechazo}} = 250 \text{ mm}$$

6.2. Selección de bomba de rechazo

La selección de la bomba de rechazo se realiza como en los casos anteriores atendiendo al cálculo de la altura de la bomba. Para ello se deben conocer las pérdidas de carga que suceden a lo largo de dicha tubería. Se tendrá en cuenta la hipótesis para la correcta realización del estudio de que el sistema se encuentra en régimen estacionario, por lo tanto el balance de energía despejando la altura de la bomba quedaría de la siguiente forma:

$$H_B = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \Sigma H_r$$

Una vez definidos los estados, obtenemos los datos del anexo anterior del recuperador de energía seleccionado. Por lo que se definen los siguientes parámetros conocidos:

$p_2 = 2 \text{ bar}$. La presión que tendría a los 20 metros de profundidad.

$p_1 \cong 1,4 \text{ bar}$. La presión que se encuentra en el punto de rechazo a la salida del intercambiador de presión.

$\rho = 998,2 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$. Valor aproximado para una temperatura de 20° C.

$g = 9,81 \left(\frac{m}{s^2} \right)$.

$z_2 = -20 \text{ m}$. Profundidad de salida del emisario.

$z_1 = 17 \text{ m}$. Valor aproximado de la altura de la planta de desalación con respecto al nivel del mar.

$v_2 = v_1 \cong 0$. No se consideran en este cálculo debido a que no son significantes para el cálculo.

Por lo tanto para el cálculo de las pérdidas de carga se debe obtener la velocidad del fluido a la salida de la bomba de rechazo. La velocidad del fluido la obtengo de la relación con el caudal y el área de la tubería.

$$v_{rechazo} = \frac{Q}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} = \frac{0,0283}{\pi \cdot \left(\frac{0,25}{2}\right)^2} = 0,577 \text{ m/seg}$$

Asimismo empleando las ecuaciones obtenidas de la asignatura de Ingeniería Fluidomecánica y la bibliografía señalada, se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach que es necesario el cálculo del coeficiente de fricción f , el cual depende del número de Reynolds.

$$Re_{rechazo} = \frac{4 \cdot 0,0283 \left(\frac{m^3}{s} \right)}{\pi \cdot 0,25(m) \cdot 1,003 \cdot 10^{-6} \left(\frac{m^2}{s} \right)} = 143699,62$$

Al ser el número de Reynolds mayor a 4.000 se establece según el criterio de la bibliografía consultada que se encuentra en régimen turbulento. Por lo tanto, se puede emplear la ecuación de Colebrook-White para el cálculo del coeficiente de fricción f . Al

igual que en casos anteriores se realizará una iteración tomando como valor inicial 0,015 hasta que no presente una variación considerable. En la siguiente tabla se muestra el proceso de iteración a partir de los datos obtenidos:

Tabla 6. Proceso iterativo del coeficiente de fricción para tubería de rechazo

Tramo de Tubería	D (mm)	k (mm)	f ₁	f ₂	f ₃
Rechazo	250	0.029	0.0177	0.0174	0.0174

(Fuente: Elaboración Propia)

De esta manera, se puede realizar el estudio de las pérdidas de carga primarias a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$H_{r,primarias,rechazo} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0174 \cdot \frac{760(m)}{0,25(m)} \cdot \frac{0,577^2 \left(\frac{m^2}{s^2}\right)}{2 \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right)} = 0,90 \text{ m}$$

En cuanto a las pérdidas secundarias del tramo de tubería de rechazo se supondrá un porcentaje que se tendrá en cuenta debido que el estudio se ha realizado como un único tramo recto. Por lo tanto, las pérdidas de carga totales serían de 1 metro.

Una vez calculados todos los parámetros necesarios para la resolución del balance de energía planteado, se puede obtener el valor de la altura de la bomba de rechazo.

$$H_B = \frac{2 \cdot 10^5 \text{ Pa} - 1,4 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{998,2 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right)} + (-20 - 17)(m) + 0 + 1(m) = -29,87 \text{ m}$$

Al obtener una altura de la bomba negativa eso quiere decir que no es necesaria una bomba para el tramo de rechazo. La propia acción de la gravedad debida a la diferencia de cota permitiría el desplazamiento de dicho caudal.

7. Cálculo del consumo específico final de la planta de desalación

Al haber seleccionado cada una de las bombas de las plantas de desalación se debe plantear de nuevo el estudio del consumo específico total tanto en el Excel de los intercambiadores de presión seleccionados como en el software de simulación Winflows.

Primero se realizará el estudio del consumo específico del núcleo de desalación, es decir, el de la bomba de alta presión y el de la bomba booster, ya que son los que consumen energía eléctrica en esta instalación. Asimismo, la potencia de una bomba hidráulica se define como:

$$P_B = Q \cdot \gamma \cdot H_B$$

Ecuación de la potencia de una bomba hidráulica

Por otro lado, se debe estudiar aplicando tanto el rendimiento de la propia bomba como el rendimiento mecánico del motor que se encuentra acoplado. El valor que se supondrá para este rendimiento será de un 95%, quedando la fórmula conjunta como:

$$P_B = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H_B}{\eta_B \cdot \eta_M}$$

En cuanto a la bomba de alta presión seleccionada, la bomba Sulzer modelo MBN 50-215, presenta una eficiencia (η_B) del 74,68%, el peso específico (γ) se mantiene igual que para los cálculos anteriores, la altura de la bomba (H_B) sería de 616,81 metros y el caudal (Q) sería de 84,3 m³/h. La potencia total quedaría:

$$P_{B,alta\ presión} = \frac{84,3 \left(\frac{m^3}{h} \right) \cdot 998,2 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2} \right) \cdot 616,81 \left(m \right)}{0,7468 \cdot 0,95}$$

$$= 199358,67 \text{ W}$$

El valor obtenido se encuentra bastante próximo al valor dado por el fabricante de 189 kW, no obstante, los cálculos posteriores se realizarán teniendo en cuenta el del

fabricante, ya que el cálculo se realizó para comparar si los resultados obtenidos se parecen.

Por otro lado, la bomba booster seleccionada, la bomba Grundfos modelo NK 65 125/137, presenta una eficiencia (η_B) del 83,7%, el peso específico (γ) se mantiene igual, la altura de la bomba (H_B) sería de 16,34 metros y el caudal (Q) sería de 100,9 m³/h. La potencia total quedaría:

$$P_{B,booster} = \frac{100,9 \left(\frac{m^3}{h} \right) \cdot 998,2 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2} \right) \cdot 16,34 \text{ (m)}}{0,837 \cdot 0,95} = 5640 \text{ W}$$

En este caso al contrario que el anterior el fabricante da un valor de potencia absorbida mayor a la calculada de 6,967 kW, por lo tanto, éste se tomará como valor para el cálculo de consumo específico.

El consumo específico del núcleo de desalación se calcularía con la suma total de las potencias de ambas bombas entre el caudal producido por la planta de desalación que sería de 83,3 m³/h.

$$CE_{núcleo \text{ desalación}} = 2,35 \left(\frac{kWh}{m^3} \right)$$

El consumo específico del núcleo de desalación obtenido en los cálculos es mayor al realizado con el Excel del fabricante del intercambiador de presión con un valor de 2,28 kWh/m³. Esto es debido a que en la herramienta se supusieron unos valores predeterminados para los rendimientos de las bombas. Asimismo, se decide volver a introducir los datos reales de las bombas de alta presión y booster.

PX Technology Performance		
PX unitary flow		50,9 m ³ /hr
Salinity Increase at membranes		2,7%
Volumetric mixing VM		5,8%
Lubrication flow (LF) per PX array		0,9 m ³ /hr
LF as % of concentrate flow		0,9%
HP DP		0,5 bar
LP DP		0,6 bar
RO Specific Energy **		2,44 kWh/m ³
Brine Recovery Efficiency		98,20%
Overall PX Efficiency		97,42%

Figura 30. Consumo específico real con el Excel del PX-Q300

Al simular en el Excel con los valores reales se puede observar un incremento en el valor de consumo específico del núcleo de desalación a 2,44 KWh/m³.

Por último, se decide simular en el software del fabricante seleccionado de membrana, Winflows, en el cual se había obtenido un consumo específico con el intercambiador de presión predeterminado de 2,34 KWh/m³. Una vez colocado los rendimientos el programa devuelve un valor de consumo específico mucho más alto de 2,59 KWh/m³. Esto se debe a que, aunque mejore el rendimiento de la bomba booster, la bomba de alta presión disminuye su rendimiento considerablemente. Por lo tanto, se pueden comparar los tres resultados en cuanto al núcleo de desalación, no obstante, para el cálculo total del consumo específico de la instalación se utilizará el primero de ellos ya que se plantearía con los valores de potencias dadas por los fabricantes.

Pressure Exchanger Power Results		
Parameter	Unit	Value
Total Power Consumption	kW	215,704
Specific Power Consumption	kWh/m ³	2,589
Specific Power Consumption	kWh/kgal	9,800
Power Cost Saved	\$/year	198965,107

Figura 31. Consumo específico real obtenido de Winflows

Las bombas de captación y la bomba de distribución se calcularán sus consumos específicos con el primer método, con los datos proporcionados por las gráficas de los

fabricantes. Además, se compararán con los valores teóricos obtenidos de la ecuación de la potencia de las bombas.

En el caso de la bomba de captación hay que multiplicar la potencia obtenida ya que se encontrarán operativas dos de ellas durante el funcionamiento de la instalación de desalación. La bomba seleccionada es del fabricante KSB modelo UPA 200B-80, con una eficiencia de 77,28% y una potencia absorbida de 11,49 kW.

$$P_{B,captación} = \frac{2 \cdot 92,59 \left(\frac{m^3}{h}\right) \cdot 998,2 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right) \cdot 34,38 (m)}{0,7728 \cdot 0,95}$$

$$= 23588,12W$$

Si se realiza el cálculo para las dos bombas de captación con el valor dado por el fabricante daría una potencia de 22,98 kW.

El consumo específico de las dos bombas de captación sería de:

$$CE_{captación} = 0,248 \left(\frac{kWh}{m^3}\right)$$

Para la bomba de distribución seleccionada del fabricante Grundfos y modelo NK 65-125/137, con una eficiencia del 82,7% y una potencia absorbida de 6,866 kW.

$$P_{B,distribución} = \frac{101,8 \left(\frac{m^3}{h}\right) \cdot 998,2 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right) \cdot 18,8 (m)}{0,827 \cdot 0,95}$$

$$= 6626,14W$$

El consumo específico de la bomba de distribución es de:

$$CE_{distribución} = 0,07 \left(\frac{kWh}{m^3}\right)$$

Por último, se puede observar en la siguiente tabla los resultados obtenidos de consumos específicos y el total de la planta de desalación.

Tabla 7. Consumos específicos de cada bomba de la planta

<i>Bombas</i>	<i>Consumo (kW)</i>	<i>Consumo específico (kWh/m³)</i>
<i>Captación</i>	<i>22,98</i>	<i>0,248</i>
<i>Alta presión</i>	<i>189</i>	<i>2,24</i>
<i>Booster</i>	<i>6,97</i>	<i>0,07</i>
<i>Distribución</i>	<i>6,87</i>	<i>0,07</i>
<i>TOTAL</i>	<i>225,82</i>	<i>2,628</i>

(Fuente: Elaboración Propia)

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO III

DIMENSIONADO DEL SISTEMA UNDIMOTRIZ

Autor: Sergio Castro González

Tutor: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Análisis de la energía undimotriz	1
3. Principios físicos de la energía undimotriz	3
4. Dimensionamiento del sistema undimotriz.....	5
4.1. Estudio del recurso undimotriz	5
4.2. Selección del sistema undimotriz	10
5. Normativa	29

Índice de figuras

Figura 1. Potencia media de oleaje anual en kWm^{-1} de longitud de cresta de ola (Fuente: Jaime González Velasco. (2009). Energías renovables. Barcelona. Reverté).....	3
Figura 2. Características de una onda monocromática (Fuente: Jaime González Velasco. (2009). Energías renovables. Barcelona. Reverté)	4
Figura 3. Boyas y Puntos SIMAR en las Islas Canarias (Fuente: Puertos del Estado)	6
Figura 4. Punto SIMAR 4020014 (Fuente: Puertos del Estado)	7
Figura 5. Tabla de Altura de la ola frente a la Dirección (Fuente: Puertos del Estado)....	7
Figura 6. Rosa del oleaje entre 2015 y 2019 (Fuente: Puertos del Estado)	8
Figura 7. Histograma de altura significativa entre 2015 y 2019 (Fuente: Puertos del Estado)	9
Figura 8. Gráfica de altura significativa del oleaje entre 2015 y 2019 (Fuente: Puertos del Estado)	10
Figura 9. Gráfica de periodo medio entre 2015 y 2019 (Fuente: Puertos del Estado)	10
Figura 10. Dispositivo Oyster (Fuente: http://www.aquamarinepower.com/)	11
Figura 11. Dispositivo PowerBuoy (Fuente: https://www.oceanpowertechnologies.com/).	12
Figura 12. Rotary Wave S.L.	13
Figura 13. Diseño de la maqueta Butterfly (Fuente: Rotary Wave).....	13
Figura 14. Dispositivo Butterfly a escala 1.14	14
Figura 15. Diseño de la bomba Smart Pump (Fuente: Rotary Wave)	16
Figura 16. Canal de olas de Rotary Wave	17

Figura 17. Resultados Potencia en fijo para 1:14	18
Figura 18. Resultados Potencia en fijo para 1:1	18
Figura 19. Tendencia Potencia en fijo con aumento del oleaje	19
Figura 20. Resultados Potencia en flotante para 1:14 con 1 módulo	21
Figura 21. Resultados Potencia en flotante para 1:1 con 1 módulo	21
Figura 22. Resultados Potencia en flotante para 1:14 con 2 módulos	22
Figura 23. Resultados Potencia en flotante para 1:1 con 2 módulos	22
Figura 24. Resultados Potencia en flotante para 1:14 con 3 módulos	23
Figura 25. Resultados Potencia en flotante para 1:1 con 3 módulos	23
Figura 26. Tendencia Potencia en flotante con aumento de oleaje	24
Figura 27. Resultados Potencia en flotante según el número de flotadores	26

Índice de tablas

Tabla 1. Extrapolación de la potencia en fijo	19
Tabla 2. Extrapolación de la potencia en flotante	24

1. Introducción

En este anexo se estudiará el dimensionamiento del sistema undimotriz que alimentará a la planta de desalación, se debe cumplir el requisito de que cumpla por completo el consumo calculado en el Anexo II.

En cuanto al análisis de la energía undimotriz se basará según la bibliografía consultada. Por lo que las fórmulas y las hipótesis basadas en la resolución del estudio del oleaje se encuentran extraídas directamente de los libros seleccionados.

Como se explicó con anterioridad la ubicación del dispositivo de energía undimotriz es de vital importancia por lo que se realizará un estudio sobre su ubicación más detalladamente. Se situará según la normativa vigente, y que no suponga un efecto medioambiental en la zona. Además, se realizará un análisis del oleaje más cercano a la planta de desalación y se comprobará si la potencia que se puede extraer es suficiente.

El estudio de la gestión energética también se desarrollará en este anexo, si en la instalación se produce un exceso o un déficit de energía eléctrica. No obstante, no se darán soluciones de cálculos realizados ya que los datos han sido aportados directamente de ensayos realizados por la propia empresa.

2. Análisis de la energía undimotriz

La energía undimotriz es una de las energías renovables que actualmente se encuentra en desarrollo y presenta varias grandes ventajas con respecto a las otras. La más importante es que posee una mayor facilidad para predecir condiciones óptimas que permitan la mayor eficiencia en sus procesos. En el oleaje es más fácil predecir sus condiciones óptimas que por ejemplo con el viento para obtener energía eólica, su variabilidad es menor.

La energía contenida en el oleaje puede ser considerada como solar indirecta, ya que surge como consecuencia de las interacciones tangenciales del viento con la superficie de las aguas de los mares. En cuencas oceánicas muy amplias, como la del océano Atlántico, los vientos unidireccionales dominantes interaccionan continuamente

con el agua a lo largo de miles de kilómetros, transfiriéndole parte de su energía, por lo que también se podría considerar que el oleaje es energía eólica concentrada.

Un inconveniente que hay que tratar de superar es la gran variabilidad de las olas en cuanto a los períodos, amplitudes y direcciones de las que proceden, que da lugar a una distribución energética caótica. Actualmente sólo algunos países han realizado investigaciones en el campo de la transformación de la energía contenida en el oleaje.

En muchos puntos geográfico durante determinados periodos de tiempo se producen olas de gran arboladura, y por tanto de gran poder destructivo, los dispositivos productores de electricidad a partir del oleaje deben estar provistos de una estructura suficientemente sólida como para soportarlas. Se sabe que al menos una vez cada 50 años se producen oleajes con alturas 10 veces mayor que la altura media de las olas. La potencia es proporcional a la altura significativa, ello significa que el dispositivo tiene que ser capaz de soportar intensidades de potencia 100 veces superiores a la correspondiente de la altura media. Se debe tener en cuenta que las empresas tienen por normativa a la hora de diseñar un dispositivo undimotriz poder extraer la potencia de una ola como mínimo de hasta 3 metros. Además, las potencias máximas solo serían extraíbles de olas profundas, lo cual no resulta un trabajo fácil, debido al mantenimiento e instalación en esas condiciones meteorológicas.

En la actualidad no se ha inventado ningún dispositivo que presente suficientes ventajas en la transformación de energía del oleaje en electricidad como para sustituir comercialmente a otras energías renovables. No obstante, existe una gran variedad de productos propuestos que se encuentran todavía en desarrollo. Muchos de estos planes son dispositivos con un tamaño bastante grande en zonas con una potencia en el oleaje intensa. Por este motivo, se suelen descartar ya que resultan muy costosos y su viabilidad es a largo plazo.

La obtención de energía eléctrica se estudia en un principio de la energía que se extrae del oleaje y esta a su vez depende del estado del mar que varía en diversos puntos geográficos del mundo. Como se observa en la Figura 1 el Atlántico Norte se considera un punto rico en la energía contenida del oleaje

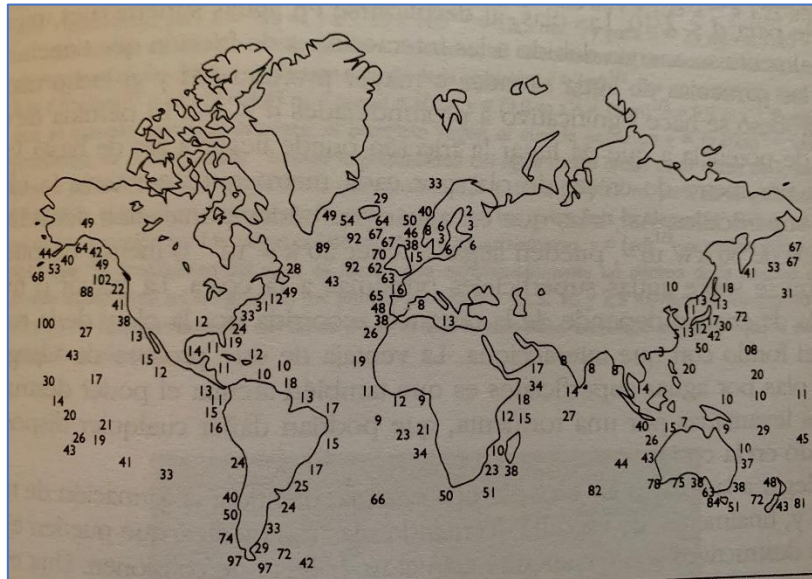


Figura 1. Potencia media de oleaje anual en kWm^{-1} de longitud de cresta de ola (Fuente: Jaime González Velasco. (2009). Energías renovables. Barcelona. Reverté)

Existen varios factores que afectan a la formación o creación de olas: el viento, la profundidad y tipo de fondo marino, y las características propias del mar (salinidad y temperatura).

Se debe tener en cuenta que se pueden formar diferentes tipos de olas con una velocidad y dirección diferentes. Las olas no se desplazan de un lugar a otro como las corrientes marinas, cada partícula del mar se ve afectada por el tren de olas (conjunto de olas) donde acaba sufriendo un movimiento circular, como si se tratasen de ondas de sonido.

3. Principios físicos de la energía undimotriz

El oleaje de los océanos se genera como consecuencia del viento que sopla sobre grandes extensiones de agua, no obstante, el mecanismo del viento y el agua es complejo y aún no se comprende por completo.

La forma de una ola típica es sinusoidal de la que se pueden definir varios parámetros característicos observados en la Figura 2. Además de la variabilidad que presenta según la velocidad del viento.

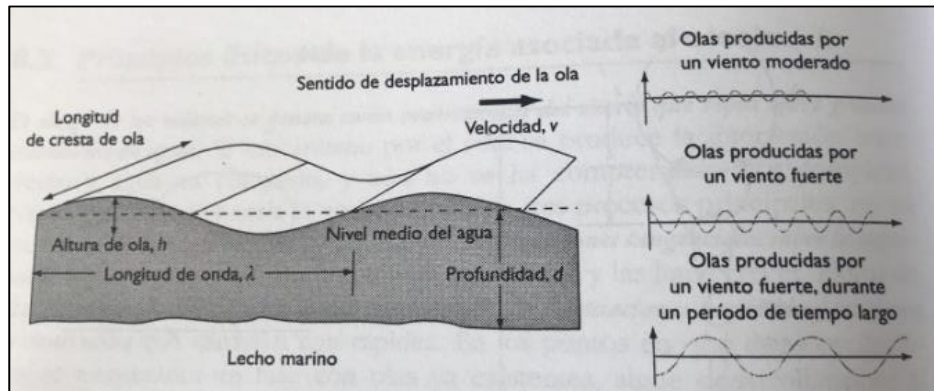


Figura 2. Características de una onda monocromática (Fuente: Jaime González Velasco. (2009). Energías renovables. Barcelona. Reverté)

Tener en cuenta las siguientes relaciones:

- La diferencia de altura, h , entre los picos máximos y mínimos, se denomina **altura de la ola**, y es el doble de la amplitud, a , ($h = 2a$).
- La distancia entre dos picos, o dos mínimos sucesivos, es la **longitud de onda**, λ . Si dichos picos se mueven por la velocidad, v , se denomina **periodo**, τ , al intervalo de tiempo en segundos a que pasen por un determinado punto. Se hace referencia al tiempo que tarda en pasar dos crestas seguidas.
- La **frecuencia**, ν , de la ola es el número de oscilaciones, pico a pico, superficiales por segundo y es la inversa del periodo ($\nu = \frac{1}{\tau}$).
- La **velocidad**, v , de desplazamiento de una ola, depende de la profundidad del mar en la zona en que se desplaza. Asimismo, se diferencian dos tipos de velocidades. La velocidad de desplazamiento de la ola que es proporcional a la longitud de onda, cuanto mayor sea más velocidad habrá, se denomina **velocidad de fase**. Por otro lado, el agua, aunque no haya un desplazamiento la ola transporta energía de un punto a otro, que es la **velocidad de grupo** a la que el grupo de ondas transporta dicha energía.

Por lo tanto, los sistemas de olas que forman el oleaje marino no presentan un esquema sinusoidal único, si no que un estado típico del mar está compuesto de muchas olas sinusoidales individuales, cada una caracterizada por su propio periodo, altura y dirección.

Según estos parámetros y su relación entre sí, se obtiene la potencia que generaría el oleaje. Debido a la limitación del proyecto los pasos para la obtención de la potencia se omitirán y se expondrá directamente. La potencia que transporta la ola por unidad de longitud de frente es proporcional a su altura al cuadrado y a su periodo, con un posible error del 2%. La máxima potencia la transportan olas caracterizadas por periodos elevados, lo que equivale a grandes valores de longitudes de onda.

Las olas tienden a establecerse en grupos de viajes, también conocidos como trenes de olas lo que permite que sean predecibles. Esto ocurre debido a que tras la formación de una ola se forman esos pequeños grupos de viaje, que al dirigirse hacia la misma dirección se juntan siendo más pronosticable.

4. Dimensionamiento del sistema undimotriz

El sistema undimotriz que se establezca como fuente de alimentación debe suministrar la máxima cantidad de energía posible a la instalación de desalación. En la actualidad, tiene una gran dificultad encontrar el dispositivo que satisfaga las necesidades exactas o incluso que se aproxime. Esto se debe a que la mayoría de los sistemas que se encuentran en funcionamiento son de un tamaño bastante menor que al que se requiere en este caso, ya que no se considera este recurso de forma comercial si no que continúa en fase de investigación.

4.1. Estudio del recurso undimotriz

La zona elegida como se ha explicado anteriormente se ha seleccionado debido a que favorecía al oleaje que se generaba, además de las propias limitaciones que están establecidas como zona de protección medio ambiental. Asimismo, se deben analizar las características de dicho punto y realizar las correspondientes comprobaciones. En

concreto, se han utilizado varias herramientas de Puertos del Estado, que pertenecen al Ministerio de Fomento del Gobierno de España, y que permiten obtener datos históricos sobre el oleaje en el país.

La información es medida tanto por boyas situadas en puntos estratégicos como por un conjunto de datos SIMAR. Se ha desarrollado un complejo sistema de monitorización y previsión del medio marino. Estas redes de boyas permiten medir distintos parámetros oceanográficos: oleaje, corrientes, temperatura del agua y salinidad; y meteorológicos: viento, temperatura del aire y presión atmosférica. Además de estas boyas, los puertos españoles cuentan con una red de boyas costeras, que facilitan datos del oleaje en aguas poco profundas. Por otro lado, también cuentan con los datos SIMAR que se tratan de predicciones y de un conjunto de simulaciones realizadas con una alta eficiencia, pero no son medidas tomadas reales.

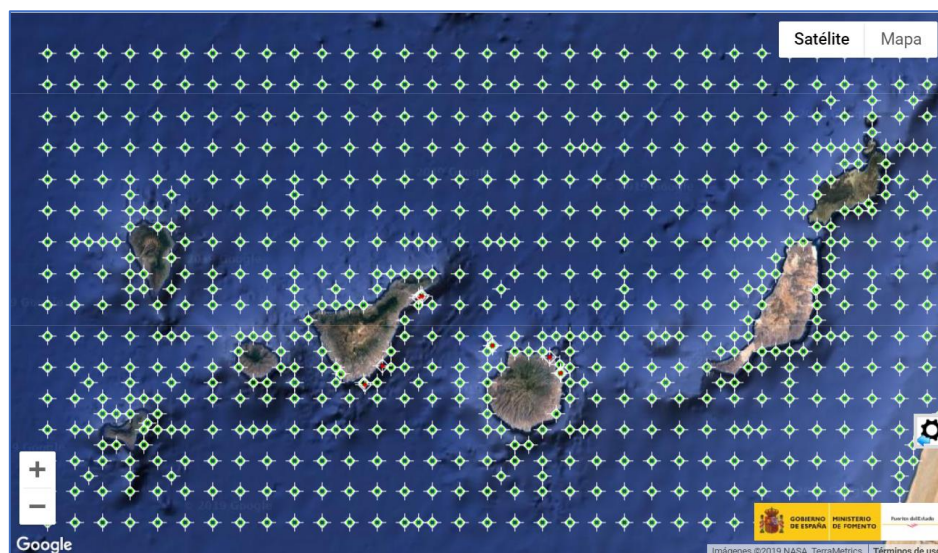


Figura 3. Boyas y Puntos SIMAR en las Islas Canarias (Fuente: Puertos del Estado)

En la Figura 3 se pueden observar las boyas con un color rojo y los puntos SIMAR con un color verde. En particular para los cálculos del oleaje del sistema undimotriz que alimentará la planta de desalación se ha escogido el punto SIMAR 4020014, debido a la proximidad con la instalación. Asimismo, para las medidas extraídas se ha de tener en cuenta que son aproximaciones de los valores reales, pero con una eficacia bastante alta.

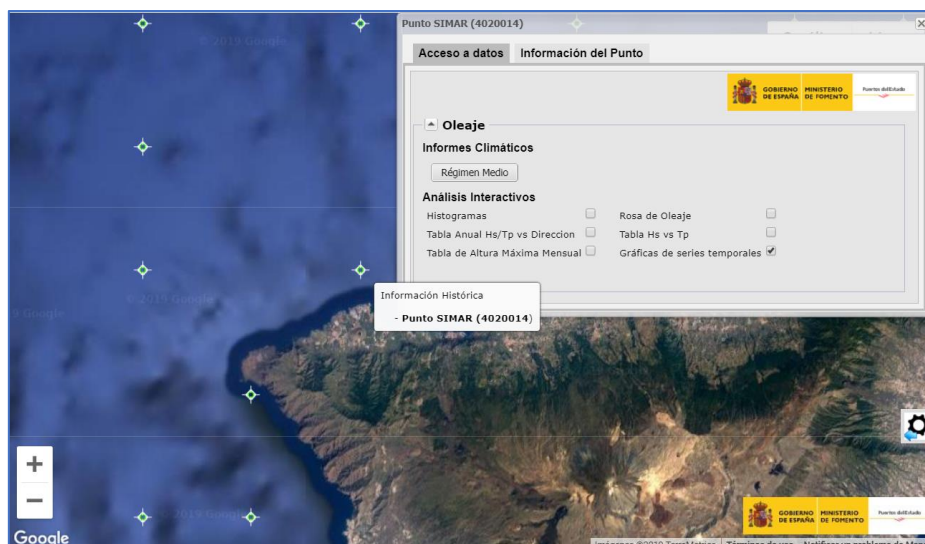


Figura 4. Punto SIMAR 4020014 (Fuente: Puertos del Estado)

Primero se realizará el análisis de la altura de las olas según la dirección para comprobar que la situación del sistema se encuentra en una zona óptima para la energía renovable elegida.

EFICACIA 99.5% AÑO/YEAR 2018		Hs (m)											TOTAL
		<= 0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	> 5.0	
calmas/calms		---											---
Dir	N 00	---	4.470	20.667	14.970	9.571	6.259	2.212	0.871	0.390	0.252	---	59.663
	NE 45	---	0.642	6.419	6.041	0.883	0.573	0.344	0.138	---	---	---	15.039
	E 90	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	SE 135	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	S 180	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	SW 225	---	---	---	---	---	0.034	---	---	---	---	---	0.034
	W 270	---	---	0.046	0.298	0.241	0.206	0.034	0.126	0.344	---	---	1.295
	NW 315	---	0.287	3.874	5.846	5.834	4.413	2.430	0.608	0.309	0.172	0.195	23.968
TOTAL		---	5.399	31.006	27.155	16.529	11.486	5.021	1.742	1.043	0.424	0.195	100%

Figura 5. Tabla de Altura de la ola frente a la Dirección (Fuente: Puertos del Estado)

En la Figura 5 podemos observar una tabla que representa la eficiencia de la altura de la ola en la zona designada dependiendo de la dirección, la predominante de ellas es el norte, el noreste y el noroeste. El estudio se ha realizado para el año 2018 mediante los datos proporcionados de Puertos del Estado.

Por otro lado, se ha querido comparar con otra de las opciones que permite representar, según la altura significativa de la ola y la dirección, una rosa del oleaje en la Figura 6. Se alcanzan unos resultados similares, aunque en este caso el periodo de estudio

se ha realizado desde 2015 hasta 2019 para verificar con una mayor cantidad de datos que ofrece. Así pues, la hipótesis inicial queda demostrada que la ubicación de la instalación para un mejor aprovechamiento de energía de las olas es el correcto. También se conoce a esta representación como una rosa direccional, permitiendo una división de sectores en cuanto a la dirección del oleaje.

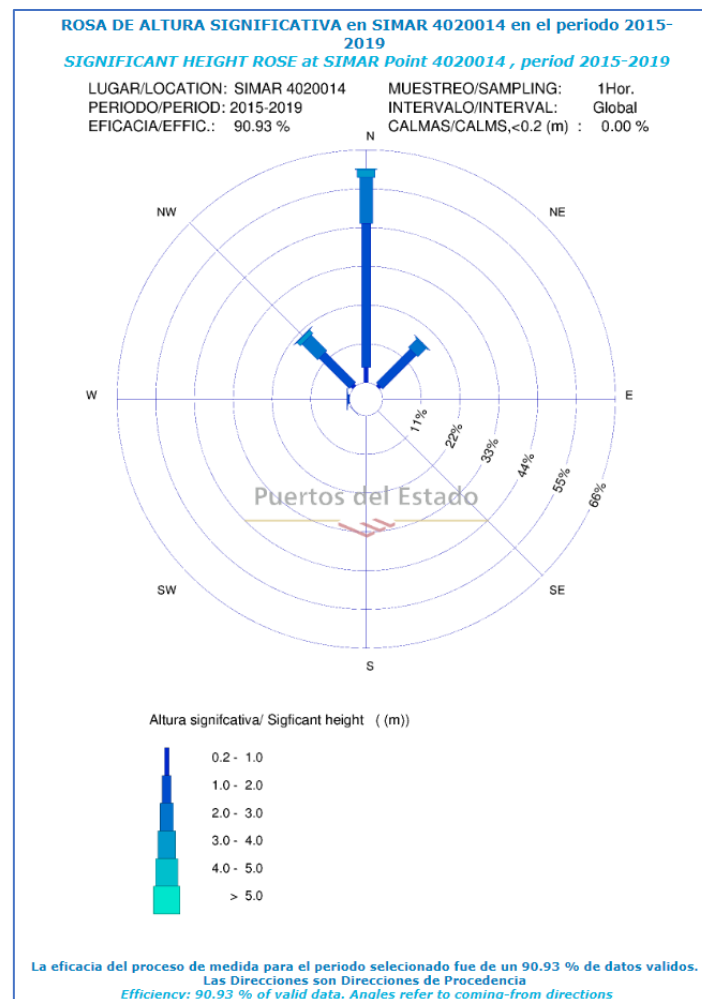


Figura 6. Rosa del oleaje entre 2015 y 2019 (Fuente: Puertos del Estado)

Para establecer la altura significativa de las olas que se usara como dato se ha optado por un diagrama de barras de un 91% de eficacia, de la misma bibliografía escogida. La potencia depende directamente de la altura, por lo que se establecerá una media entre los valores.

Las olas, aunque dependan del viento, tienen unas constantes más estables por lo que sus medidas son más fiables que otras energías renovables, no obstante, puede haber días donde el mar se encuentre en calma o alborotado.

En la Figura 7 se puede observar la altura significativa desde el mismo punto seleccionado en la costa más próxima a la instalación de desalación. Los valores que aparecen con más frecuencia se corresponden entre 1 metro y 2 metros, los cuales hay que tener en cuenta en el dispositivo seleccionado.

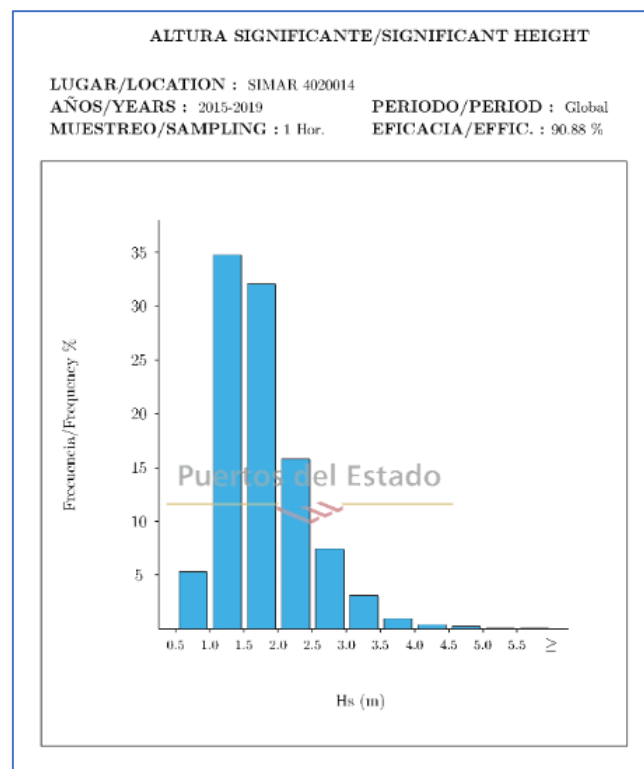


Figura 7. Histograma de altura significativa entre 2015 y 2019 (Fuente: Puertos del Estado)

Del mismo modo se ha optado por comparar la altura y el periodo de las olas con otra de las herramientas que ofrece Puertos del Estado que son gráficas de series temporales. El rango de tiempo establecido es el mismo que en los casos anteriores. Asimismo, observando la Figura 8 y 9 se ha determinado una altura significativa de oleaje de 1,70 metros y un periodo medio de 6,1 segundos para los cálculos del dispositivo de energía undimotriz.

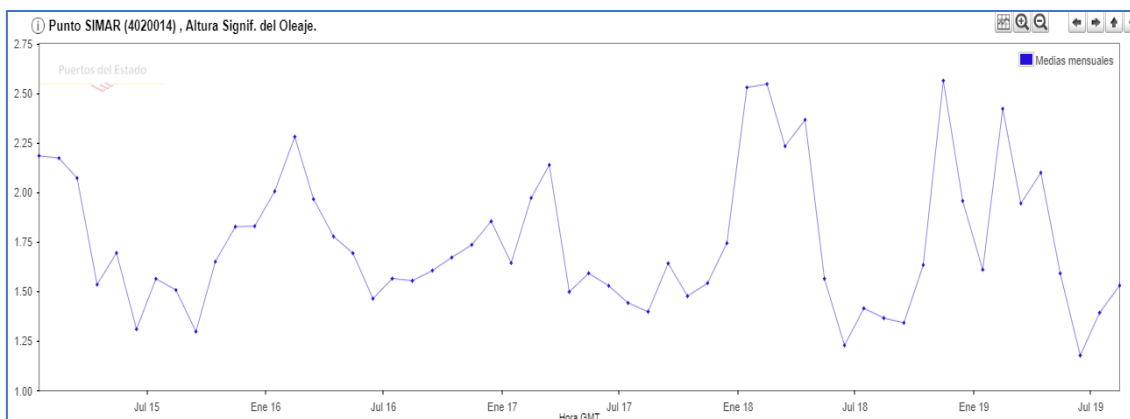


Figura 8. Gráfica de altura significativa del oleaje entre 2015 y 2019 (Fuente: Puertos del Estado)

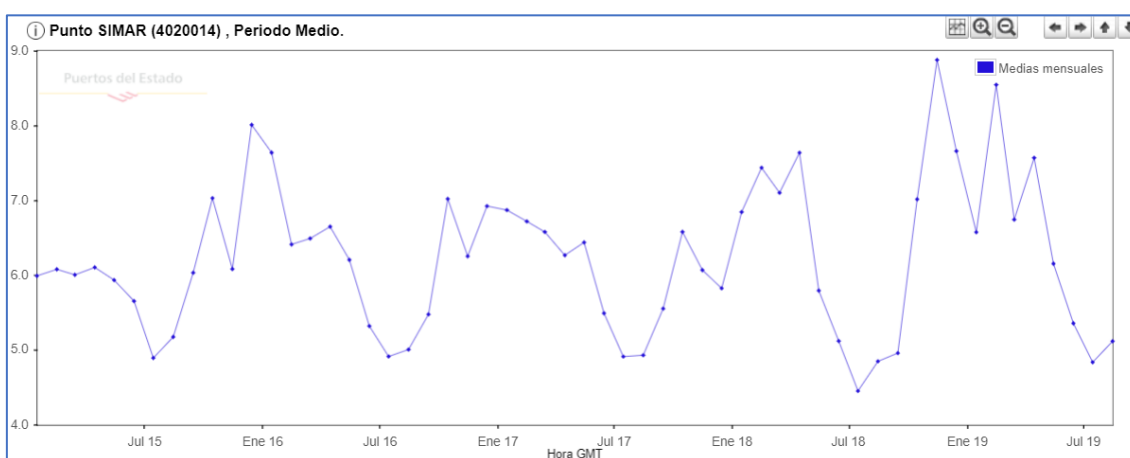


Figura 9. Gráfica de periodo medio entre 2015 y 2019 (Fuente: Puertos del Estado)

4.2. Selección del sistema undimotriz

La selección de un sistema undimotriz no es una tarea sencilla como para otras energías renovables, sobre todo en cuanto al aspecto económico del mismo. Para la búsqueda de un dispositivo se debe tener en cuenta principalmente que sea funcional en la ubicación elegida, es decir, que sea capaz de convertir olas entre uno y tres metros, y que tanto sus dimensiones como estructura no supongan un impacto medio ambiental considerable.

Uno de los países más desarrollados en esta energía es el Reino Unido ya que sus costas presentan unas características muy favorables para el oleaje. En un principio, es uno de los referentes en la realización de este proyecto, ya que presenta unos estudios bastante avanzados en esta tecnología. Es uno de los países pioneros a nivel europeo, no

obstante, la gran mayoría de prototipos que se han llevado a escala real no han logrado imponerse al resto de energías renovables. Para poder convertir un sistema undimotriz en un dispositivo real es necesario realizar una serie de pasos: primero una investigación previa en instalaciones especializadas, tras esto realizar pruebas a un prototipo a escala reducida y luego a tamaño real, por último y con ello lo más importante es la explotación comercial. Tanto los avances tecnológicos como analíticos del desarrollo de esta energía se pueden apreciar en recursos como EMEC (The European Marine Energy Center LTD)

Un ejemplo de un dispositivo que se encuentra desarrollándose en esas costas es el *Oyster*, en el norte de Irlanda. Las dimensiones que presenta son bastante considerables trabajando con potencias entre 300 y 600kW. El funcionamiento consiste en captar el movimiento oscilatorio de las olas mediante unos pistones que aumentarían la presión al agua que luego se transformaría en energía eléctrica.

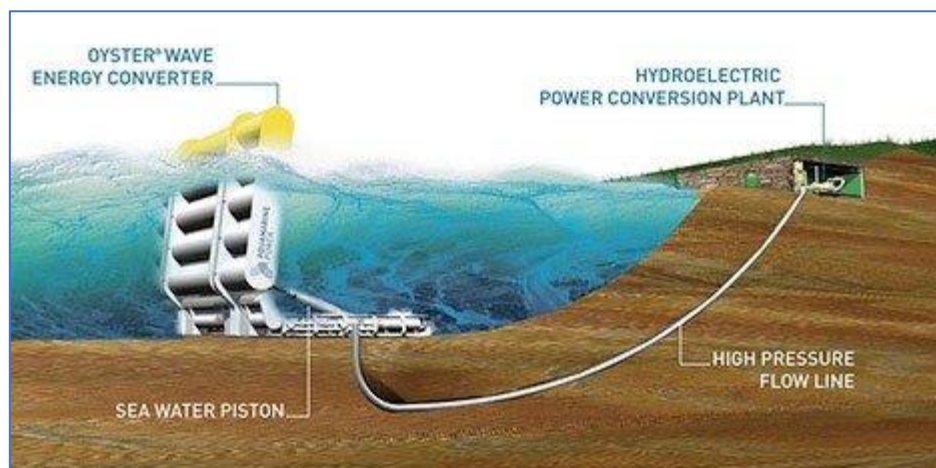


Figura 10. Dispositivo Oyster (Fuente: <http://www.aquamarinepower.com/>)

Tecnologías como el ejemplo anterior se encuentran repartidas en diferentes puntos del mundo, que no solo se desarrollarían cerca de la costa si no que existen dispositivos de mar adentro. Uno de los más destacados es el sistema de boya, el cual tiene un dispositivo de conversión totalmente sumergido que mediante el movimiento de expansión y contracción provocado por la ola se transformaría por un sistema hidráulico. Un ejemplo de ello es el dispositivo *Powerbuoy* desarrollado por Ocean Power Technologies en Estados Unidos. No obstante, en este caso el sistema hidráulico aprovecharía el movimiento que bombearía aceite a alta presión para accionar el

generador eléctrico sumergido. Este sistema presenta varios inconvenientes, uno de ellos es el fluido de trabajo que utiliza que es el aceite, por lo que si se produce una fuga afectaría notablemente al entorno. Además, el sistema de cableado por el fondo marino debe tener un estudio para que su efecto no sea perjudicial para la fauna marina y que en casos meteorológicos extremos se desactivase.



Figura 11. Dispositivo PowerBuoy (Fuente: <https://www.oceanpowertechnologies.com/>)

Por otro lado, en España también se han desarrollado varios proyectos relacionados con la energía undimotriz, pero su explotación no es tan relevante como en otros países. Las costas más destacadas que presenta se encuentran en Galicia, el País Vasco, Cantabria y Canarias. La gran mayoría de dispositivos que se han dispuesto no han sido de gran rentabilidad, no obstante, existen empresas que han apostado por el desarrollo de esta fuente energética como es el caso de Rotary Wave S.L ubicada en la Comunidad Valenciana.

El dispositivo seleccionado es del proyecto *Butterfly* de la empresa Rotary Wave S.L. Esta empresa creada en mayo de 2014 se caracteriza por dar soluciones innovadoras para el desarrollo sostenible en el sector de la generación de energía renovable, obteniendo electricidad y agua desalinizada a partir de olas y corrientes del agua.



Figura 12. Rotary Wave S.L.

El proyecto que realiza se basa en el crecimiento y puesta en el mercado de un sistema innovador de obtención de energía eléctrica a partir de la energía contenida en el oleaje oceánico. El objetivo general está centrado en el desarrollo, demostración y posterior comercialización de un sistema eficiente que aproveche la energía de las olas para producir electricidad sostenible a un coste competitivo. La solución que aporta este diseño es un sistema que produce energía azul, y pretende integrarse junto otras energías renovables que proveen de electricidad a las zonas costeras.

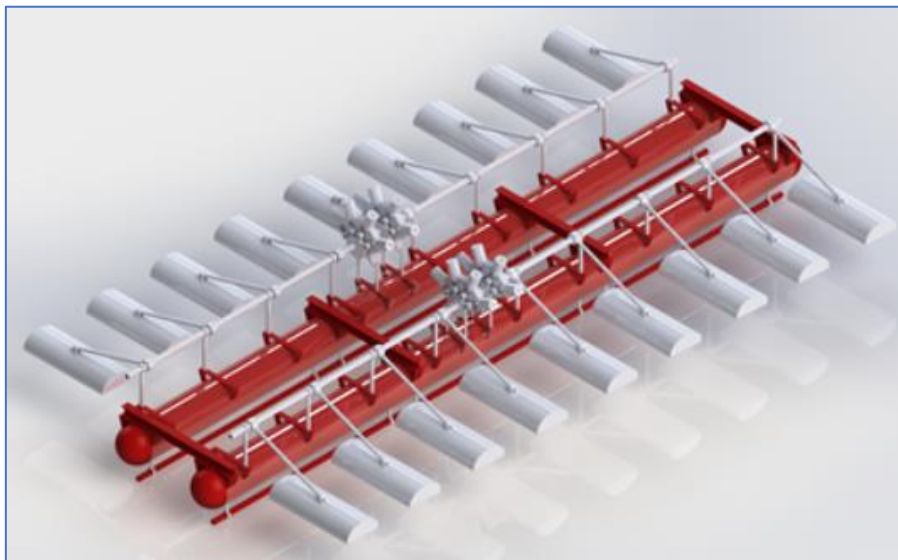


Figura 13. Diseño de la maqueta Butterfly (Fuente: Rotary Wave)

El sistema se compone de un convertidor de olas (WEC) que captura la energía de las olas, y de un sistema *Power Take Off* (PTO), que convierte esa energía en electricidad. Este carácter innovador del proyecto *Butterfly* maximizará la eficiencia de captura y de

conversión. El mercado potencial incluye regiones costeras, grandes islas conectadas a red, pero también las pequeñas islas y comunidades costeras aisladas que sean totalmente dependientes del diésel generador y estén expuestos a la volatilidad del precio del combustible, a frecuentes derrames de aceites y a altos costes de operación y mantenimiento.

El dispositivo *Butterfly* como se puede observar en la Figura 11 está compuesto por tres módulos y cada uno de ellos por tres pares de flotadores, hasta un total de nueve pares. Esta disposición facilita las tareas de mantenimiento y reparación cuando se deban llevar a cabo. Las medidas totales serían de 36 metros de largo y 6 metros de ancho, que serían en lenguaje náutico 36 metros de eslora y 6 metros de manga, no obstante, en la imagen aparece la maqueta del dispositivo que se encuentra a escala 1:14. Además destacar que las dimensiones no son definitivas y se adaptarán para su incorporación en el diseño de la instalación de desalación.

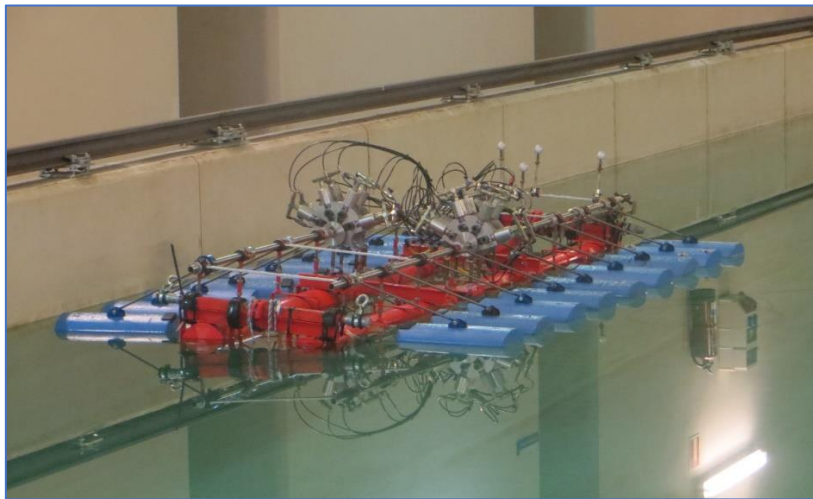


Figura 14. Dispositivo Butterfly a escala 1.14

El convertidor de olas (WEC) sería toda la estructura de color rojo y el sistema de flotadores que se observan en la Figura 12, los cuales se encargarían de la captación del movimiento que produce el oleaje. El ángulo que formaría el flotador con la estructura permite obtener la energía, cuanto mayor sea más cantidad de energía produciría. Este factor tiene mucha relevancia en el avance de esta tecnología y estaría en fase de evolución que posibilite una mejor eficiencia.

La estructura del dispositivo es de acero al carbono recubierto por una pintura epoxi de color rojo, la cual ofrece un efecto antiincrustante. Este recubrimiento es común su uso en barcos ya que posee varios beneficios al estar expuesto al mar, entre ellos destacar la ralentización del crecimiento de organismos marinos que se hayan adherido, actúa como una barrera contra la corrosión, y mejora el flujo del agua a su alrededor. Su mantenimiento se puede realizar hasta un máximo cada cinco años, pero es recomendable una supervisión más periódica cada dos o tres meses con un equipo adecuado de buzos. En cuanto a los flotadores se encuentran hechos de acero inoxidable ya que son unas de las piezas más importantes del dispositivo, permitiendo que sus propiedades interfieran lo mínimo en la captación del oleaje. El resto de las partes del dispositivo son de un acero más común como los brazos que unen los flotadores con la estructura.

El sistema *Power Take Off* (PTO) englobaría las dos bombas *Smart Pump* acopladas al dispositivo convertidor de olas, que su diseño permite modificarla para adaptarla a cualquier circunstancia que se desee, y el sistema que transformaría a energía eléctrica. La bomba hidráulica como se puede observar en la Figura 13 se asemeja a una bomba hidráulica de pistones radiales, no obstante, este diseño como indica su nombre es una bomba inteligente lo cual permite obtener la totalidad de la energía captada por los flotadores en sus movimientos ascendentes y descendentes al paso de las olas.

Además, posee una característica que la hace única, ya que es capaz de rotar a velocidades tan pequeñas sin pérdida de fluido que permiten a su vez no perder eficiencia. El objetivo es la obtención de agua a alta presión y con un caudal bajo, que en un proceso posterior se transformaría mediante un mecanismo hidráulico en energía eléctrica.



Figura 15. Diseño de la bomba Smart Pump (Fuente: Rotary Wave)

La bomba está compuesta por dos aros en los que se encuentran varios pistones y va montada con su eje longitudinal en sentido perpendicular al eje longitudinal de la propia bomba. En el proyecto *Butterfly* se han colocado dos bombas a la mitad de la estructura, pero su diseño ha sido modificado. Se ha optado por distribuir la bomba con un único aro, no obstante, se ha dividido 180° y se ha situado al lado del mismo. Por este motivo en las imágenes se observa un diseño parecido, aunque no se trata del mismo.

Cabe destacar que esto ha sido posible tras numerosas pruebas por la propia empresa y que emplean un diseño propio, permitiéndoles dichos ajustes. Además, Rotary Wave S.L. cuenta con un canal olas propio para poder realizar cualquier experimento y obtener el mejor aprovechamiento de la energía de las olas.



Figura 16. Canal de olas de Rotary Wave

Los datos sobre este dispositivo son pertenecientes a unas pruebas que se realizaron en Ferrol en el año 2018, en el que se han obtenido varias curvas de potencia y tablas que muestran los resultados realizados.

Las Figuras 15 y 16 presentan los resultados de potencia con la presión obtenida con el dispositivo fijado al fondo. El estudio se ha realizado a partir de la maqueta a escala 1:14 y luego se ha calculado linealmente hasta el tamaño real a 1:1. Además se han utilizado tres módulos para el análisis, es decir, las dos estructuras con nueve pares de flotadores en total.

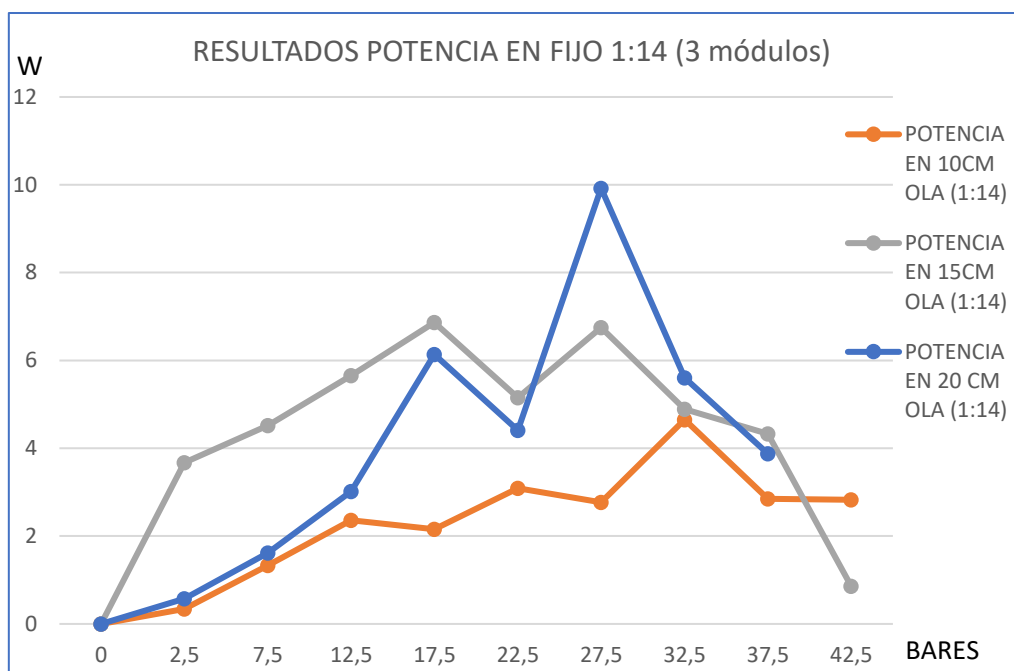


Figura 17. Resultados Potencia en fijo para 1:14

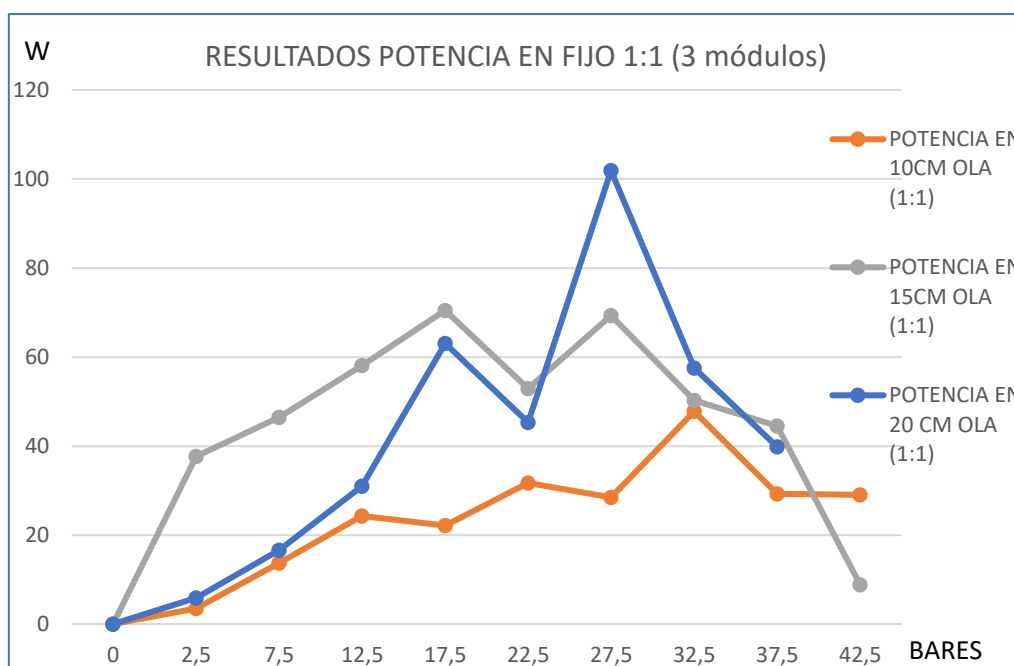


Figura 18. Resultados Potencia en fijo para 1:1

Por otro lado, en la Figura 17 se muestra las dos líneas de tendencia de potencia según la altura significativa del oleaje, desde la potencia obtenida de forma experimental hasta la potencia que se obtendría realmente en el dispositivo.

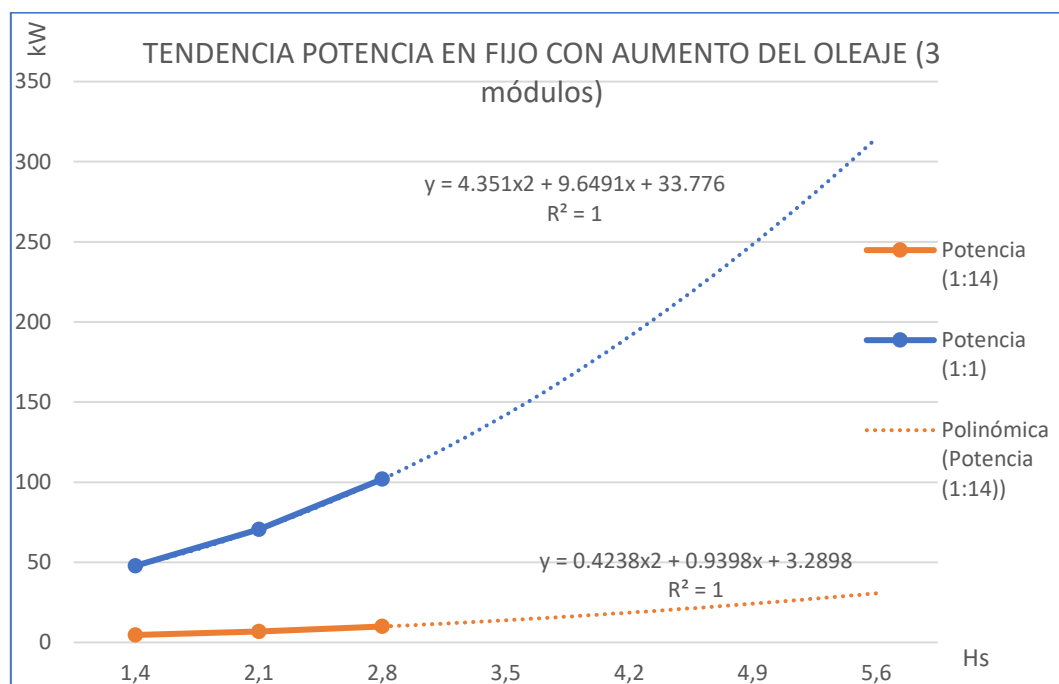


Figura 19. Tendencia Potencia en fijo con aumento del oleaje

De esta manera, los resultados de las pruebas de potencia con el dispositivo fijo y con los tres módulos se recogería en la siguiente tabla:

Tabla 3. Extrapolación de la potencia en fijo

FIJO POTENCIA EXTRAPOLACIÓN REGIMEN OLEAJE (3 módulos)								
H Ola	POT 1:14 W	POT 1:1 KW	H Ola	POT 1:14 W	POT 1:1 KW	H Ola	POT 1:14 W	POT 1:1 KW
0.1	3.3880	34.7851	2.1	7.1323	73.2284	4.1	14.2670	146.4814
0.2	3.4947	35.8805	2.2	7.4085	76.0644	4.2	14.7127	151.0578
0.3	3.6098	37.063	2.3	7.6932	78.9873	4.3	15.1670	155.7212
0.4	3.7335	38.3325	2.4	7.9864	81.9973	4.4	15.6296	160.4716
0.5	3.8656	39.6890	2.5	8.2880	85.0943	4.5	16.1008	165.3091
0.6	4.0062	41.1325	2.6	8.5981	88.2783	4.6	16.5804	170.2336

0.7	4.1553	42.6631	2.7	8.9167	91.5493	4.7	17.0686	175.2451
0.8	4.3128	44.2807	2.8	9.2438	94.9074	4.8	17.5651	180.3437
0.9	4.4788	45.9853	2.9	9.5793	98.3525	4.9	18.0702	185.5292
1	4.6534	47.7769	3	9.9234	101.8846	5	18.5838	190.8018
1.1	4.8363	49.6556	3.1	10.2758	105.5037	5.1	19.1058	196.1614
1.2	5.0278	51.6212	3.2	10.6368	109.2099	5.2	19.6363	201.6081
1.3	5.2277	53.6739	3.3	11.0063	113.0030	5.3	20.1752	207.1417
1.4	5.4361	55.8137	3.4	11.3842	116.8833	5.4	20.7227	212.7624
1.5	5.6530	58.0404	3.5	11.7706	120.8505	5.5	21.2786	218.4701
1.6	5.8784	60.3542	3.6	12.1655	124.9047	5.6	21.8430	224.2649
1.7	6.1122	62.7550	3.7	12.5688	129.0460	5.7	22.4159	230.1466
1.8	6.3545	65.2428	3.8	12.9807	133.2743	5.8	22.9972	236.1154
1.9	6.6053	67.8177	3.9	13.4010	137.5896	5.9	23.5870	242.1712
2	6.8646	70.4795	4	13.8298	141.9920	6	24.1854	248.3141

(Fuente: Rotary Wave)

De la misma manera se ha analizado para el mismo caso que el anterior, pero con el dispositivo en flotante, es decir, sin estar fijado. Además, se muestran diferentes curvas de potencia dependiendo de la cantidad de módulos que se utilice, siendo cada uno tres pares de flotadores. Las gráficas muestran los vatios frente a los bares que se obtienen del dispositivo convertidor.

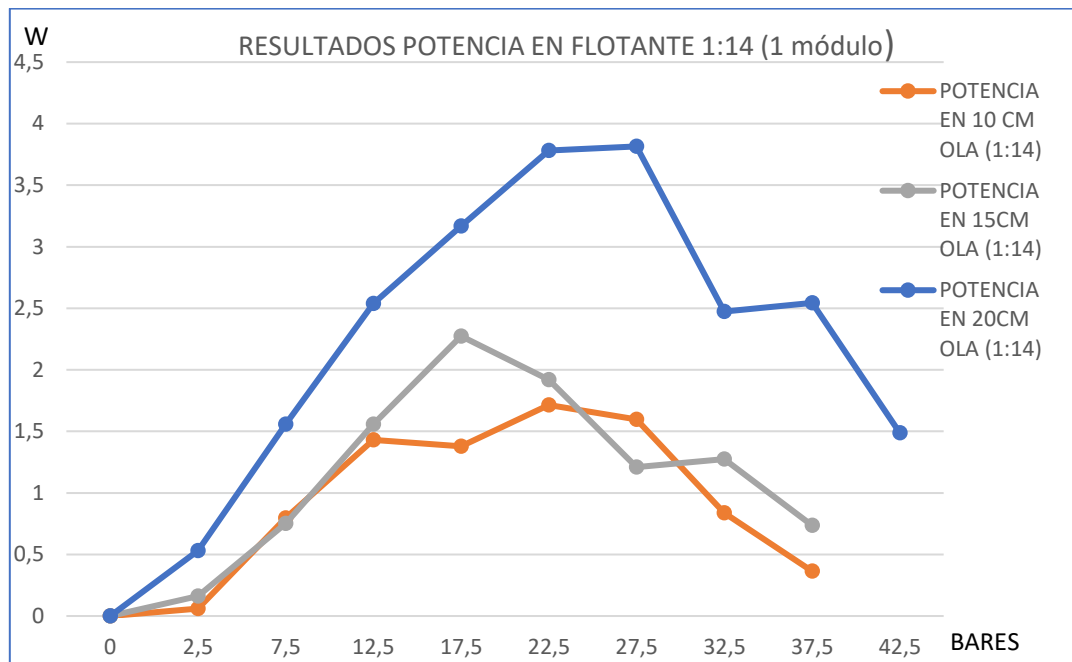


Figura 20. Resultados Potencia en flotante para 1:14 con 1 módulo

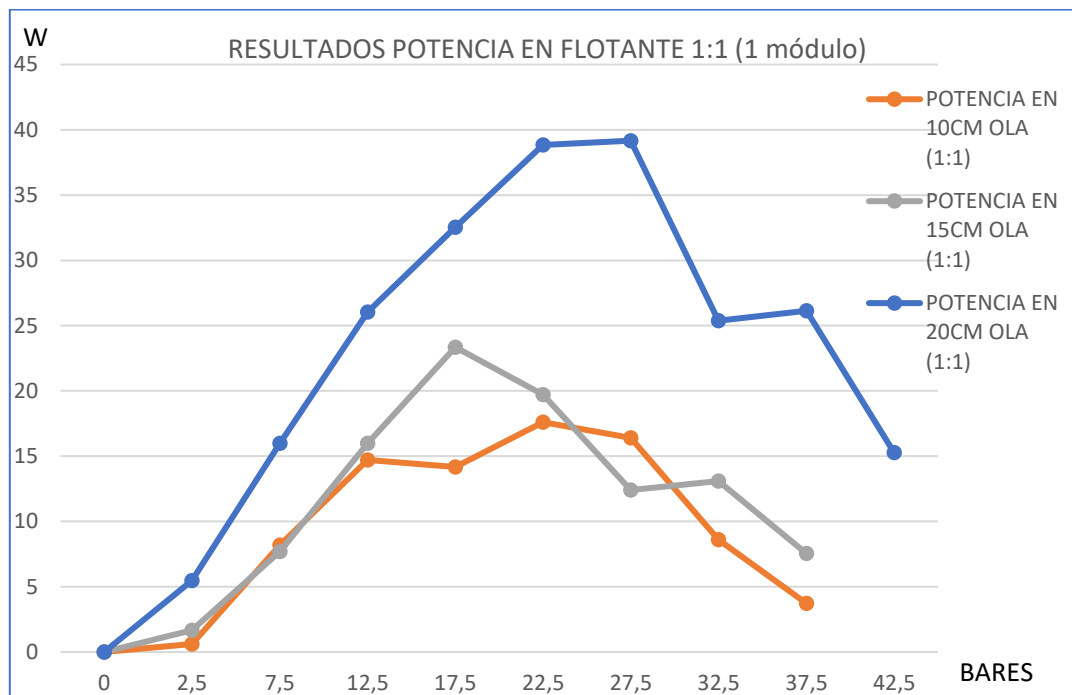


Figura 21. Resultados Potencia en flotante para 1:1 con 1 módulo

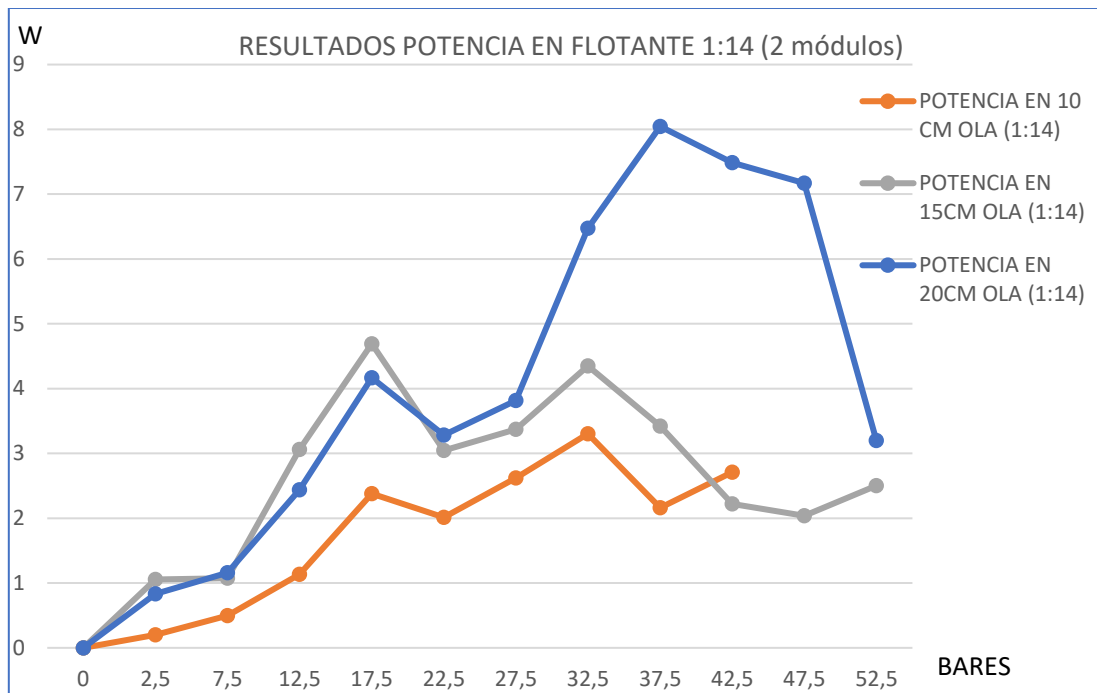


Figura 22. Resultados Potencia en flotante para 1:14 con 2 módulos

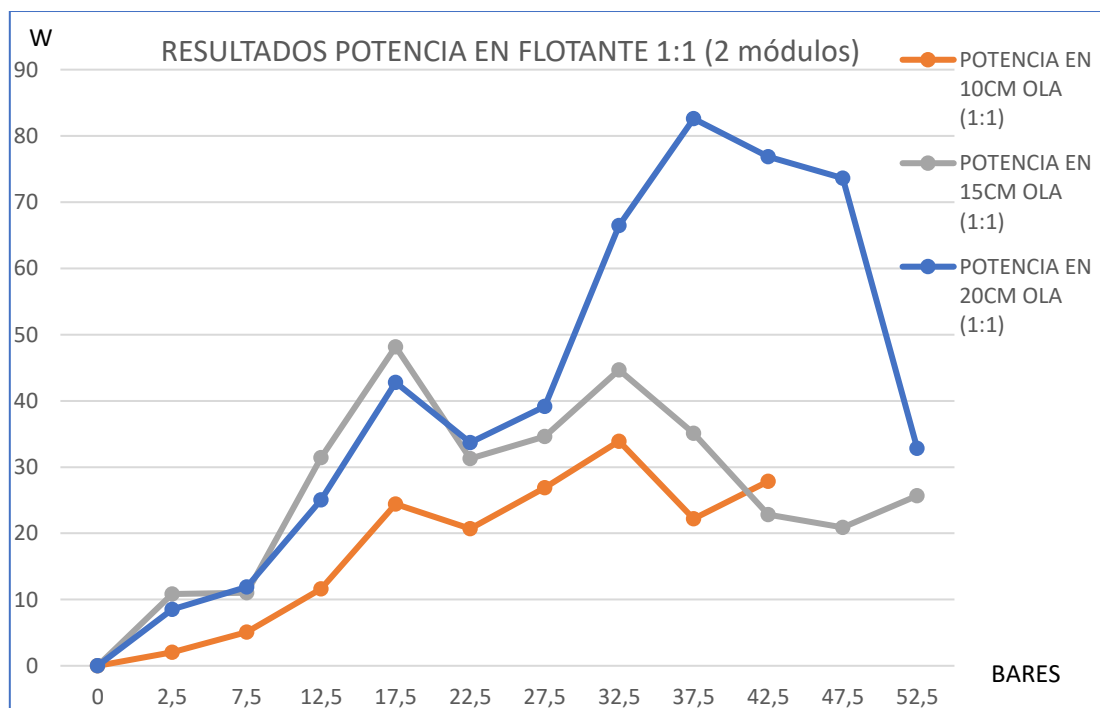


Figura 23. Resultados Potencia en flotante para 1:1 con 2 módulos

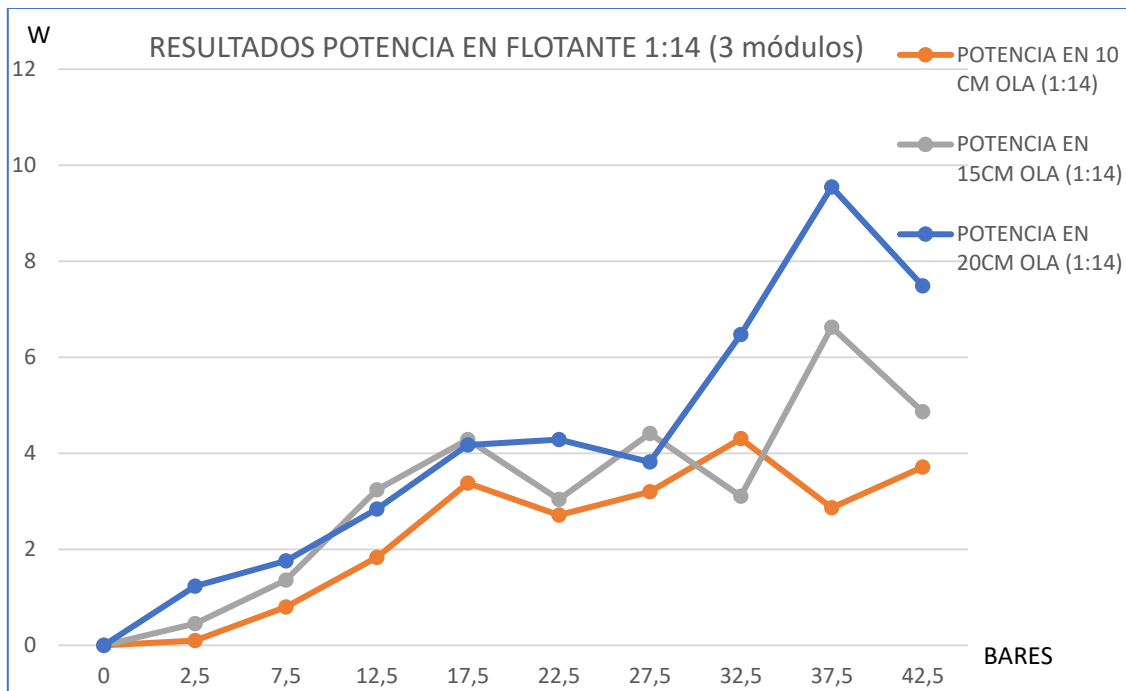


Figura 24. Resultados Potencia en flotante para 1:14 con 3 módulos

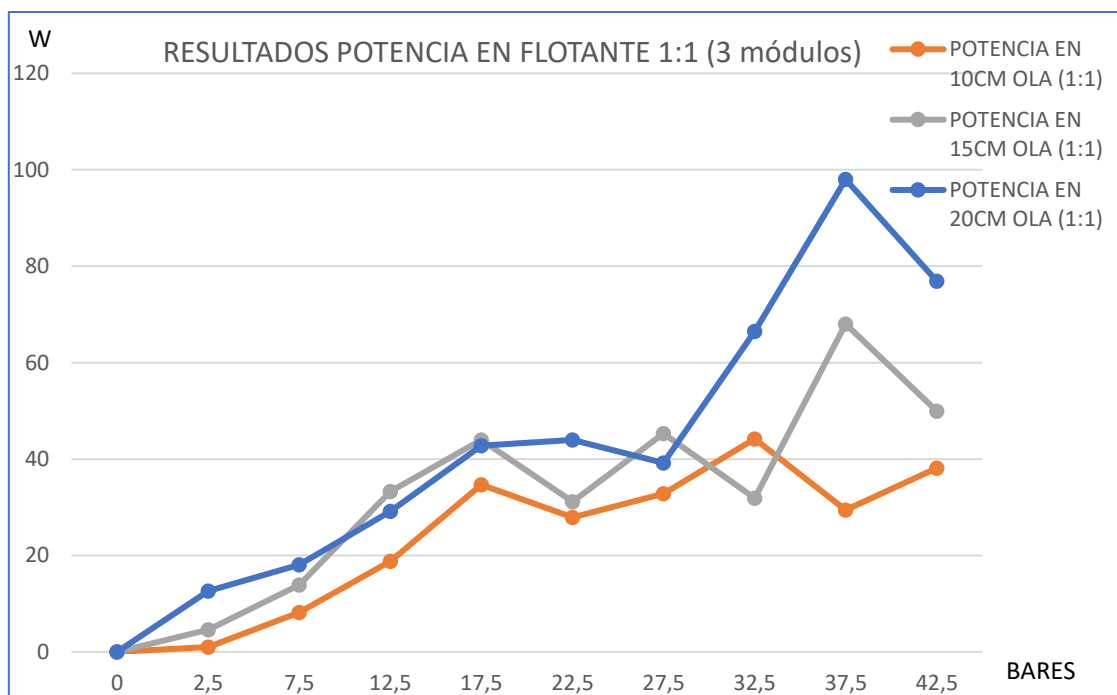


Figura 25. Resultados Potencia en flotante para 1:1 con 3 módulos

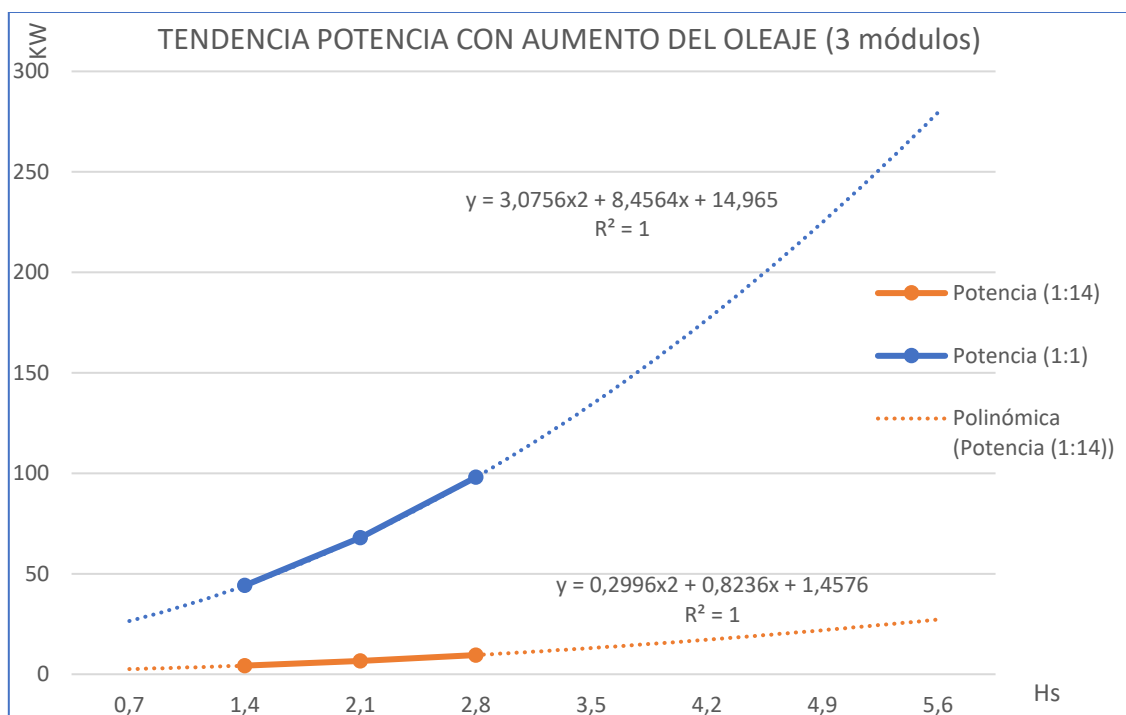


Figura 26. Tendencia Potencia en flotante con aumento de oleaje

De esta manera, los resultados de las pruebas de potencia con el dispositivo en flotante y con los tres módulos se recogería en la siguiente tabla:

Tabla 4. Extrapolación de la potencia en flotante

FLOTANTE POTENCIA EXTRAPOLACIÓN RÉGIMEN DE OLEAJE (3 módulos)								
H Ola	POT 1:14 W	POT 1:1 KW	H Ola	POT 1:14 W	POT 1:1 KW	H Ola	POT 1:14 W	POT 1:1 KW
0.1	1.5429	15.8413	2.1	4.5083	46.2868	4.1	9.8706	101.3370
0.2	1.6343	16.7793	2.2	4.7195	48.4549	4.2	10.2016	104.7354
0.3	1.7316	17.7787	2.3	4.9367	50.6846	4.3	10.5386	108.1953
0.4	1.8349	18.8396	2.4	5.1599	52.9758	4.4	10.8816	111.7167
0.5	1.9443	19.9621	2.5	5.3891	55.3285	4.5	11.2307	115.2997

0.6	2.0596	21.1460	2.6	5.6242	57.7426	4.6	11.5856	118.9441
0.7	2.1809	22.3915	2.7	5.8654	60.2184	4.7	11.9466	122.6500
0.8	2.3082	23.6985	2.8	6.1125	62.7556	4.8	12.3136	126.4175
0.9	2.4415	25.0669	2.9	6.3656	65.3543	4.9	12.6866	130.2465
1	2.5808	26.497	3	6.6248	68.0146	5	13.0656	134.137
1.1	2.7260	27.9885	3.1	6.8899	70.7363	5.1	13.4505	138.0889
1.2	2.8773	29.5415	3.2	7.1610	73.5196	5.2	13.8415	142.1025
1.3	3.0346	31.1560	3.3	7.4381	76.3644	5.3	14.2384	146.1775
1.4	3.1978	32.8321	3.4	7.7212	79.2706	5.4	14.6413	150.3140
1.5	3.3671	34.5697	3.5	8.0103	82.2385	5.5	15.0503	154.5121
1.6	3.5423	36.3687	3.6	8.3053	85.2678	5.6	15.4652	158.7716
1.7	3.7235	38.2293	3.7	8.6064	88.3586	5.7	15.8861	163.0927
1.8	3.9107	40.1514	3.8	8.9135	91.5109	5.8	16.3130	167.4753
1.9	4.1039	42.1350	3.9	9.2265	94.7248	5.9	16.7459	171.9193
2	4.3032	44.1802	4	9.5456	98.0002	6	17.1848	176.425

(Fuente: Rotary Wave)

En este caso, se puede observar que la potencia ha disminuido con respecto al caso anterior con el dispositivo en fijo. Esto se debe a que al no estar sujeto el ángulo que se obtendría de los flotadores sería menor por lo tanto la potencia disminuiría.

En la Figura 25 se muestran los resultados obtenidos de la potencia con el dispositivo en flotante que varía según el número de flotadores, donde aumenta linealmente con la cantidad. Cabe destacar que el diseño del dispositivo se ha realizado con la idea de tener en su interior dos olas continuas para que se mantenga trabajando constantemente. No obstante, el trabajo de los últimos flotadores será menor ya que el

ángulo que se obtendría de ellos sería el más pequeño de todos, incluso su trabajo podría ser nulo en algunas ocasiones.

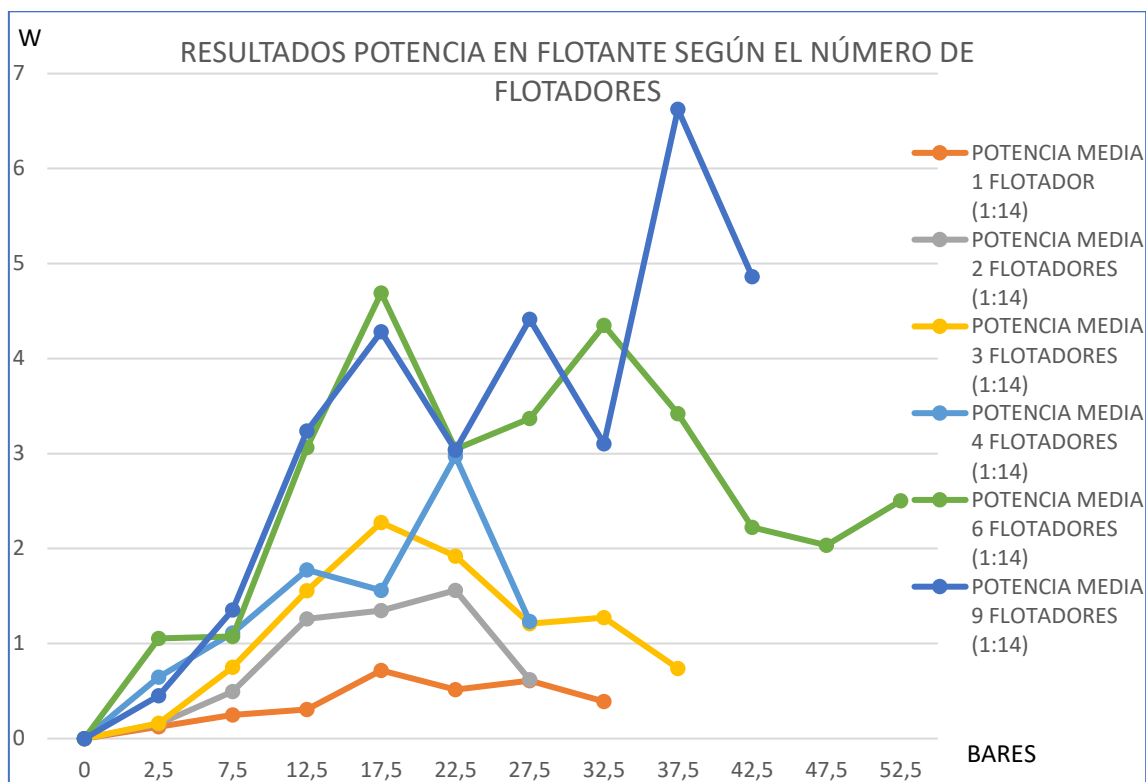


Figura 27. Resultados Potencia en flotante según el número de flotadores

Según los resultados obtenidos de potencia se observa que el dispositivo en fijo presenta una potencia superior a la de en flotante, por lo que se seleccionará el que se encuentra sujeto para la instalación de desalación. En la Tabla 2 según la altura significativa del oleaje seleccionada de 1,7 metros equivaldría a una potencia de 62,76 kW. La potencia generada que se muestra se aproxima bastante a la real, ya que en la propia maqueta se incluyen la pérdida producida por la bomba hidráulica y por el circuito hidráulico, no obstante, faltaría añadir las pérdidas de la transformación eléctrica final. En este proyecto se utilizará directamente el dato ofrecido por la empresa para el cálculo de potencia necesaria.

En cuanto al primer análisis se observa que la potencia no alcanza los 225,82 kW requeridos por lo que se proponen varias soluciones para que la instalación de desalación sea alimentada por energía undimotriz.

Como una solución válida se puede optar por la colocación de un mayor número de dispositivos *Butterfly* con las medidas estándar establecidas. Para ello se tendrían que utilizar hasta un total de cuatro dispositivos cuya potencia final sería de 251,04 kW, lo cual cubriría la demanda. Sin embargo, por los componentes del dispositivo no es recomendable ya que no sería viable desde un punto de vista comercial. Se trata de una tecnología que se encuentra en proceso de mejora por lo que una solución exacta que sirva para este proyecto en concreto es de una gran dificultad.

Otra solución más apta por la que se ha seleccionado para la instalación es el aumento de módulos en el dispositivo, lo que aumentaría la longitud y la cantidad de flotadores. La potencia sería proporcional a la cantidad de flotadores que se añadirían, de modo que se utilizarán como base los datos de la Tabla 2. El número de flotadores que permitirían abastecer la instalación sería de 33 pares de flotadores, no obstante, cada módulo cuenta con tres pares de flotadores siendo el resultado de 36 pares de flotadores. La potencia sería la misma que en el caso anterior, pero en este caso se tendría un único dispositivo de 144 metros de longitud que abastecería por completo e incluso habría un exceso. Por otro lado, si el impacto que generaría el dispositivo fuese muy perjudicial para la localización, también sería viable el estudio de dos dispositivos de 72 metros de longitud cada uno.

El sistema que aumenta la presión del agua y que la convierte en energía eléctrica, es decir, el PTO tiene pérdidas que no se han concretado en el diseño del proyecto por lo que sería difícil que ocurra un exceso de energía en la instalación. Además, únicamente se ha tomado el consumo de las zonas de producción de agua explicadas en el Anexo II, por lo que faltarían el resto de consumos eléctricos de la planta. En este proyecto no se considerarían ni se diseñaría un sistema que lo solucione, sin embargo, si ocurriese un exceso habría que aprovecharlo o disiparlo teniendo en cuenta la normativa vigente. Una solución en esta instalación sería la de almacenarla los meses en los que la energía producida sea superior a la consumida y utilizarla cuando se produzca un déficit. En el

mes de febrero se debería utilizar esta metodología ya que se produciría una parada de producción, pero el sistema undimotriz podría continuar funcionando.

Por otro lado, la energía undimotriz captada del oleaje por el dispositivo no se puede asegurar que se mantenga con la misma generación de potencia durante la producción de desalación, si no que al ser una energía renovable sufre de cierta variabilidad. No obstante, la energía de las olas es una de las más constantes y más previsible debido al conocimiento actual sobre mareas, efecto del viento e incluso influencia del sol.

El problema que se encontraría en la gestión energética de la instalación sería que se produjese un déficit debido a que el dispositivo *Butterfly* no sea capaz de abastecer por completo la planta. Para ello se deberá considerar consumir directamente de la red eléctrica la cantidad necesaria como suplemento a la energía renovable principal. Se trataría de un sistema de respaldo de energía que permitiría una constancia en la producción. Por el contrario, si el sistema estuviese conectado a la red al realizar el abastecimiento completo de la planta del sistema undimotriz, se debería diseñar un equipo que permita aprovechar el exceso de energía. Si no fuese el caso se vertería la energía directamente a la red cuando hubiera exceso, lo cual resultaría la medida menos productiva. Se realizaría según la Ley 24/2013, del 26 de diciembre, del Sector Eléctrico, que establece una prioridad en todos los vertidos de fuentes renovables.

Destacar como una posible opción del dispositivo, en cuanto a su utilización en plantas desaladoras, como una etapa añadida en el proceso de ósmosis inversa. Las bombas que tiene acopladas en la estructura generarían agua a presión, la cual en procesos posteriores se transformaría en energía eléctrica mediante una máquina hidráulica, un ejemplo sería una turbina de Wells, aunque no se encuentre en uso actualmente. Asimismo, la solución aportada sería la de utilizar dicha agua presión como método de captación en la planta desaladora. Esto permitiría que la diferencia de presiones a la entrada y salida de la bomba de alta presión disminuya, lo que conlleva a una disminución considerable del consumo energético de uno de los equipos que más requiere. De este modo, la viabilidad del proyecto cambiaría de manera significativa ya que propondría un método bastante sostenible en zona donde el oleaje sea abrupto y los recursos hídricos limitados.

5. Normativa

El sistema legislativo en España sobre la energía undimotriz no se encuentra totalmente desarrollado actualmente, aunque consta en el Plan de Energías Renovables 2011-2020 (PER) del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. El PER tiene como objetivo principal conseguir que en el año 2020 al menos el 20% del consumo final bruto de energía en España proceda de las fuentes renovables. No obstante, hasta la fecha la energía proveniente de las olas no dispondrá de plantas industriales a corto o medio plazo dados los inconvenientes que presentan los dispositivos de captación y su comportamiento en el medio marino.

Uno de los problemas que más dificultades presenta es el elevado coste de instalación y producción del sistema undimotriz, siendo su viabilidad comercial nula. Además, la tecnología se encuentra aún en proceso de desarrollo por lo que todavía debe demostrar su funcionalidad y rentabilidad en el futuro. Por lo tanto, al no estar afianzado en las fuentes renovables no existe una normativa específica. Esto conlleva que los proyectos de esta energía sufran retrasos debido a la gran cantidad de trámites burocráticos necesarios.

A la hora de instalar un sistema undimotriz se deben tener en cuenta varios aspectos normativos y administrativos. El órgano principal para las actuaciones en el medio marino es la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar del Ministerio para la Transición Ecológica. En él estarán establecidas las normativas sobre las intervenciones en la costa, los deslindes y usos, y la protección del medio marino.

El Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT) se encuentra directamente individualizado en la Constitución que señala la zona marítimo-terrestre, las playas, las aguas interiores, el mar territorial y los recursos naturales de la zona económica y la plataforma continental precisado en la Ley de Costas.

Por otro lado, el dispositivo undimotriz al estar en el mar deberá estar sujeto a la normativa marítima correspondiente, como puede ser el tipo de anclaje o la señalización.

En el Real Decreto 436/2004, de Metodología del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, los sistemas

undimotrices se equiparan con el sector eólico sin tener en cuenta el grado de dificultad que presenta su desarrollo frente a otra ya plenamente productiva.

En resumen, la normativa sobre la energía undimotriz se encuentra en un estado muy primario hasta que futuras actividades de I+D+i consigan reducir los costes de los equipos y mejoren su viabilidad comercial.

