



Universidad
de La Laguna

Escuela Superior de
Ingeniería y Tecnología

Trabajo de fin de grado

ESTUDIO DE UNA PLANTA DE DESALACIÓN ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Irina Amparo López Hernández

Tutor: Vicente José Romero Ternero



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TITULACIÓN: GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ÍNDICE GENERAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DE UNA PLANTA DE DESALACIÓN ALIMENTADA MEDIANTE
ENERGÍA EÓLICA

AUTOR: IRINA AMPARO LÓPEZ HERNÁNDEZ

TUTOR: VICENTE JOSÉ ROMERO TERNERO

Memoria

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Objeto..... | 13 |
| 1.1. | Abstract..... | 13 |
| 2. | Alcance..... | 14 |
| 3. | Antecedentes..... | 16 |
| 3.1. | Situación de los recursos hídricos a nivel mundial..... | 16 |
| 3.2. | Situación hidrológica general en Canarias..... | 17 |
| 3.3. | Desalinización del agua..... | 20 |
| 3.3.1. | Desalación por ósmosis inversa..... | 21 |
| 3.4. | La desalación en Fuerteventura..... | 24 |
| 3.5. | Energía eólica..... | 26 |
| 3.5.1. | El viento..... | 27 |
| 3.5.2. | Mapas eólicos y emplazamientos óptimos..... | 30 |
| 3.5.3. | El aerogenerador..... | 32 |
| 3.5.4. | Utilización de energía eólica para la desalación..... | 33 |
| 3.5.5. | Aspectos ambientales..... | 34 |
| 4. | Normas y referencias..... | 38 |
| 4.1. | Disposiciones legales y normas aplicadas..... | 38 |
| 4.2. | Bibliografía..... | 38 |
| 4.3. | Programas de cálculo..... | 40 |
| 5. | Definiciones y abreviaturas..... | 41 |
| 5.1. | Definiciones..... | 41 |

| | |
|---|----|
| 5.2. Abreviaturas..... | 41 |
| 6. Requisitos de diseño..... | 42 |
| 6.1. Emplazamiento..... | 42 |
| 6.2. Datos de partida..... | 43 |
| 6.2.1. Salinidad..... | 43 |
| 6.2.2. pH..... | 44 |
| 6.2.3. Temperatura..... | 44 |
| 6.2.4. Agua producida..... | 46 |
| 7. Análisis de soluciones..... | 46 |
| 7.1. Captación de agua de mar..... | 46 |
| 7.1.1. Toma de agua abierta..... | 47 |
| 7.1.2. Toma de agua cerrada..... | 48 |
| 7.1.3. Solución adoptada para la captación..... | 48 |
| 7.1.4. Bombas de captación..... | 49 |
| 7.2. Pretratamiento del agua de mar..... | 50 |
| 7.3. Proceso de desalación por ósmosis inversa..... | 51 |
| 7.3.1. Generalidades..... | 51 |
| 7.3.2. Bastidor de ósmosis inversa..... | 51 |
| 7.3.3. Recuperación de energía..... | 53 |
| 7.3.3.1. Turbocharger..... | 53 |
| 7.3.3.2. Intercambiador de presión..... | 54 |
| 7.3.3.3. Comparativa..... | 54 |
| 7.3.4. Bomba de alta presión..... | 55 |

| | |
|--|----|
| 7.3.5. Bomba booster..... | 56 |
| 7.4. Distribución de agua de mar..... | 56 |
| 7.4.1. Bombas de distribución..... | 57 |
| 7.5. Rechazo de salmuera..... | 58 |
| 7.6. Postratamiento del agua de mar..... | 59 |
| 7.7. Sistema eólico..... | 59 |
| 7.7.1. Recurso eólico..... | 59 |
| 7.7.2. Selección del aerogenerador..... | 62 |
| 7.7.3. Estudio del aprovechamiento energético..... | 64 |
| 8. Resultados finales..... | 66 |
| 8.1. Desalación..... | 66 |
| 8.1.1. Captación..... | 66 |
| 8.1.2. Pretratamiento..... | 66 |
| 8.1.3. Núcleo de desalación..... | 67 |
| 8.1.4. Rechazo de salmuera..... | 67 |
| 8.1.5. Distribución y postratamiento..... | 67 |
| 9. Conclusiones..... | 68 |

Anexos

| | | |
|----------|---|----|
| 1. | Dimensionado de la instalación desaladora..... | 11 |
| 1.1. | Dimensionado del núcleo de desalación..... | 11 |
| 1.1.1. | Elección de las membranas..... | 11 |
| 1.1.2. | Dimensionado del intercambiador de presión..... | 17 |
| 1.1.3. | Dimensionado de la bomba de alta presión..... | 23 |
| 1.1.4. | Dimensionado de la bomba Booster..... | 27 |
| 1.2. | Dimensionado del sistema de captación..... | 29 |
| 1.2.1. | Cálculo de pérdidas de carga..... | 32 |
| 1.2.1.1. | Cálculo de pérdidas de carga de la tubería de alimentación..... | 32 |
| 1.2.1.2. | Cálculo de pérdidas de carga en la tubería de captación..... | 35 |
| 1.2.1.3. | Cálculo de pérdidas de carga debidas a accesorios..... | 36 |
| 1.2.1.4. | Cálculo de pérdidas de carga debidas a la unión de la tubería de alimentación y las de captación..... | 37 |
| 1.2.2. | Elección de las bombas de captación..... | 37 |
| 1.3. | Dimensionado del sistema de distribución..... | 40 |
| 1.3.1. | Cálculo de pérdidas de carga..... | 40 |
| 1.3.1.1. | Cálculo de pérdidas de carga debido a la tubería de distribución..... | 40 |
| 1.3.1.2. | Cálculo de pérdidas de carga secundarias..... | 42 |
| 1.3.2. | Elección de la bomba de distribución..... | 42 |
| 1.4. | Dimensionado del sistema de rechazo de salmuera..... | 45 |
| 1.4.1. | Cálculo de pérdidas de carga..... | 45 |

| | | |
|----------|---|----|
| 1.4.1.1. | Cálculo de pérdidas de carga debido a tuberías..... | 45 |
| 1.4.1.2. | Cálculo de pérdidas de carga secundarias..... | 47 |
| 1.4.2. | Elección de la bomba de rechazo..... | 48 |
| 1.5. | Dimensionado del pretratamiento..... | 49 |
| 1.5.1. | Pretratamiento químico..... | 49 |
| 1.5.2. | Pretratamiento físico..... | 50 |
| 1.6. | Dimensionado del postratamiento..... | 50 |
| 1.7. | Consumo específico de la planta..... | 51 |
| 2. | Dimensionado del sistema eólico..... | 55 |
| 2.1. | Determinación del recurso eólico..... | 55 |
| 2.2. | Selección del aerogenerador..... | 59 |

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TITULACIÓN: GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

MEMORIA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DE UNA PLANTA DE DESALACIÓN ALIMENTADA MEDIANTE
ENERGÍA EÓLICA

AUTOR: IRINA AMPARO LÓPEZ HERNÁNDEZ

TUTOR: VICENTE JOSÉ ROMERO TERNERO

HOJA DE IDENTIFICACIÓN

TÍTULO DEL PROYECTO

ESTUDIO DE UNA PLANTA DE DESALACIÓN ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA

DATOS DEL PETICIONARIO

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

DIRECCIÓN: CAMPUS DE ANCHIETA. CAMINO SAN FRANCISCO DE PAULA, S/N. 38271, SAN CRISTÓBAL DE LA LAGUNA, TENERIFE, ESPAÑA.

TELÉFONO: +34 922 84 50 31

DATOS DEL AUTOR

AUTOR: IRINA AMPARO LÓPEZ HERNÁNDEZ

DNI: 54110287-G

DATOS DEL TUTOR

TUTOR: VICENTE JOSÉ ROMERO TERNERO

FECHA

JULIO 2016

Índice

| | |
|---|----|
| 1. Objeto | 13 |
| 1.1. Abstract | 13 |
| 2. Alcance | 14 |
| 3. Antecedentes | 16 |
| 3.1. Situación de los recursos hídricos a nivel mundial | 16 |
| 3.2. Situación hidrológica general en Canarias | 17 |
| 3.3. Desalinización del agua | 20 |
| 3.3.1. Desalación por ósmosis inversa | 21 |
| 3.4. La desalación en Fuerteventura | 24 |
| 3.5. Energía eólica | 26 |
| 3.5.1. El viento | 27 |
| 3.5.2. Mapas eólicos y emplazamientos óptimos | 30 |
| 3.5.3. El aerogenerador | 32 |
| 3.5.4. Utilización de energía eólica para la desalación | 33 |
| 3.5.5. Aspectos ambientales | 34 |
| 4. Normas y referencias | 38 |
| 4.1. Disposiciones legales y normas aplicadas | 38 |
| 4.2. Bibliografía | 38 |
| 4.3. Programas de cálculo | 40 |
| 5. Definiciones y abreviaturas | 41 |
| 5.1. Definiciones | 41 |
| 5.2. Abreviaturas | 41 |
| 6. Requisitos de diseño | 42 |
| 6.1. Emplazamiento | 42 |
| 6.2. Datos de partida | 43 |

| | | |
|----------|--|----|
| 6.2.1. | Salinidad | 43 |
| 6.2.2. | pH | 44 |
| 6.2.3. | Temperatura..... | 44 |
| 6.2.4. | Agua producida | 46 |
| 7. | Análisis de soluciones | 46 |
| 7.1. | Captación de agua de mar | 46 |
| 7.1.1. | Toma de agua abierta | 47 |
| 7.1.2. | Toma de agua cerrada..... | 48 |
| 7.1.3. | Solución adoptada para la captación | 48 |
| 7.1.4. | Bombas de captación..... | 49 |
| 7.2. | Pretratamiento del agua de mar | 50 |
| 7.3. | Proceso de desalación por ósmosis inversa..... | 51 |
| 7.3.1. | Generalidades..... | 51 |
| 7.3.2. | Bastidor de ósmosis inversa | 51 |
| 7.3.3. | Recuperación de energía | 53 |
| 7.3.3.1. | Turbocharger | 53 |
| 7.3.3.2. | Intercambiador de presión | 54 |
| 7.3.3.3. | Comparativa | 54 |
| 7.3.4. | Bomba de alta presión | 55 |
| 7.3.5. | Bomba booster..... | 56 |
| 7.4. | Distribución de agua de mar | 56 |
| 7.4.1. | Bombas de distribución | 57 |
| 7.5. | Rechazo de salmuera..... | 58 |
| 7.6. | Postratamiento del agua de mar..... | 59 |
| 7.7. | Sistema eólico | 59 |
| 7.7.1. | Recurso eólico | 59 |
| 7.7.2. | Selección del aerogenerador | 62 |

| | |
|---|----|
| 7.7.3. Estudio del aprovechamiento energético | 64 |
| 8. Resultados finales | 66 |
| 8.1. Desalación | 66 |
| 8.1.1. Captación | 66 |
| 8.1.2. Pretratamiento | 66 |
| 8.1.3. Núcleo de desalación | 67 |
| 8.1.4. Rechazo de salmuera..... | 67 |
| 8.1.5. Distribución y postratamiento..... | 67 |
| 9. Conclusiones | 68 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Disponibilidad global del agua versus la población (UNESCO) | 16 |
| Figura 2. Capacidad instalada de desalación operativa en 2010 por comunidades autónomas (m^3 /día de agua desalada) (MAGRAMA)..... | 17 |
| Figura 3. Distribución de los recursos hidrológicos en Canarias (hm^3 /año de agua) | 18 |
| Figura 4. Distribución de volúmenes de agua suministrados en Canarias según sectores (hm^3 /año de agua) | 19 |
| Figura 5. Estimación de costes de producción de agua de mar desalada mediante diferentes tecnologías (WADE) | 21 |
| Figura 6. Principio del proceso de ósmosis natural (Junta de Andalucía) | 22 |
| Figura 7. Principio del proceso de ósmosis inversa (Junta de Andalucía) | 22 |
| Figura 8. Esquema básico de una planta de desalación mediante ósmosis inversa. | 23 |
| Figura 9. Evolución del volumen de agua desalada en Fuerteventura con los años. | 25 |
| Figura 10. Crecimiento de la población de Fuerteventura | 25 |
| Figura 11. Crecimiento de la población de Puerto del Rosario | 26 |
| Figura 12. Potencia eólica anual instalada en el mundo (GWEC)..... | 27 |
| Figura 13. Rugosidad del terreno de la isla de Fuerteventura (ITC)..... | 28 |
| Figura 14. Rosa de los vientos para las coordenadas del emplazamiento (ITC)..... | 31 |
| Figura 15. Mapa eólico de la isla de Fuerteventura (ITC) | 31 |
| Figura 16. Elementos principales del interior de la góndola de un aerogenerador (ITC) | 33 |
| Figura 17. Contribución de los sistemas energéticos al calentamiento global (APPA) | 35 |
| Figura 18. Contribución de los sistemas energéticos a la contaminación por metales pesados (APPA)..... | 35 |
| Figura 19. Contribución de los sistemas energéticos al agotamiento de los recursos energéticos (APPA)..... | 36 |
| Figura 20. Rutas migratorias de las aves a nivel mundial (Birdlife International). | 37 |
| Figura 21. Referencia catastral de la parcela elegida (MINHAP) | 42 |
| Figura 22. Temperatura superficial media del agua de mar en las Islas Canarias (Puertos del Estado)..... | 45 |
| Figura 23. Temperaturas medias máximas y mínimas del agua de mar en las Islas Canarias (Puertos del Estado) | 45 |

| | |
|---|----|
| Figura 24. Ubicación aproximada de los pozos de captación | 49 |
| Figura 25. Medidas y peso de cada tubo de presión con membranas SWC4 MAX.. | 52 |
| Figura 26. Diferencia de cota entre el emplazamiento de la instalación y el lugar de colocación del depósito de distribución..... | 57 |
| Figura 27. Isóbata más cercana a la costa de Puerto del Rosario..... | 58 |
| Figura 28. Rosa de los vientos de frecuencias | 60 |
| Figura 29. Rosa de los vientos de velocidades..... | 61 |
| Figura 30. Distribución de Weibull a partir de los datos proporcionados por la IDAE | 62 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Dependencia de la desalación en cada isla | 19 |
| Tabla 2. Composición química del Océano Atlántico según el laboratorio Labaqua, para una muestra de mar tomada en la desaladora de Santa Cruz de Tenerife. | 43 |
| Tabla 3. Características físico-químicas y relativas a sustancias no deseables en el agua potable..... | 46 |
| Tabla 4. Rendimiento para el modelo de bomba de captación seleccionado..... | 49 |
| Tabla 5. Comparativa entre los consumos específicos de la instalación según el software IMSdesign para distintos sistemas de recuperación de energía | 54 |
| Tabla 6. Rendimientos para los distintos modelos de bomba de alta presión adecuados..... | 55 |
| Tabla 7. Rendimiento para el modelo de bomba Booster seleccionado..... | 56 |
| Tabla 8. Rendimientos para los distintos modelos de bomba de distribución adecuados..... | 57 |
| Tabla 9. Resumen de datos del recurso eólico proporcionados por el IDAE | 60 |
| Tabla 10. Factores de Weibull..... | 62 |
| Tabla 11. Modelos de aerogeneradores que se ajustan a la producción anual necesaria..... | 63 |
| Tabla 12. Factor de carga determinado para cada modelo de aerogenerador | 63 |

1. Objeto

El objeto de este proyecto se divide en dos propósitos principales. Por un lado, con la realización de este documento técnico, se pretenden reflejar los conocimientos adquiridos en las diferentes materias cursadas durante el desarrollo de los cuatro cursos del Grado en Ingeniería Mecánica mediante la realización de cálculos, manejo de normativa, reglamentos y datos y toma de decisiones ante las diferentes soluciones posibles que se puedan adoptar.

Por otro lado, se pretende definir el diseño de una planta desaladora de agua de mar por ósmosis inversa alimentada mediante energía eólica, centrando su estudio en el dimensionado de los principales elementos que conforman el núcleo de la planta, así como de los aerogeneradores que permitirán su abastecimiento energético, aprovechando el recurso eólico del que se dispone en el emplazamiento de la instalación. Una vez analizada la información facilitada por el peticionario, sobre las necesidades de abastecimiento de agua potable para una pequeña población en el Este de la isla de Fuerteventura, con el fin de cubrir la demanda de este recurso en dicha zona ante la escasez del mismo, se propone la instalación de una planta desaladora de 4000 m³/día de producción.

1.1. Abstract

The objective of this project is divided into two main purposes. On the one hand, with the fulfillment of this technical document, it is intended to reflect the knowledge acquired in the different subjects studied during the development of the four courses of the Degree in Mechanical Engineering by performing calculations, management of rules, regulations and data and taking decisions about the different possible solutions that can be adopted.

On the other hand, it is pretended to define the layout of a desalination plant of seawater by reverse osmosis powered with wind energy, focusing its study on the dimensioning of the main elements that make up the core of the plant and the wind turbines that will allow its energy supply, exploiting the wind resource that is available at the installation site. Having analyzed the information provided by the petitioner on

the needs of drinking water for a small population in the east of the island of Fuerteventura, in order to fill the demand of the resource in this area, knowing the lack of it, it is proposed the installation of a desalination plant of 4000 m³ per day of production.

2. Alcance

Se va a realizar el estudio de una planta de desalación de agua de mar, mediante ósmosis inversa, alimentada por energía eólica que tendrá una capacidad de producción de 4000 m³/día de agua potable para una pequeña población y zona industrial situada en la isla de Fuerteventura, más concretamente en el municipio de Puerto del Rosario.

De la planta desaladora se estudiará y calculará principalmente el núcleo de la desalación. Asimismo, se realizará el estudio eólico para el abastecimiento energético de la misma.

El proyecto contendrá los siguientes apartados para el sistema de desalación:

- Emplazamiento de la instalación de desalación.
- Elección de la bomba de captación de agua.
- Elección de la bomba de alta presión y bomba booster.
- Elección del sistema de recuperación de energía del núcleo de la desalación.
- Elección de las membranas.
- Elección de la bomba de distribución de agua potable.
- Elección de la bomba de rechazo.
- Cálculo del consumo específico de la planta.

En cuanto al estudio eólico se contemplarán los siguientes puntos:

- Evaluación del recurso eólico.
- Elección del aerogenerador que alimentará energéticamente la planta desaladora.

Quedan excluidas del proyecto las siguientes partes:

- Instalaciones eléctricas, electrónicas, de automatización, climatización, contraincendios, saneamiento y cualquier otra del sistema.
- Obra civil del proyecto.
- Instalaciones de pretratamiento y postratamiento del agua.
- Dimensionado de elementos de control y de las líneas de conducción de agua dentro de la instalación de desalación.
- Instalación para el control de la salmuera de rechazo.
- Estudio de seguridad y salud.
- Pliego de condiciones.
- Planificación.
- Mediciones y presupuesto.

El proyecto se centrará, por tanto, en una parte del análisis global de la planta desaladora y el sistema de captación de energía.

3. Antecedentes

3.1. Situación de los recursos hídricos a nivel mundial

El agua es un factor esencial para la vida y para las actividades económicas que se desarrollan sobre la Tierra y esta supone una limitación importante para el desarrollo de los pueblos, debido a la dependencia que respecto a la misma tienen tanto la agricultura, como la industria o población.

El Planeta se encuentra, en su mayor parte, ocupado por mares y océanos, donde se encuentra el 97% del agua disponible. El restante 3%, que no es agua de mar, sería el agua que podría utilizar la población de la Tierra, estimada en unos 35 millones de kilómetros cúbicos. La distribución de esta masa de agua dulce en la Tierra es muy heterogénea, existiendo regiones del mundo que están ampliamente dotadas, mientras otras zonas están sometidas a sequía.



Figura 1. Disponibilidad global del agua versus la población (UNESCO)

Por este motivo, se puede afirmar que los recursos hidráulicos disponibles son relativamente escasos si se ponen en relación con las demandas de la población, industrial y agrícola. Este es el caso de las Islas Canarias que sufren una situación de escasez de agua crónica, que difícilmente será superada por medios naturales.

3.2. Situación hidrológica general en Canarias

Las peculiaridades de las islas en la obtención de agua se han ido forjando a lo largo de los siglos, a medida que sus pobladores han hecho frente a una situación deficitaria que condicionó hasta hace bien poco su desarrollo. No se concibe la supervivencia de las islas sin desalación y esta es algo consustancial a la actividad humana y económica del Archipiélago.

Es difícil imaginar cómo habría sido la vida en Canarias, hoy en día, sin la aplicación extensiva que se ha hecho de las técnicas de desalación. Antes de la primera aparición de dichas plantas, hacia la segunda mitad de los años setenta, prácticamente todo el suministro de agua procedía de recursos subterráneos, como pozos y galerías, y una pequeña fracción de aguas superficiales, como presas y embalses. A las islas que prácticamente no tenían recursos subterráneos, como es el caso de Fuerteventura y Lanzarote, se les suministraba agua por medio de buques aljibe de la Armada Española.

La primera noticia de experiencia de planta desaladora en Canarias, y en España, proviene de la isla de Lanzarote en el año 1964. Desde entonces, este recurso hídrico se ha utilizado de manera masiva para el abastecimiento urbano y el riego de cultivos agrícolas. Actualmente, las islas ocupan un lugar relevante en España en volumen anual desalinizado.

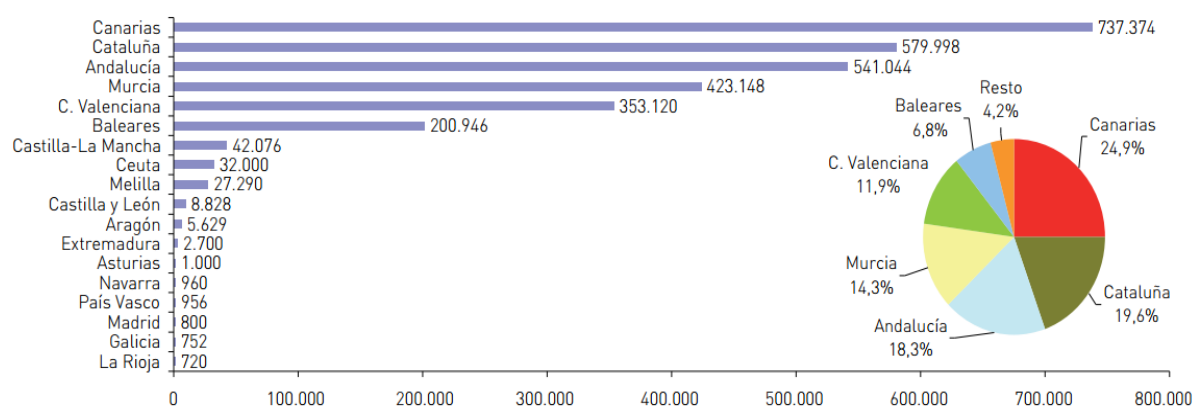


Figura 2. Capacidad instalada de desalación operativa en 2010 por comunidades autónomas (m³/día de agua desalada) (MAGRAMA)

Las islas tienen una extensión superficial de 7447 km² y una población de 2.100.306 habitantes en 2015 y considerando el global de las islas, la demanda de

agua es superior a los recursos convencionales existentes, lo que obliga a la utilización de fuentes alterativas no convencionales para cubrir el déficit.

En Canarias, existen diferentes recursos convencionales para obtener agua apta para el consumo, como son las aguas superficiales y las subterráneas. Por otro lado, existen métodos no convencionales, que son la desalación y reutilización. En las islas se cuenta con unos recursos totales de 496.2 hm³/año y es necesario suministrar unos 486.9 hm³/año.

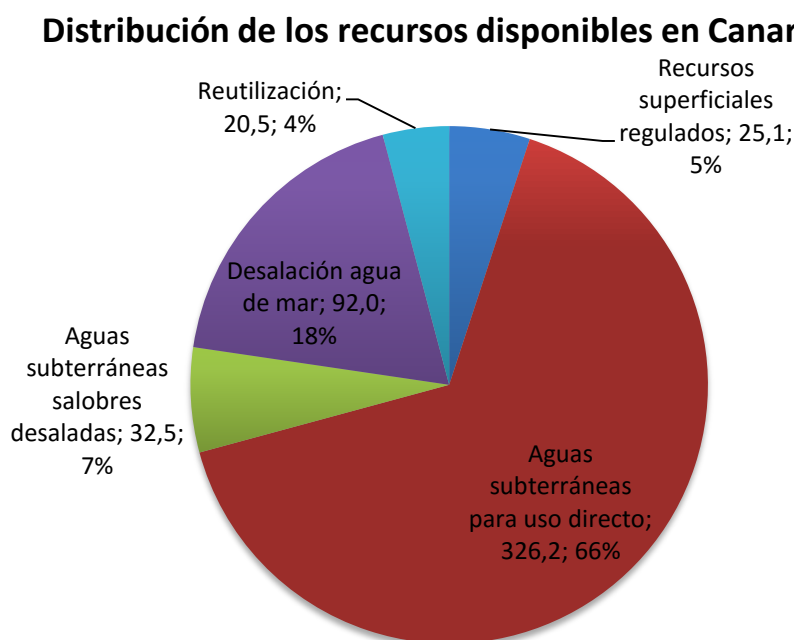


Figura 3. Distribución de los recursos hidrológicos en Canarias (hm³/año de agua)

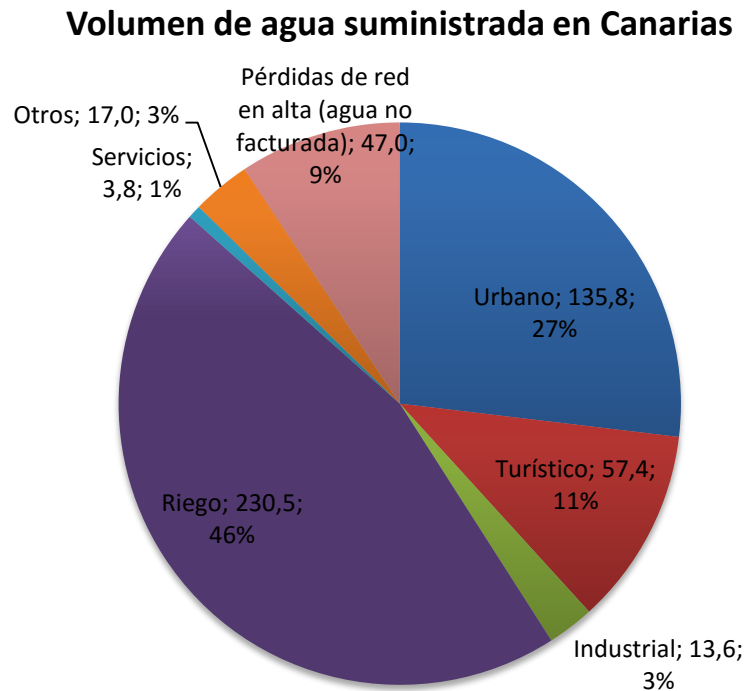


Figura 4. Distribución de volúmenes de agua suministrados en Canarias según sectores (hm³/año de agua)

En lo relativo a la producción de agua desalada en las distintas islas, en las islas orientales es el principal recurso hídrico y éste supone un elevado porcentaje respecto al total consumido.

| | Volumen total de agua desalada (hm ³ /año) | % del volumen total de agua consumido en la isla |
|---------------|---|--|
| Lanzarote | 16.9 | 99% |
| Fuerteventura | 11.9 | 86% |
| Gran Canaria | 77.1 | 52% |
| Tenerife | 18.0 | 9% |
| La Gomera | 0.0 | 0% |
| El Hierro | 0.5 | 19% |
| La Palma | 0.1 | 0% |

Tabla 1. Dependencia de la desalación en cada isla

3.3. Desalinización del agua

La desalación del agua es un proceso físico-químico utilizado para eliminar los minerales del agua y hacerla apta para su consumo.

Con el paso de los años los métodos para separar las sales de la solución se han ido perfilando. En este sentido, en unos procesos se utiliza el vapor como fuente principal para la eliminación de las sales, como son las tecnologías Evaporación Instantánea Multietapa (MSF: Multistage Flash Evaporation), Destilación Multiefecto (MED: Multi-effect Distillation) y Compresión de vapor (CV). En otros casos, la energía utilizada es la carga eléctrica, respondiendo a este tipo la electrodiálisis (ED). Finalmente, el sistema más divulgado utiliza la presión y se trata de la Ósmosis Inversa (OI).

Algunas de las primeras apariciones de la desalación en la historia datan de experimentos de manos de Aristóteles y otros genios de la antigua Grecia que utilizaron métodos como la destilación y filtración del agua a través de depósitos de tierra para tratar de obtener agua potable a partir del agua de mar.

A partir del siglo XVI, artilugios de desalación por evaporación de vapor empezaron a ser incorporados a los barcos para permitirles una forma de abastecerse en caso de emergencia. No obstante, el primero de los procesos modernos de desalación a gran escala fue la MSF a mediados del siglo XX en EE.UU. Aunque la destilación multiefecto era conocida, y tenía el potencial de ser más eficiente que la MSF, conseguir que el proceso MED fuese eficiente a gran escala llevó aún más tiempo y no fue hasta 1959 cuando se construyó la primera instalación de MED en Aruba.

Al año siguiente, en la Universidad de California, se produjo la primera membrana de OI sintética y funcional, hecha de acetato de celulosa. Esta membrana fue capaz de rechazar sales y permitir el paso de agua a través de ella con un flujo razonable y presiones elevadas.

A partir de estos primeros pasos, la desalación por membrana ha evolucionado hacia la búsqueda de una mayor eficiencia energética y un menor

coste a través de avances tecnológicos, el aprovechamiento de economías de escala y la optimización de los distintos procesos de desalación.

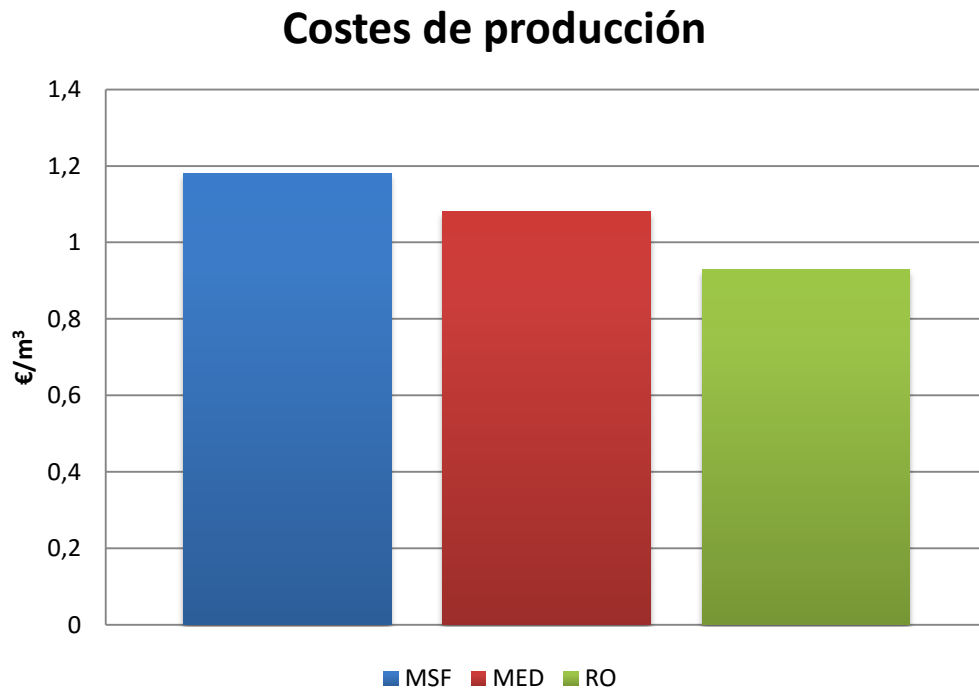


Figura 5. Estimación de costes de producción de agua de mar desalada mediante diferentes tecnologías (WADE)

3.3.1. Desalación por ósmosis inversa

La tecnología de la ósmosis inversa se basa en el proceso de ósmosis, que es el fenómeno natural que se produce en las células de los seres vivos, por el cual dos soluciones de distinta concentración salina puestas en contacto a través de una membrana semipermeable tienden a igualar sus concentraciones.

Para ello se produce un movimiento desde la solución más diluida hacia la más concentrada, que se detiene cuando se alcanza un equilibrio entre ambas concentraciones. La fuerza que provoca ese movimiento se conoce como presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales en el interior de ambas soluciones.

Cuando dos soluciones de diferente salinidad están colocadas en dos recipientes separados por una membrana semipermeable, se produce un

movimiento a través de la membrana desde la solución más diluida a la más concentrada, que se detiene cuando se alcanza un desnivel entre ambos tubos, que corresponde a la diferencia de presiones osmóticas entre ambas soluciones. Este valor de desnivel es la presión diferencial que impulsa el agua a través de la membrana.

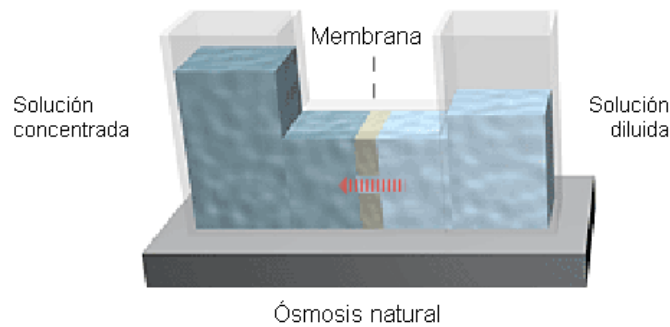


Figura 6. Principio del proceso de ósmosis natural (Junta de Andalucía)

Si se invierte el proceso aplicando una presión en el tubo de la solución más concentrada, el movimiento se produce desde ésta hacia la más diluida. Finalmente, se alcanza una posición de equilibrio en el que la altura que alcanza la solución en el nuevo equilibrio es función de la presión aplicada, de las características de la membrana y de las concentraciones de ambas soluciones.

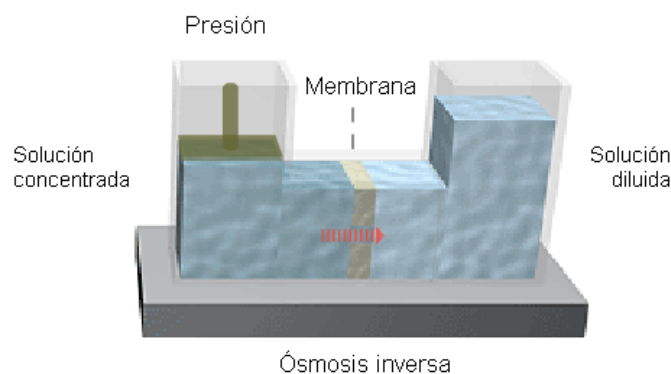


Figura 7. Principio del proceso de ósmosis inversa (Junta de Andalucía)

Sin embargo, el proceso de desalación no se reduce únicamente al proceso de la ósmosis inversa. Para reproducir este fenómeno a escala industrial es necesario pasar por una serie de etapas:

- Captación de agua de mar: la captación de agua de mar se suele realizar mediante pozos o mediante toma abierta superficial.

- Pretratamiento físico-químico: para conseguir una operación con resultado satisfactorio, es necesario acondicionar el agua bruta de mar mediante un pretratamiento físico y químico, que garantice la total eliminación de problemas al funcionamiento de las membranas de ósmosis inversa.
- Equipos de bombeo y recuperación de energía: el agua, una vez acondicionada, es impulsada a los bastidores de membranas mediante las bombas de alta presión que proporcionan la presión necesaria para invertir el proceso de ósmosis natural. El agua llega a los bastidores de ósmosis inversa donde se separa el agua desalada de la salmuera. La salmuera que sale de los bastidores a una presión próxima a la de entrada del agua de mar al mismo contiene una energía que es reutilizada en el equipo de recuperación de energía, que puede ser mediante turbinas de recuperación o intercambiadores de presión. Una vez reutilizada la salmuera se envía mediante tuberías al depósito de rechazo y más tarde será devuelta de nuevo al mar, mediante sistemas de difusión que la diluyen en el agua.
- Postratamiento del agua producida: con el objeto de corregir el pH del agua producida por la ósmosis inversa, ajustándola a niveles de potabilidad, es necesario incrementar la basicidad del agua con la adición de bases. Además, en ocasiones es necesario recarbonatar el agua y mantener un nivel de cloro libre para evitar el desarrollo de microorganismos.

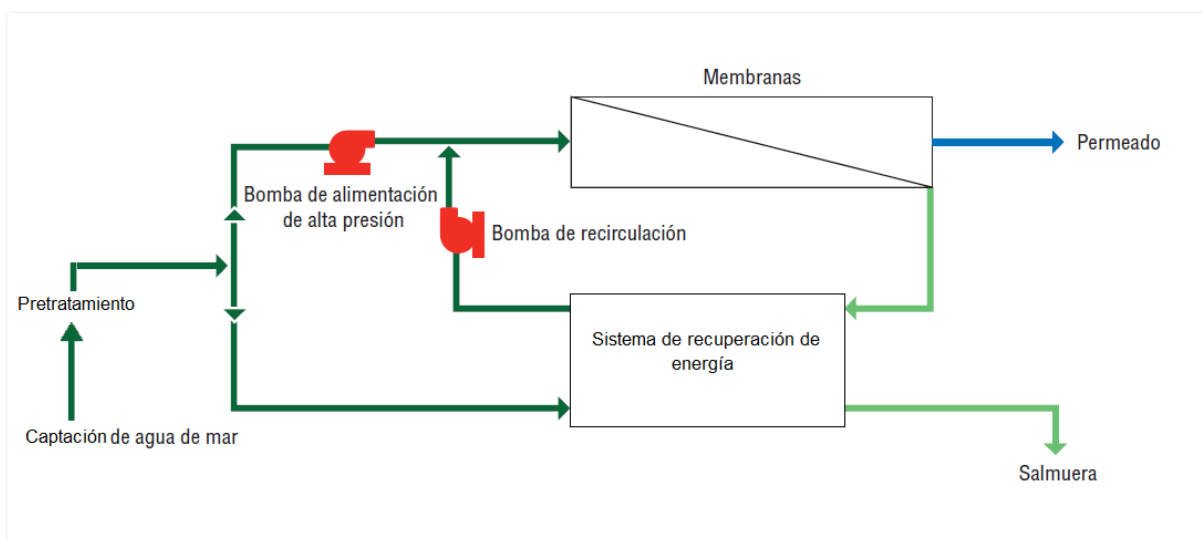


Figura 8. Esquema básico de una planta de desalación mediante ósmosis inversa

3.4. La desalación en Fuerteventura

Fuerteventura lleva más de 40 años obteniendo agua potable a partir del agua de mar. Esta isla se incorporó al uso de la tecnología de desalación en 1970 con una desaladora en Puerto del Rosario, posteriormente desmantelada en los años ochenta, que producía 2.000 m³/día mediante MSF. En sus inicios la planta solo operaba unos pocos días al mes, ya que cubría las necesidades de los habitantes de Puerto del Rosario, pero a medida que se fueron haciendo redes en Gran Tarajal y Corralejo aumentó su actividad hasta funcionar a pleno rendimiento.

En 1973 es cuando se crea una nueva planta desaladora de agua de mar del tipo Compresión de Vapor que llegó a producir 4.000 m³/día. En 1980 se instala en Gran Tarajal una unidad del mismo tipo para producir 250 m³/día, dado que por aquellos años las averías en la red de transporte desde Puerto del Rosario a Gran Tarajal eran casi continuas, produciéndose interrupciones en el abasto público de Gran Tarajal casi a diario.

Es en el año 1991 cuando entran en servicio las dos primeras unidades de Ósmosis Inversa en Puerto del Rosario con una capacidad de 2.000 m³/día de producción cada una. Dos años más tarde en 1993, se crean dos nuevos centros de producción, uno de ellos en Corralejo con un bastidor de O.I. con capacidad de producción de 1.500 m³/día y el otro en Gran Tarajal con la misma capacidad de producción que en Corralejo.

Desde entonces hasta nuestros días, la producción de agua desalada ha ido aumentando con los años en función de la demanda y el crecimiento de la población, teniendo en el año 2000 una producción de 11 hm³ y llegando a triplicarse en el año 2012 con una producción de 31 hm³ de agua desalada.

Evolución del volumen de desalación

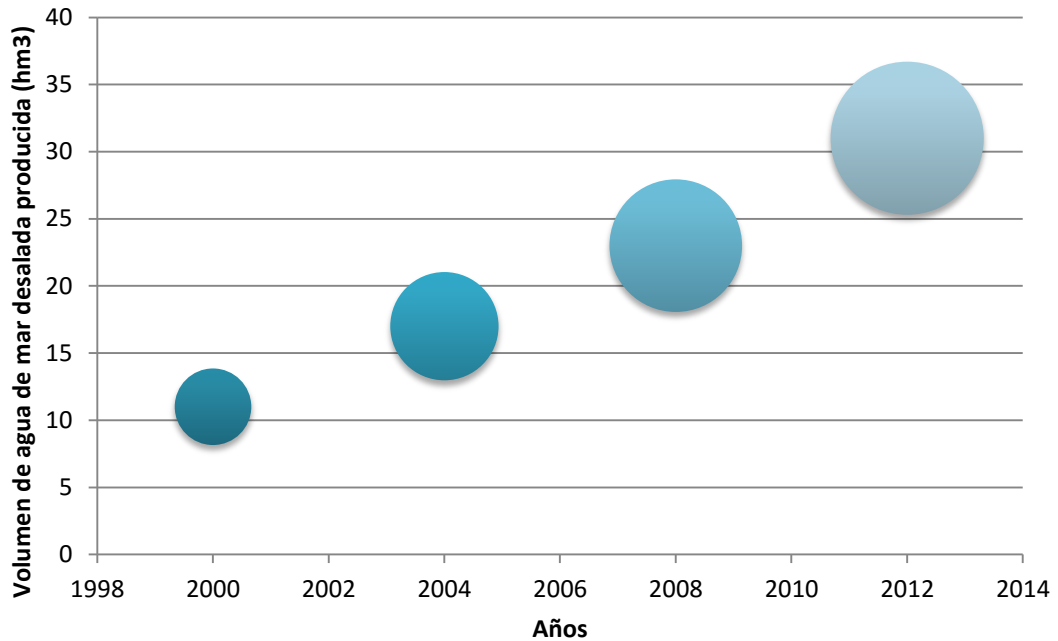


Figura 9. Evolución del volumen de agua desalada en Fuerteventura con los años.

Por otro lado, los datos de crecimiento demográfico en la isla de Fuerteventura, obtenidos del Instituto Canario de Estadística, son un claro indicio de una creciente necesidad de agua potable en el futuro.

Fuerteventura

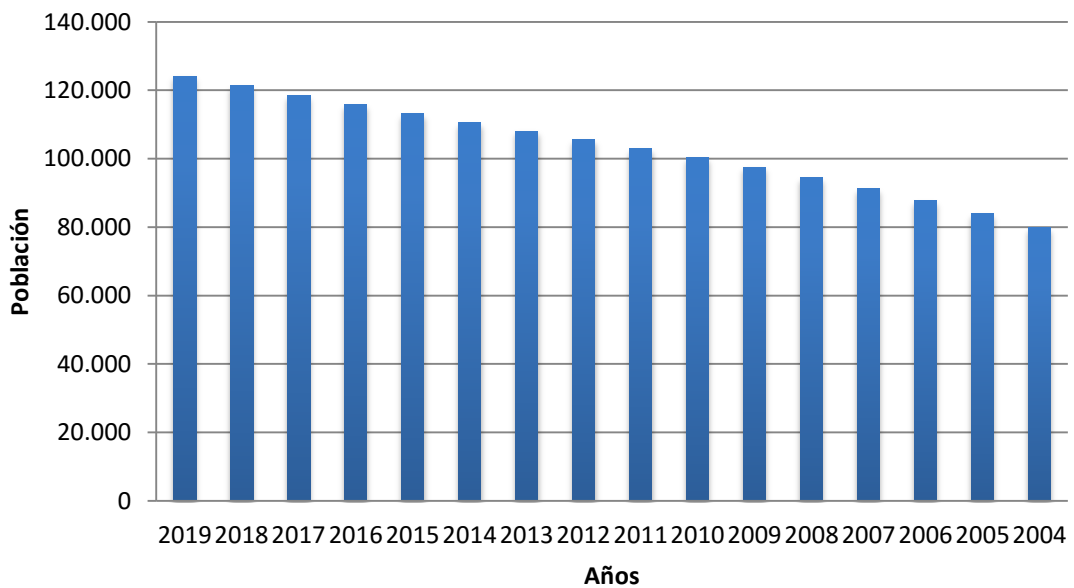


Figura 10. Crecimiento de la población de Fuerteventura

Más concretamente, centrando los datos de la evolución de la población años atrás en la capital de la isla se observa una tendencia al alza en el crecimiento demográfico, lo que hace óptima la colocación de nuevas instalaciones desaladoras en la zona ante la futura demanda por parte de la población.

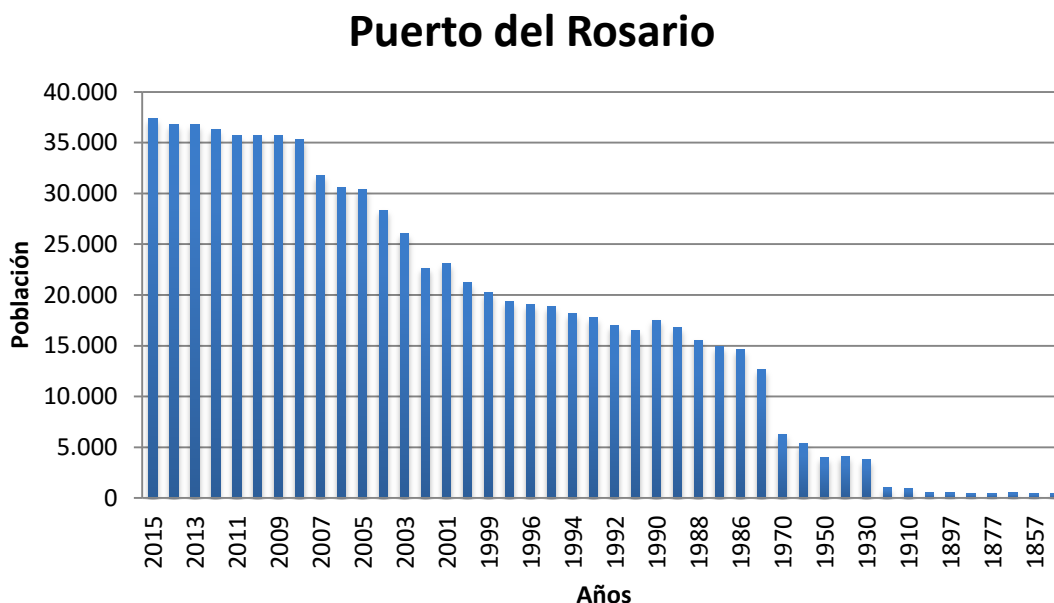


Figura 11. Crecimiento de la población de Puerto del Rosario

3.5. Energía eólica

La energía eólica es la energía renovable más madura y desarrollada. Genera electricidad a través de la fuerza del viento, mediante la utilización de la energía cinética producida por efecto de las corrientes de aire. Esta energía ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar la maquinaria de molinos al mover sus aspas. Desde principios del siglo XX, produce energía a través de los aerogeneradores. La energía eólica mueve una hélice y, mediante un sistema mecánico, hace girar el rotor de un generador que produce energía eléctrica.

El éxito de la energía eólica instalada en el mundo puede apreciarse en la Figura 13, donde puede observarse una tendencia al alza en la confianza de los distintos países del mundo al instalar este tipo de energía limpia y eficiente.

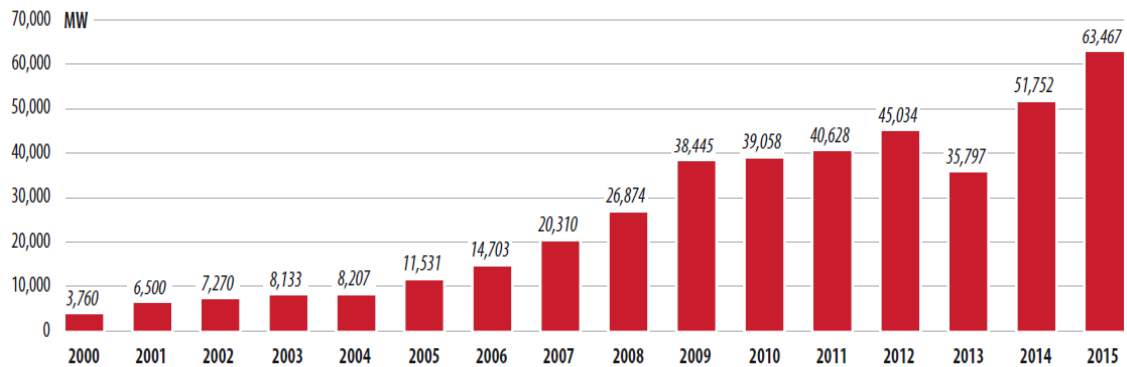


Figura 12. Potencia eólica anual instalada en el mundo (GWEC).

3.5.1. El viento

El movimiento del aire es consecuencia de la acción del Sol, ya que es la radiación del mismo, en combinación con otros factores como la inclinación y el desplazamiento de la Tierra en el espacio o la distribución de los continentes y los océanos, lo que activa la circulación de las masas de aire en el globo al calentar de forma desigual las distintas zonas de la superficie y la atmósfera terrestre. El aire frío tiende a compensar el vacío producido por el aire caliente ascendente hacia las capas altas de la atmósfera. Así, la diferencia de presiones atmosféricas origina el movimiento del aire.

La forma en que aparece el viento (velocidad, dirección, turbulencia,...) es complicada de predecir debido a que depende de distintos factores globales y locales: rotación de la tierra, posición de la luna, diferencia de temperaturas global y local, orografía del terreno, rugosidad de la superficie, obstáculos, etc.

A gran escala, existe una serie de corrientes de viento dominantes que circulan por todo el planeta en capas de la estratosfera. Estos vientos globales se rigen por los cambios de temperatura y presión atmosférica, pero también otros factores, como la fuerza de Coriolis, que hace que, visto desde el Espacio, el viento del hemisferio norte tienda a girar en el sentido de las agujas del reloj cuando se acerca a un área de bajas presiones y el hemisferio sur lo haga en dirección opuesta.

Por otro lado, cerca de la superficie terrestre, a nivel local, soplan otros vientos más específicos caracterizados por el relieve del terreno y otras variables como la rugosidad o la altura.

$$V(h) = V_0 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha$$

Donde:

$V(h)$ = Velocidad del viento que se desea estimar, a la altura h del suelo

V_0 = Velocidad del viento conocida a una altura h_0

h = Altura a la que se quiere estimar la velocidad del viento

h_0 = Altura de referencia

α = Valor que depende de la rugosidad existente en el emplazamiento

La proximidad del terreno, y si este es rugoso, produce una deceleración del aire, de forma que la velocidad del viento aumenta con la altura, con una distribución más o menos parabólica. Por eso interesa situar altos los ejes de los aerogeneradores, dado que el viento es más homogéneo y de mayor intensidad.

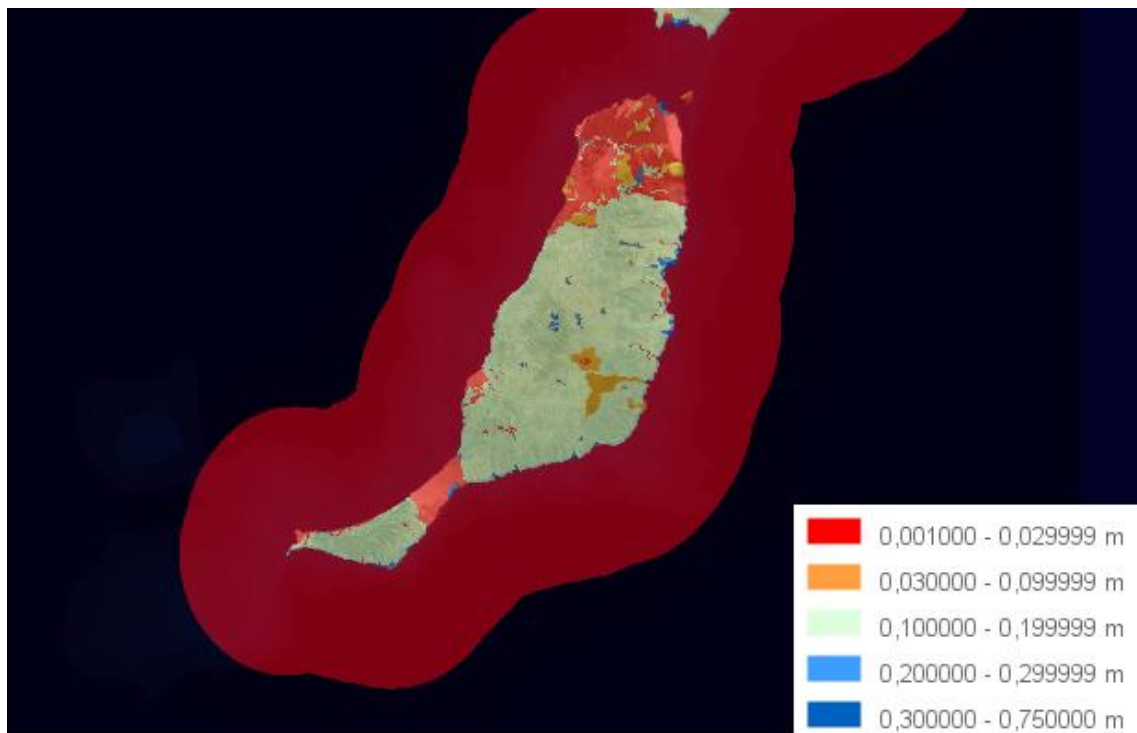


Figura 13. Rugosidad del terreno de la isla de Fuerteventura (ITC)

Solo estudios y observaciones exhaustivos, gracias a la cada vez mayor potencia de los ordenadores y los métodos estadísticos, son capaces de acercarnos a valores reales. Con estos modelos de datos se puede intentar estimar el potencial eólico en un emplazamiento concreto.

A efectos de obtención de energía eólica solo interesan los vientos superficiales de la troposfera, y estos están muy condicionados por la altitud y orografía del terreno. En los continentes, las montañas y cordilleras efectúan un direccionamiento y a veces aceleración del viento. Por estos motivos orográficos, y de proximidad del mar existen puntos o zonas localizadas en un país, especialmente ventosas, con vientos de alta intensidad y altas ráfagas.

En Canarias destacan los vientos Alisios, que si bien no son intensos, sí son muy constantes todo el año.

La marina inglesa adoptó la escala de Beaufort en 1806, y se ha convertido en un estándar mundial, para catalogar los vientos por sus efectos en mar y tierra, en una escala de 12 grados de intensidad.

Los aerogeneradores modernos suelen funcionar entre rangos de 2 a 8-9 en esta escala, es decir, entre brisa suave y temporal. Los vientos inferiores a 2 (1.6-3.3 m/s) tienen muy poca energía, y los superiores a 8-9 (17.2-20.7 m/s, 20.8-24.4 m/s), producen cargas muy elevadas en la máquina, y el rotor de la misma, se frena y detiene automáticamente para evitar averías, y/o porque el sistema de regulación de la máquina es incapaz de regular la velocidad a partir de una energía excesiva de entrada en el rotor.

La potencia del viento aumenta con el cubo de la velocidad, por lo que los vientos por debajo de 5 m/s poseen muy poca potencia y no es rentable explotarlos para producción eléctrica.

$$P = \frac{1}{2} * \rho * S * v^3$$

Donde:

P= potencia del viento en vatios (W)

ρ = densidad del aire en kg/m³

S= superficie barrida por el rotor en m²

V= velocidad del viento en m/s

La energía cinética contenida en el viento es muy grande. Sin embargo, no puede ser extraída toda por los aerogeneradores. Primero porque esto implicaría detener por completo el viento, lo que impediría que éste pasara de forma continua a través de las palas de la turbina; de hecho, y según el Límite de Betz, puede teóricamente obtenerse, como máximo, el 59% de la energía que llega al rotor. Y segundo, porque también se pierde parte en el proceso de transformación de la energía en la máquina.

$$P_{AG} = \frac{1}{2} * \rho * S * v^3 * c_p$$

Donde:

P= potencia generada por el aerogenerador en vatios (W)

ρ = densidad del aire en kg/m³

S= superficie barrida por el rotor en m²

V= velocidad del viento en m/s

C_p = coeficiente de potencia; relaciona la potencia generada por el aerogenerador con la potencia del viento incidente

3.5.2. Mapas eólicos y emplazamientos óptimos

La evaluación numérica y localización óptima de los recursos eólicos de un determinado lugar requiere de la realización de unas series extensas de medidas anemométricas durante algunos años para obtener datos estadísticos de velocidad y dirección del viento.

Dependiendo del método de medición y posterior tratamiento de las medidas, en la práctica se pueden encontrar varias formas de presentación de los datos del viento. La representación gráfica más utilizada es la denominada Rosa de los Vientos. Su utilidad principal radica en que proporciona la dirección principal del viento, permitiendo así conocer la orientación predominante del aerogenerador.

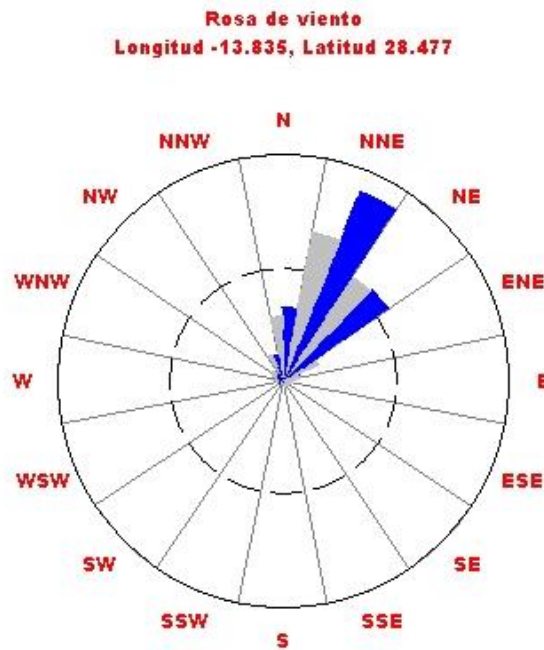


Figura 14. Rosa de los vientos para las coordenadas del emplazamiento (ITC)

Asimismo, con estos datos se confeccionan los mapas eólicos generales. Con estos mapas estadísticos, presentados según diversas gráficas, es posible prever con cierta aproximación la producción anual de energía, en kWh, de una máquina dada en una determinada zona.

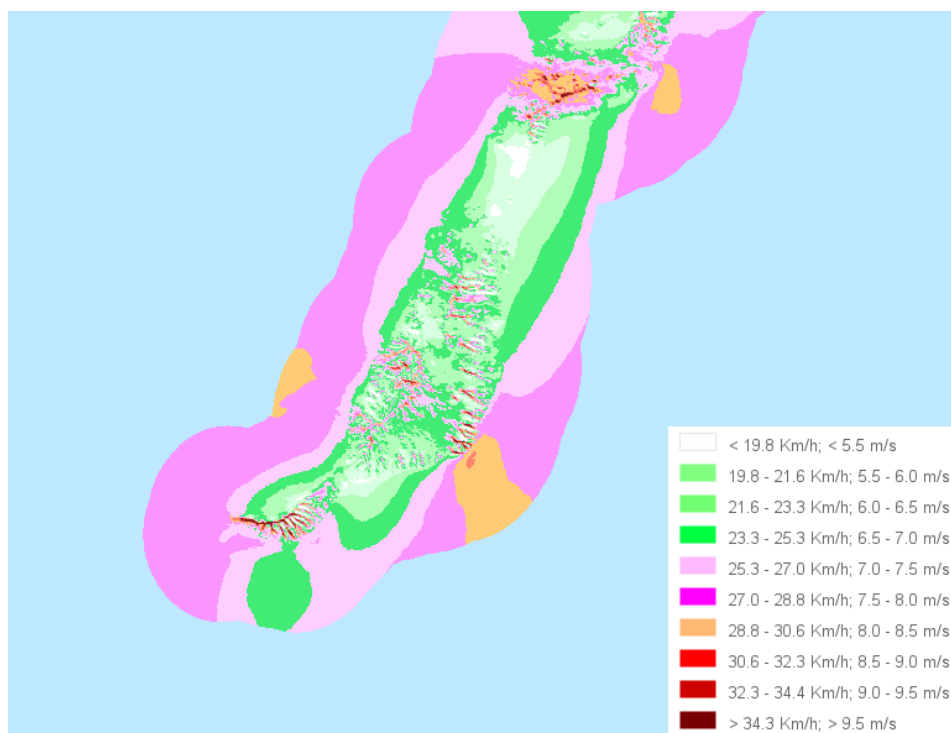


Figura 15. Mapa eólico de la isla de Fuerteventura (ITC)

3.5.3. El aerogenerador

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento. Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

El aerogenerador cuenta principalmente con los siguientes elementos:

- 1) Torre: soporta la góndola y el rotor. Generalmente es una ventaja disponer de una torre alta, dado que la velocidad del viento aumenta conforme nos alejamos del nivel del suelo, como ya se ha comentado anteriormente.
- 2) Palas: capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje.
- 3) Góndola: contiene los componentes claves de un aerogenerador.
 - Transductores de control: las señales electrónicas del anemómetro son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para conectarlo cuando el viento alcanza unos 5 m/s.
 - Rotor: las palas del rotor se diseñan para transformar la energía cinética del viento en un momento torsor en el eje del equipo.
 - Generador: es una de las partes más importantes de un aerogenerador ya que transforma la energía mecánica en energía eléctrica.
 - Freno hidráulico: permite detener el funcionamiento del aerogenerador por razones de seguridad, como sería que se superaran ciertos límites de velocidad del viento.
 - Corona con reductora de orientación: hace que mediante un sistema de ruedas dentadas en el eje del aerogenerador este pueda girar sobre sí mismo 360 grados para orientarse hacia la dirección del viento.

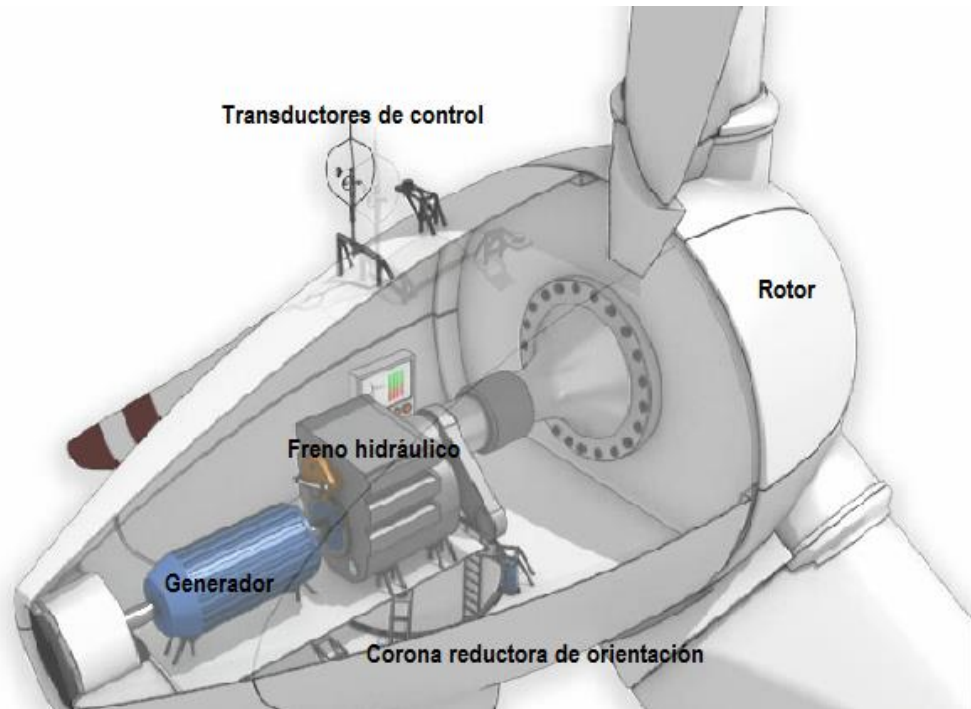


Figura 16. Elementos principales del interior de la góndola de un aerogenerador (ITC)

Los aerogeneradores suelen agruparse en concentraciones denominadas parque eólicos con el fin de lograr un mejor aprovechamiento de la energía, lo que reduce su impacto ambiental.

3.5.4. Utilización de energía eólica para la desalación

La utilización de energías renovables para desalación de agua es un deseo que se ha puesto de manifiesto en numerosas ocasiones. Esto se debe, por una parte, al hecho de que en una misma zona geográfica suelen coincidir la escasez de agua y la existencia de recursos energéticos renovables. Asimismo, cualquier avance en el sentido de disponer de energía de bajo coste, es beneficioso para reducir el coste final del agua, teniendo en cuenta que los sistemas de conversión de energías renovables requieren considerables inversiones de capital para su instalación.

Por otro lado, las energías renovables son difusas por su propia naturaleza, y en concreto la energía eólica, por su parte, suele ser muy estacionaria, con épocas de más intensidad.

Se distinguen dos formas de utilización de la energía eólica en desalación. Por un lado existe la posibilidad de un uso directo, convirtiendo la energía eólica en

electricidad que se inyecta a la red general. De esta forma la desaladora se nutre de energía de esa red general.

Esta modalidad de uso indirecto es muy flexible, pues en principio no plantea limitaciones en cuanto a la capacidad de producción de agua, pudiéndose alcanzar miles de m³/día. Por esta razón el uso indirecto se ha ido extendiendo en los años 90, con casos concretos en Canarias como el Consorcio de Aguas de Fuerteventura, que participa desde 1993 en un 60% en el parque eólico de Cañada del Río situado en Pájara, Fuerteventura.

Por otro lado, se puede aplicar la energía eólica de forma directa a la desalación. Esta energía se aplica directamente a la unidad desaladora, sin pasar por ninguna fase intermedia.

Las características de la energía eólica mencionadas anteriormente, implican que hasta ahora las aplicaciones directas de la energía eólica para desalación se hayan limitado mayoritariamente a casos de instalaciones de pequeña capacidad o instalaciones en las que no es precisa una explotación continua.

3.5.5. Aspectos ambientales

Como el resto de energías renovables, la eólica es una fuente de electricidad “limpia”, inagotable y autóctona, lo cual representa importantes ventajas ambientales. Sin embargo, también presenta aspectos negativos que tienen su principal efecto en el medio ambiente. No obstante, el balance del uso de esta tecnología en comparación con energías tradicionales resulta mucho más positivo.

A diferencia de los sistemas de generación de energía tradicionales, la energía eólica no genera residuos peligrosos radiactivos ni vierte a la atmósfera dióxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno o partículas sólidas. El dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno y los metales pesados son sustancias contaminantes con una importante incidencia en la salud de los ciudadanos y el medio ambiente, mientras que el dióxido de carbono es uno de los principales gases de efecto invernadero causantes del calentamiento de la Tierra, cuya reducción y control es uno de los mayores desafíos actuales de la Humanidad.

Los sistemas térmicos clásicos basados en los combustibles fósiles, como son el lignito, carbón, petróleo y gas natural, contribuyen al 99% del calentamiento global provocado por las tecnologías de generación de electricidad.

Calentamiento global

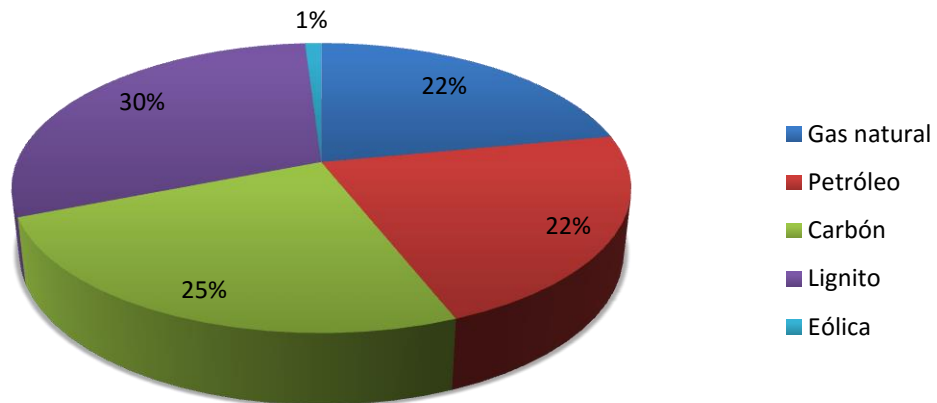


Figura 17. Contribución de los sistemas energéticos al calentamiento global (APPA)

Los sistemas térmicos del carbón y, en menor medida del petróleo son los principales responsables de la contaminación por metales pesados procedente de tecnologías de generación de electricidad. Ello es debido a sus emisiones a la atmósfera de cadmio y plomo, y de bario y plomo al agua, procedentes de los procesos de combustión.

Contaminación por metales pesados

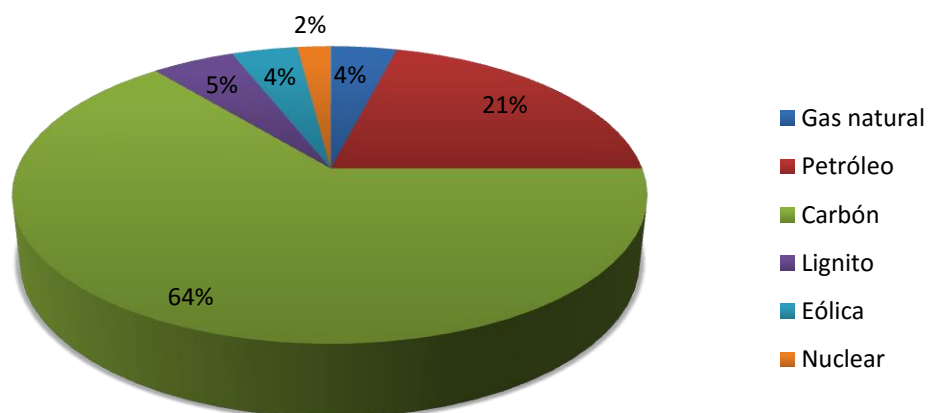


Figura 18. Contribución de los sistemas energéticos a la contaminación por metales pesados (APPA)

Este sistema de generación de electricidad mediante energía eólica solo requiere de un recurso gratuito e inagotable como es el viento, por lo que no presentará problemas de transporte, enfermedades profesionales o accidentes radiactivos entre otros.

Agotamiento de recursos energéticos

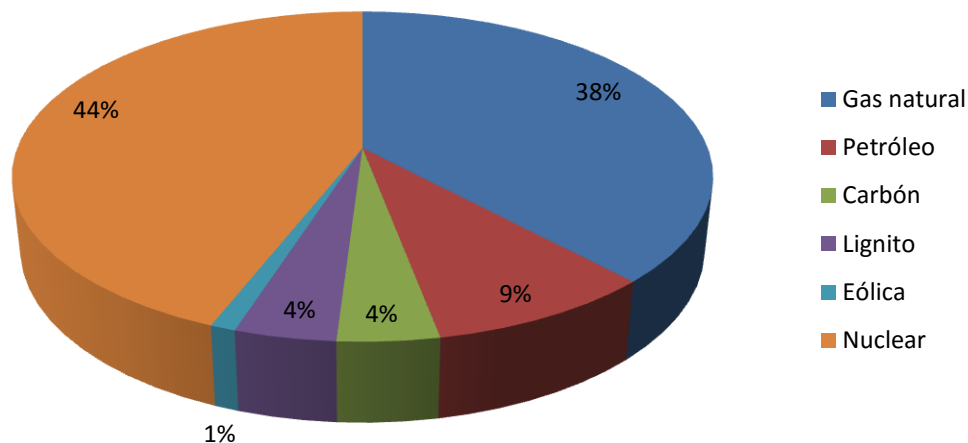


Figura 19. Contribución de los sistemas energéticos al agotamiento de los recursos energéticos (APPA)

Del conjunto de recursos no renovables, son las reservas de uranio, gas natural y petróleo las que presentan un menor nivel de recursos por lo que, ante su previsible escasez o agotamiento, son dichas tecnologías las que reciben una mayor penalización.

Aun así, los parques eólicos no dejan de causar unos impactos medioambientales que deben tenerse en cuenta para ser mitigados en la medida de lo posible.

El mayor impacto provocado por la energía eólica es de tipo visual. Normalmente, los emplazamientos más ventosos donde suelen colocarse los aerogeneradores corresponden por lo general a entornos naturales poco humanizados, y por tanto, con alto valor paisajístico. Sin embargo, este es un impacto muy subjetivo, pues depende de la apreciación personal de cada persona.

Por otro lado, la colisión de las aves con los aerogeneradores constituyen en realidad impactos bastante limitados si bien, presentan cierta importancia en lugares especialmente valiosos para el paso o nidificación de las aves.

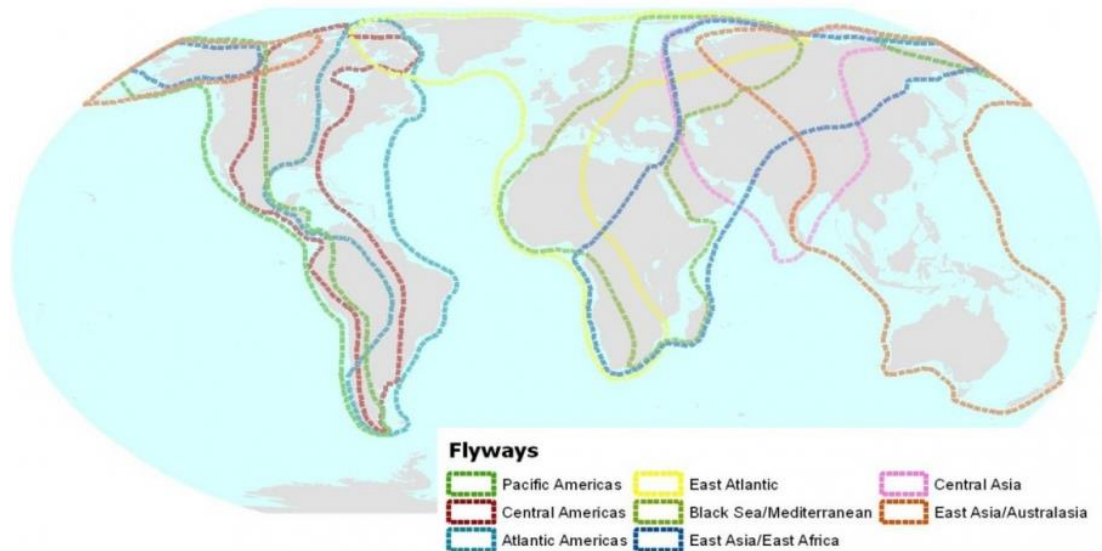


Figura 20. Rutas migratorias de las aves a nivel mundial (Birdlife International).

Otro de los impactos se trata del ruido producido por los aerogeneradores. Cuando las velocidades de viento son altas, el propio ruido ambiente enmascara el originado aerodinámicamente por las palas del aerogenerador. Para velocidades del viento bajas, el ruido que se percibe con más intensidad es el mecánico provocado por los componentes de la góndola en rotación. Sin embargo, hoy en día, es en gran parte atenuado por las mejoras en la calidad de los mecanizados y en los tratamientos superficiales de las piezas que constituyen el tren de potencia del aerogenerador.

4. Normas y referencias

4.1. Disposiciones legales y normas aplicadas

- Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.
- Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.
- Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.
- Plan Insular de Ordenación del Territorio de Fuerteventura.
- Reglamento y normas de presentación de los trabajos de fin de grado de la Escuela Superior de Ingeniería Civil e Industrial de la Universidad de La Laguna.

4.2. Bibliografía

- Medina San Juan, José Antonio. *Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis Inversa*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1999.
- Veza, José Miguel. *Introducción a la Desalación de Aguas*. Gran Canaria: servicio de publicaciones y producción documental de la Universidad de Las Palmas de gran Canaria, 2002.
- Agüera Soriano, José. *Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas*. Madrid: Editorial Ciencia, 2002.
- Ruifernández Guitián, José Manuel. *Energía Eólica. Fundamentos y aerogeneradores*. La Laguna: Universidad de La Laguna, 2005.
- Villarrubia López, Miguel. *Ingeniería De La Energía Eólica*. Barcelona: Marcombo, 2012.
- Wade N.M. *Distillation plant development and cost update*. 2001.
- Gobierno de Canarias: www.gobiernodecanarias.org
- Centro Canario del Agua: fcc.a.es

- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente: www.magrama.gob.es
- Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas: <http://www.minhap.gob.es/es-ES/Paginas/Home.aspx>
- Consorcio de abastecimiento de aguas a Fuerteventura: caaf.es
- UNESCO: es.unesco.org
- Fundación Aquae: www.fundacionaquae.org
- Junta de Andalucía: www.juntadeandalucia.es
- Eólicas de Fuerteventura: eolicasdefuerteventura.es
- Asociación Empresarial Eólica: www.aeeolica.org
- The European Wind Energy Association: www.ewea.org
- Global Wind Energy Council: www.gwec.net
- Agencia andaluza de la energía: www.agenciaandaluzadelaenergia.es
- Asociación de productores de energías renovables: www.appa.es
- Birdlife International: www.birdlife.org
- Grafcan: <https://www.grafcan.es/>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía: <http://www.idae.es/>
- Instituto Tecnológico de Canarias: <http://www.itccanarias.org/web/>
- Sede Electrónica del Catastro: <http://www.sedecatastro.gob.es/>
- Goolzoom: <http://es.goolzoom.com/>
- Puertos del Estado: <http://www.puertos.es/es-es>
- Instituto Canario de Estadística: www.gobiernodecanarias.org/istac/
- Instituto Nacional de Estadística: www.ine.es
- 3M España: www.3m.com.es
- Hydranautics: membranes.com
- Flowserve: http://www.flowserve.com/es_ES
- KSB: <https://www.ksb.com/ksb-en/>
- Lowara: <http://lowara.com/>
- Flowtite: <http://www.flowtite.com/>

4.3. Programas de cálculo

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

5. Definiciones y abreviaturas

En este apartado se hace referencia a conceptos y abreviaturas que se nombran en la redacción del presente proyecto que puedan llevar a confusión ordenador alfabéticamente.

5.1. Definiciones

- Consumo específico: parámetro que indica el consumo externo de energía por metro cúbico de agua producida.
- Conversión: Porcentaje que relaciona la cantidad de agua producto con la de alimentación.
- Mezcla volumétrica: mezcla que se produce entre las corrientes de salmuera y de caudal de alimentación en el interior del intercambiador de presión.
- Salmuera: Caudal de agua, rechazado por las membranas de ósmosis inversa, de alto contenido en sales.

5.2. Abreviaturas

- APPA: Asociación de Productores de Energías Renovables
- CV: Compresión de Vapor
- ED: Electrodiálisis
- GWEC: Global Wind Energy Council
- IDAE: Instituto para la Diversificación y el Ahorro Energético
- ISTAC: Instituto Canario de Estadística
- ITC: Instituto Tecnológico de Canarias
- LSI: Índice de Saturación de Langelier
- MAGRAMA: Ministerio de Agricultura y Medioambiente
- MED: Multi-effect Distillation
- MINHAP: Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas
- MSF: Multistage Flash Evaporation
- OI: Ósmosis Inversa
- TDS: Sólidos Totales Disueltos

6. Requisitos de diseño

6.1. Emplazamiento

El emplazamiento se establece considerando varios factores básicos que hacen necesaria la instalación de una planta desaladora. En primer lugar, debe ser un lugar ubicado en España dado que la normativa conocida es de dicho país. Por otro lado, se ha de valorar la necesidad de agua potable en el lugar elegido así como la existencia de recurso eólico suficiente como para alimentar a los aerogeneradores. Asimismo, es necesario que la instalación se encuentre cercana al recurso hídrico que en este caso se trata del mar. Finalmente, la planta debe encontrarse en un lugar en el que se permita la construcción.

Teniendo en cuenta todos los requisitos mencionados anteriormente y los datos tratados en el apartado 3 de este documento, se ha decidido que la planta desaladora se encuentre en la Isla de Fuerteventura, localizada en el archipiélago de las Islas Canarias, España, más concretamente en una zona al Este de la isla llamada Rosa de la Arena perteneciente al municipio de Puerto del Rosario.

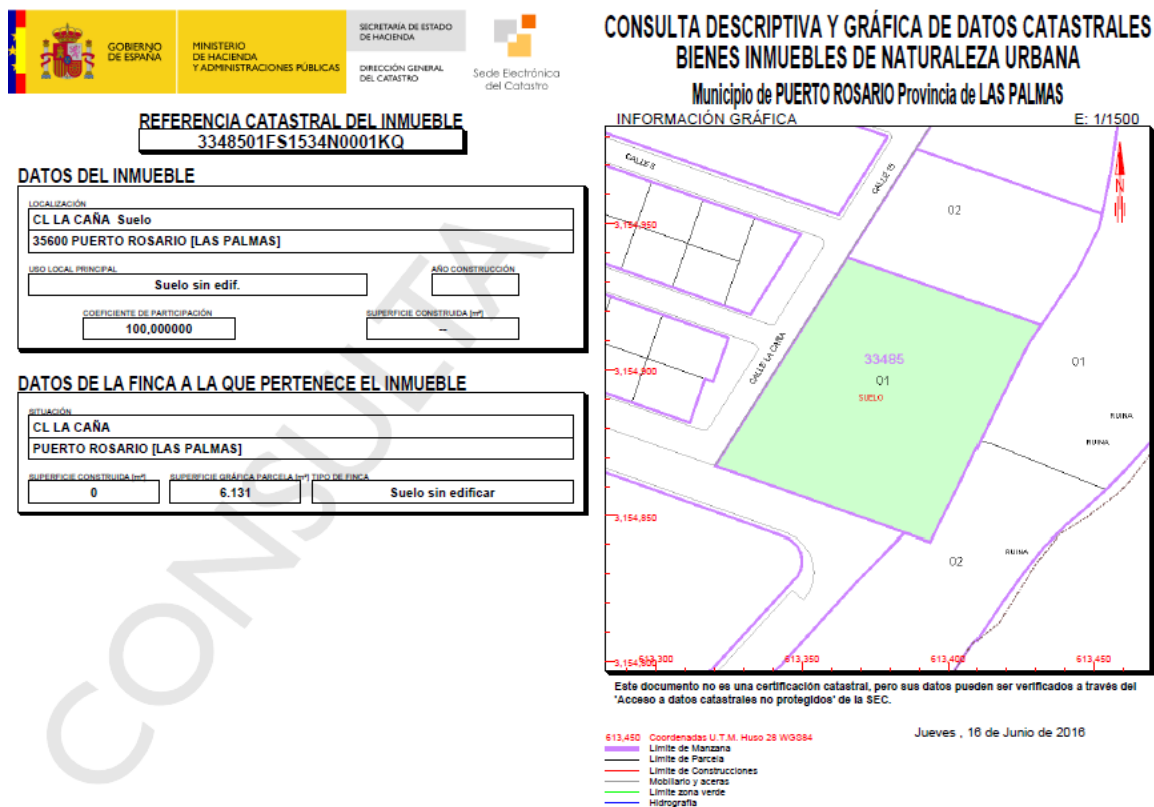


Figura 21. Referencia catastral de la parcela elegida (MINHAP)

6.2. Datos de partida

Existen algunos aspectos del agua que va a ser desalada que pueden tener incidencia en la forma de realizar el diseño de la instalación desaladora. Desde un punto de vista físico-químico existen principalmente tres características básicas que definen el agua, que son su salinidad, su pH y la temperatura de la misma.

6.2.1. Salinidad

La salinidad de un agua es el contenido total de sales del mismo. Los causantes de dicha salinidad son diferentes elementos químicos que pueden encontrarse en el agua. Es importante eliminar estos elementos del agua ya que pueden ser perjudiciales para la salud humana o las propias membranas de desalación por los precipitados que pueden provocar sobre las mismas. Tras el análisis químico de una muestra de agua tomada en las costas canarias, se obtienen los valores reflejados en la tabla 2 para los parámetros a tener en cuenta.

| Cationes | |
|--------------------|------------|
| Calcio | 431 mg/l |
| Magnesio | 1470 mg/l |
| Potasio | 451 mg/l |
| Sílice | 1.1 mg/l |
| Sodio | 11870 mg/l |
| Aniones | |
| Bicarbonato | 141.5 mg/l |
| Cloruro | 21280 mg/l |
| Fluoruros | 862 µg/l |
| Nitratos | 0.7 mg/l |
| Sulfatos | 3148 mg/l |
| Metales | |
| Bario | 17 µg/l |
| Boro | 5.23 mg/l |
| Estroncio | 10 mg/l |

Tabla 2. Composición química del Océano Atlántico según el laboratorio Labaqua, para una muestra de mar tomada en la desaladora de Santa Cruz de Tenerife.

6.2.2. pH

La medida del pH es importante en el análisis del agua ya que el pH afectará a la solubilidad de las sales en el agua. Un medio alcalino (pH alto) favorece las incrustaciones de sales sobre la superficie de una instalación mientras que un pH demasiado bajo (ácido) favorece la corrosión. El Índice de Saturación de Langelier (LSI) facilita la predicción de incrustaciones. Este mide la diferencia entre el pH real del agua y el pH que tendría en condiciones de saturación.

El pH es uno de los aspectos que habitualmente requiere pretratamiento, ya que el pH típico del agua de mar oscila alrededor de 8.2, y suele precisar acidulación, hasta alcanzar valores de aproximadamente 6.5, ya que un pH alejado de este valor puede afectar a la estabilidad química de la propia membrana, que podría quedar destruida por hidrólisis.

Como valor de pH para el Océano Atlántico se determina un pH de 8, para una muestra de agua tomada en las costas de Santa cruz de Tenerife.

6.2.3. Temperatura

La temperatura del agua de captación influye en el funcionamiento de las membranas ya que, por un lado, la solubilidad de determinadas sales aumenta con la temperatura, reduciendo su riesgo de precipitación para elevados valores de la misma. Por otro lado, la temperatura influye en la viscosidad del agua y en la dilatación de los materiales que constituyen las membranas. Finalmente, la elevación de la temperatura favorece el crecimiento biológico de los microorganismos causando ensuciamiento de las membranas.

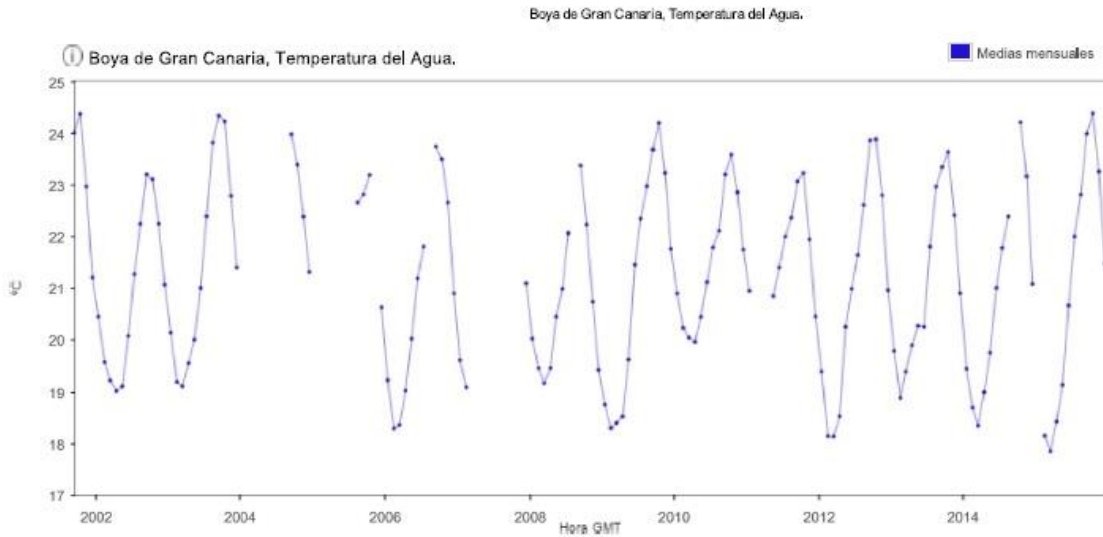


Figura 22. Temperatura superficial media del agua de mar en las Islas Canarias (Puertos del Estado)

| Ts: Temperatura Superficial Media del Agua / Mean Surface Temperature of Water ° C | | | | |
|--|-------------------|------------|-------------------|------------|
| Boya de Gran Canaria 1997 - 2016 | | | | |
| Mes / Month | Ts Max. / Max. Ts | Año / Year | Ts Min. / Min. Ts | Año / Year |
| Enero / January | 21.7 | 2011 | 18.3 | 2009 |
| Febrero / February | 20.8 | 2010 | 17.6 | 2015 |
| Marzo / March | 20.7 | 2002 | 17.4 | 2015 |
| Abril / April | 21.4 | 2003 | 17.7 | 2015 |
| Mayo / May | 22.0 | 2011 | 18.0 | 2015 |
| Junio / June | 23.3 | 2009 | 19.2 | 2015 |
| Julio / July | 23.3 | 2003 | 20.5 | 2015 |
| Agosto / August | 25.1 | 2004 | 20.9 | 2009 |
| Septiembre / September | 25.6 | 2012 | 22.1 | 2005 |
| Octubre / October | 25.6 | 2015 | 21.1 | 2008 |
| Noviembre / November | 24.7 | 2015 | 20.0 | 2008 |
| Diciembre / December | 22.6 | 2009 | 19.0 | 2008 |

Generado por / Generated by Puertos del Estado

Figura 23. Temperaturas medias máximas y mínimas del agua de mar en las Islas Canarias (Puertos del Estado)

Se observa que se obtiene un valor máximo de temperatura superficial del agua de mar de 25.6°C y un valor mínimo de 17.4°C. Como la captación del agua se hará desde un pozo, se tomará como temperatura de diseño del agua de mar 19°C.

6.2.4. Agua producida

El agua producida en la planta desaladora será de 4000 m³/día y se dedicará a atender las necesidades de una pequeña población, por lo que tendrá que cumplir con las características físico-químicas definidas por la legislación vigente en materia de agua para consumo humano. Las características de potabilidad en España vienen definidas en los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

En la siguiente tabla se detallan algunas características destacables exigidas según los diversos anexos de la citada reglamentación.

| Parámetro | Valor paramétrico |
|-----------|-------------------|
| pH | 6.5<pH<9.5 |
| Amonio | 0.5 mg/l |
| Boro | 1 mg/l |
| Cloruro | 250 mg/l |
| Fluoruro | 1.5 mg/l |
| Nitrato | 50 mg/l |
| Sodio | 200 mg/l |
| Sulfato | 250 mg/l |

Tabla 3. Características físico-químicas y relativas a sustancias no deseables en el agua potable

7. Análisis de soluciones

7.1. Captación de agua de mar

El diseño de la instalación se inicia con la toma o punto de captación del agua que va a alimentar el sistema.

Las dos formas más comunes de captar el agua bruta son mediante toma de agua abierta o cerrada. La localización y el caudal de extracción de la toma de agua bruta de alimentación serán los factores determinantes en el diseño del pretratamiento requerido para el agua de alimentación.

7.1.1. Toma de agua abierta

Este tipo de captación se caracteriza porque puede estar afectada por actividad orgánica y biológica importante, presencia de sólidos en suspensión, amplio margen de variación de temperaturas y mayor exposición a la contaminación, con lo que se reduce el rendimiento de la instalación. Es por ello que solo se recurre a este tipo de captación en las instalaciones de agua de mar, cuando las condiciones de impermeabilidad del terreno no permiten realizar una captación cerrada.

Existen dos tipos principales de esta captación: toma en canal o toma mediante emisario submarino. En ambos casos el agua captada a una determinada distancia de la costa, debe ser recogida en un depósito, no siempre necesario, desde el que mediante las correspondientes bombas es impulsada a la instalación desaladora.

El objeto de dicho depósito es garantizar un suministro sin interrupciones a la instalación y actuar a modo de decantador para mejorar las condiciones físicas del agua de alimentación.

Es más frecuente en las instalaciones de mayor tamaño, ya que además actúa como reserva en el caso de avería de alguna de las bombas de la toma y se suele emplear también para bombeo del agua de limpieza de los filtros.

La toma en canal es de menor longitud y generalmente más superficial, por lo que está sometida a la acción del oleaje y, en consecuencia, se ve afectada por la presencia de algas contaminantes y turbidez propia de su emplazamiento. Se suele instalar a la entrada del mismo dispositivo de filtración para evitar la entrada de suciedad que podrían romper las bombas.

Cuando las características de la costa son de una elevada turbidez o gran oleaje, es preciso recurrir a emisarios submarinos. En este caso la tubería de captación debe ser de un material resistente a la corrosión y flexible y debe sumergirse en el mar a la distancia conveniente para garantizar una profundidad mínima que evite la influencia del oleaje.

7.1.2. Toma de agua cerrada

La toma de agua mediante pozo es la más favorable y la que siempre hay que intentar construir. Sin embargo, ello implica la permeación de caudales, a veces importantes, a través de los distintos estratos del terreno, que no siempre es posible lograr.

Con esta solución suele presentarse escasa o nula actividad biológica, limpieza del agua como consecuencia de su filtrado en el terreno, baja contaminación y temperaturas bastante estables, lo que redundaría favorablemente en la explotación de la instalación. Sin embargo, la desventaja principal es la propia permeabilidad del terreno, que dificulta conseguir grandes caudales de extracción y los contenidos importantes de algunos elementos secundarios como sílice, flúor o nitratos que exigen un tratamiento previo antes de alimentar las membranas.

7.1.3. Solución adoptada para la captación

En este caso se decide tomar como solución para el proyecto la toma de agua cerrada ya que, a pesar del desconocimiento de las características del terreno, con ella se obtiene una calidad de agua de captación mucho más adecuada que en el caso de tomas de agua superficiales, así que se supone que la permeabilidad es adecuada.

Se decide la colocación de tres pozos de captación en el lugar del emplazamiento de la instalación, dentro de los cuales se sumergen 3 bombas de captación. Dos de ellas funcionan permanentemente, suministrando a la planta cada una de ellas la mitad del caudal de alimentación necesario para el funcionamiento de la planta. La tercera es del mismo tamaño que las otras dos y solo entrará en funcionamiento cuando alguna de las que mantienen un funcionamiento continuo falle.



Figura 24. Ubicación aproximada de los pozos de captación

Los pozos se colocan a 20 metros del punto de alimentación según la figura 24, para asegurar la presencia de agua en cada uno de ellos. Esta colocación permite que el dimensionamiento de las bombas sea igual para los tres casos ya que las pérdidas de carga serán las mismas en todos los casos.

7.1.4. Bombas de captación

El tipo de bombas que se utiliza en la captación de agua depende de la solución adoptada para ésta, que en este caso será captación cerrada, por lo que se utilizan bombas sumergibles.

El caudal suministrado por cada una de las bombas es de $185.04 \text{ m}^3/\text{h}$ y debe proporcionar, cada una de ellas, una presión de 4.5 bar, para asegurar que el agua llegue con presión suficiente a la bomba de alta presión con el fin de que esta no cavite.

Se tienen en cuenta a los fabricantes de bombas Flowserve, Lowara y KSB para el dimensionado de las bombas de captación, si bien solo se obtienen resultados de bombas sumergibles que funcionen con las condiciones requeridas para el fabricante KSB.

| Fabricante | Modelo | Rendimiento bomba (%) |
|------------|--------------|-----------------------|
| KSB | UPA 250C-150 | 78.7 |

Tabla 4. Rendimiento para el modelo de bomba de captación seleccionado

La bomba seleccionada tiene una potencia eléctrica instalada de 60 kW.

7.2. Pretratamiento del agua de mar

La existencia de pretratamiento del agua de mar se prevé con el fin de que las membranas de ósmosis inversa operen en condiciones óptimas. La presencia de ciertos elementos en el agua, distintos a las sales disueltas, suelen dar lugar a lo que se denomina ensuciamiento. Principalmente existen tres formas básicas de ensuciamiento que son: incrustaciones, ensuciamiento por materia particulada y ensuciamiento de origen biológico.

Estas diversas formas de ensuciamiento reducen la cantidad y calidad de agua producto por lo que es necesario realizar diversas labores de pretratamiento al agua antes de su entrada en las unidades de desalación. La forma de realizar el pretratamiento variará en función de cómo sea el punto de captación del agua de mar. En este caso la instalación tendrá una toma de agua mediante pozo, es decir cerrada, que es la forma más favorable, ya que presenta ventajas como la limpieza del agua como consecuencia de su filtrado en el terreno, ausencia de actividad biológica y orgánica, baja contaminación y temperaturas bastante estables. Por el contrario, también se presenta inconvenientes, como contenidos importantes en algunos elementos secundarios como sílice o flúor.

Por tanto, el agua deberá alcanzar unos determinados requisitos previos a su entrada en la instalación que se conseguirán mediante un adecuado pretratamiento físico y químico. Sin entrar en detalle se comenta brevemente el proceso se debería seguir: el agua de mar se somete a una filtración primaria a través de filtros de arena, sobre los que tiene lugar una retención de materia particulada del agua de mar. El agua filtrada pasará a la segunda etapa de filtración, la filtración de afino mediante filtros de cartucho. Esta microfiltración tiene por objeto eliminar las partículas que pudieran pasar la filtración primaria, protegiendo tanto a las membranas como a las bombas. Los filtros se deben cambiar cuando la pérdida de carga ocurrida en ellos alcance 2.5 bar, según recomendaciones del fabricante 3M.

Por otro lado, el pretratamiento químico comienza con la dosificación de bisulfito para desinfectar el agua además de reducir el pH. Además, para prevenir los problemas de incrustaciones de sales minerales se dosificará antiincrustante

antes de la filtración de afino con el fin de garantizar un mínimo de tiempo de reacción.

7.3. Proceso de desalación por ósmosis inversa

7.3.1. Generalidades

En el proceso de ósmosis inversa del agua de mar se ha considerado un sistema de bomba-motor, sistema de recuperación y booster que permita aprovechar la energía de la salmuera con lo que se logra reducir el consumo energético específico en proceso al máximo posible.

El sistema de recuperación de energía a considerar será un intercambiador de presión que, previsiblemente, alcanzará un rendimiento superior al 95% y reducciones considerables del consumo específico de la instalación.

Existirán dos flujos bien diferenciados de agua de mar tras haber pasado la filtración por cartuchos. Por un lado, el caudal equivalente al de producto será aspirado por la bomba de alta presión que lo impulsará hacia el bastidor que contiene las membranas. Por otro lado, la energía presente en el agua de rechazo del módulo de membranas, en forma de presión, será recuperada mediante un intercambiador de presión; energía que se transmitirá al caudal de alimentación equivalente al caudal de salmuera, mientras que una bomba booster le comunicará el incremento de presión necesario para alcanzar la presión adecuada a la entrada del bastidor que contiene las membranas.

7.3.2. Bastidor de ósmosis inversa

En el bastidor, el agua filtrada es tratada y bombeada por el grupo de presión pasando a través de las membranas de ósmosis inversa que van alojadas en el interior de los tubos de presión y, este a su vez está acoplado a un bastidor.

Las membranas que irán colocadas en el bastidor de ósmosis inversa serán elegidas del catálogo de membranas para agua de mar ofrecidas por la empresa Hydranautics.

Esta empresa ofrece para este proceso 6 tipos de membranas: SWC4 MAX, SWC4-LD, SWC5 MAX, SWC5-LD, SWC6 MAX Y SWC6-LD. Las membranas SWC4 son las que tienen mayor rechazo y están diseñadas para tratar diversos niveles de salinidades del agua y producir bajos niveles de sólidos totales disueltos permeados. Por otro lado, las membranas SWC5 están diseñadas cuando se necesitan bajos TDS y bajas presiones de alimentación y finalmente las membranas SWC6 se utilizan cuando la temperatura del agua de alimentación del mar es baja que normalmente necesitan grandes presiones de entrada. Las membranas SWC4-LD, SWC5-LD Y SWC6-LD tienen como característica adicional que se utilizan cuando es necesario minimizar el ensuciamiento coloidal. Finalmente, la membrana SWC4 MAX se utiliza en aplicaciones que necesiten excepcionales rechazos de sal y boro, por lo que se utiliza para producir agua potable cuando la concentración de boro permeado es crítica, la membrana SWC5 MAX se utiliza cuando es necesario un gran rechazo de sales y una gran eficiencia energética y la membrana SWC6-MAX ofrece un gran ahorro de costes y energía.

Según lo descrito anteriormente, se ha decidido que la membrana que mejor se adapta a las condiciones del peticionario es la SWC4 MAX, ya que ofrece una mejor calidad de agua para consumo humano, y por tanto es la que se utilizará para realizar la desalación en la planta.

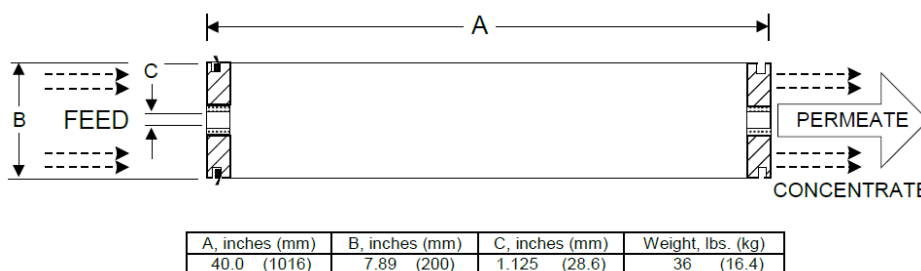


Figura 25. Medidas y peso de cada tubo de presión con membranas SWC4 MAX

Por otro lado, la instalación se puede realizar con una o varias etapas, esto quiere decir que puede existir una única fuente de alimentación de las membranas o varias. La utilización de varias etapas tendría justificación en instalaciones con gran necesidad de caudal permeado, pues a mayor número de etapas, se eleva el caudal recuperado como producto.

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

Es por ello, que se ha decidido que al ser el caudal requerido no muy elevado y ser necesaria una calidad del agua elevada, ya que esta es para consumo humano, que la instalación disponga de una única etapa.

Dicha etapa cuenta con 41 tubos de presión con 6 membranas por tubo, según los cálculos realizados por el programa, teniendo en cuenta el caudal que es capaz de permear cada tubo de presión y el factor de conversión elegido para las mismas.

7.3.3. Recuperación de energía

La energía es el mayor responsable de los costes de operación de la planta de la desalinización por ósmosis inversa, lo que hace del equipo de recuperación de energía una parte fundamental del proceso.

En este sentido, se han ido introduciendo paulatinamente mejoras en el diseño de las plantas de ósmosis inversa. Actualmente existen dos principales recuperadores de energía utilizados en dichas instalaciones: turbocharger e intercambiador de presión.

7.3.3.1. Turbocharger

Este equipo consta de dos cámaras de alta presión y que se instala normalmente entre la descarga de la bomba de alta presión y las membranas, de forma que actúa como una bomba booster de alta presión y como recuperador de la energía proveniente del rechazo. La gran ventaja es que con su funcionamiento hidráulico no hay necesidad de prever un motor de accionamiento eléctrico.

7.3.3.2. Intercambiador de presión

El intercambiador de presión aumenta la eficiencia de la planta al aprovechar la energía presente en la salmuera de rechazo. El agua de alimentación a baja presión se hace pasar por el interior del intercambiador, de modo que se produce el intercambio de presiones, confiriéndole la presión que porta el rechazo. Este se dimensiona para bombear un caudal igual al de permeado y no para el caudal de alimentación.

7.3.3.3. Comparativa

Se aprovecha el software de dimensionado de membranas para hacer una comparativa, a grandes rasgos, del consumo específico que tendría la planta utilizando como recuperador de energía el turbocharger y el intercambiador de presión.

Esta comparativa es simplemente orientativa con el fin de elegir el sistema de recuperación más adecuado, ya que el software considera unos consumos para las bombas que seguramente no coincidan con las elegidas y, además, no tiene en cuenta los consumos de las bombas de captación y distribución.

| Equipo | Consumo específico (kWh/m ³) |
|---------------------------|--|
| Turbocharger | 3.33 |
| Intercambiador de presión | 2.63 |

Tabla 5. Comparativa entre los consumos específicos de la instalación según el software IMSdesign para distintos sistemas de recuperación de energía

Teniendo en cuenta los datos de la tabla anterior, se considera que el sistema de recuperación de energía elegido es el intercambiador de presión ya que genera un menor consumo específico.

El intercambiador seleccionado es el proporcionado por el fabricante Flowserve. Este intercambiador, de la marca Calder, es el dispositivo de recuperación de energía más eficiente desarrollado actualmente. Puede recuperar hasta el 98% de la energía del rechazo de salmuera, que se usa para presurizar el agua de mar filtrada y reducir el consumo de energía de las bombas de alimentación de alta presión hasta en un 60%.

Con el DWEER, la bomba de alta presión no tiene que estar conectada con el dispositivo de recuperación de energía. Esto permite el uso de menos bombas, pero más grandes y más eficientes. Gracias a que la recuperación de energía es independiente del caudal de la bomba de alta presión no hay punto de eficiencia óptima. Debido a su curva de eficiencia plana, el DWEER es capaz de funcionar de manera eficiente con cualquier rango de caudales y presiones sin necesidad de ajustes.

Teniendo en cuenta los datos de caudal y presión de rechazo proporcionados por el software de membranas, se determina para el intercambiador una eficiencia del 97.4%, obteniendo una presión para el agua de alimentación de 66.8 bar.

7.3.4. Bomba de alta presión

Después del pretratamiento descrito en apartados anteriores, parte del agua tratada, 167 m³/hora, alimenta a la aspiración del grupo de bombeo de alta presión que eleva su presión a las condiciones requeridas para la alimentación del bastidor de membranas, es decir, 68.5 bar.

Se recurre a distintos fabricantes de maquinaria industrial para hallar la bomba de alta presión que mejor se ajuste, en términos de eficiencia, a los requerimientos previamente descritos.

En este caso, se recurre a los fabricantes Flowserve, Lowara y KSB para el dimensionado de la bomba, utilizando para ello sus respectivas aplicaciones online en las que ofrecen la bomba más eficiente de su catálogo.

| Fabricante | Modelo | Rendimiento bomba (%) |
|------------|-------------------|-----------------------|
| Flowserve | 4X10DMXD-A | 78.4 |
| KSB | Multitec RO A 100 | 76.3 |
| Lowara | MPE 125.0 | 74.76 |

Tabla 6. Rendimientos para los distintos modelos de bomba de alta presión adecuados

Teniendo en cuenta los datos reflejados en la tabla 6, se determina que la bomba adecuada es la proporcionada por el fabricante Flowserve, ya que presenta el mayor rendimiento. Dicha bomba presenta una potencia instalada de 447 kW.

7.3.5. Bomba booster

El agua de alimentación, que ha pasado por el recuperador de energía, dispone de una presión aproximada a la de salida del rechazo del bastidor de ósmosis inversa que es de 67.3 bar. Por lo tanto, la presión de salida, debido a la pérdida de carga a través de conducciones y recuperador de energía, es inferior a la presión de alimentación requerida por el bastidor y producida por la bomba principal de alta presión.

Por este motivo, se hace imprescindible colocar una bomba booster en la línea de salida del agua de mar del recuperador de energía, que supla la presión necesaria para la entrada al bastidor.

Para realizar el dimensionado de la bomba Booster, se recurre a los fabricantes utilizados para el dimensionado de la bomba de alta presión, teniendo un caudal de 202.8 m³/hora y un aumento de presión por parte de la misma de 1.76 bar.

En este caso, solo se obtiene una bomba que trabaje con dichas condiciones y es la proporcionada por el fabricante Flowserve.

| Fabricante | Modelo | Rendimiento bomba (%) |
|------------|-------------------|-----------------------|
| Flowserve | 2K6x4M-10HRV M3SM | 84 |

Tabla 7. Rendimiento para el modelo de bomba Booster seleccionado

Esta bomba tiene una potencia eléctrica instalada de 15 kW.

7.4. Distribución de agua de mar

Se pretende que la distribución de agua se realice hacia un depósito situado a mayor cota que la instalación desaladora y la población a la que se suministra el agua potable, con la previsión de realizar la posterior distribución desde el depósito por gravedad hasta los consumidores.

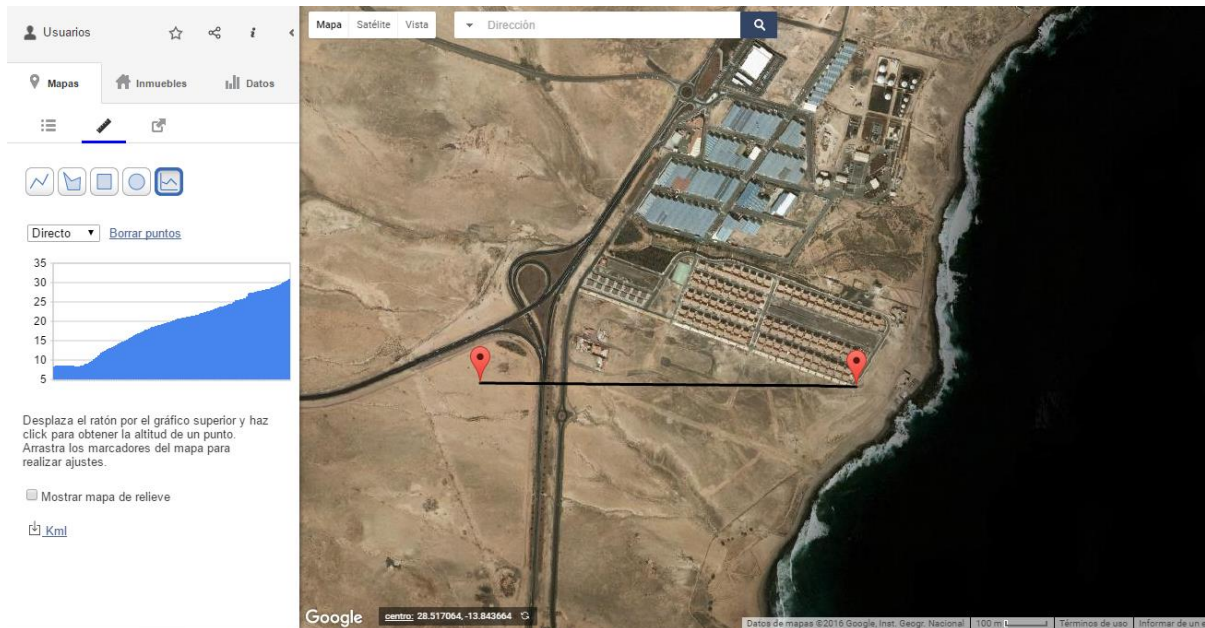


Figura 26. Diferencia de cota entre el emplazamiento de la instalación y el lugar de colocación del depósito de distribución

7.4.1. Bombas de distribución

La bomba de distribución tiene que suministrar el caudal permeado por la planta, es decir, 166.67 m³/hora. Asimismo, deber elevar dicho caudal a una altura manométrica de 24.23 metros.

Teniendo en cuenta las condiciones de servicio que deben tener las bombas, se recurre a los fabricantes Flowserve, KSB y Lowara para dimensionar la bomba, si bien solo se obtienen bombas adecuadas para los dos primeros fabricantes.

| Fabricante | Modelo | Rendimiento bomba (%) |
|------------|---------------|-----------------------|
| Flowserve | MBLC100-80-60 | 80.1 |
| KSB | ETN 100-80-60 | 77.3 |

Tabla 8. Rendimientos para los distintos modelos de bomba de distribución adecuados

Teniendo en cuenta los rendimientos obtenidos, resumidos en la tabla anterior, se elige la bomba proporcionada por Flowserve, que presenta una potencia eléctrica instalada de 16 kW.

7.5. Rechazo de salmuera

Se determina que el rechazo de salmuera se realiza mediante la colocación de un emisario submarino que finalice lo suficientemente lejos de la costa como para que no afecte a la salinidad del agua de captación.

Según datos obtenidos del Instituto Español de Oceanografía, la primera isóbata de la que se tienen datos con respecto a la costa de Fuerteventura, se encuentra a 25 metros de profundidad y 1170 metros de distancia lineal con respecto al lugar de emplazamiento de la planta. Para tener en cuenta posibles irregularidades del terreno se considera que la tubería tiene una longitud de 1250 metros.

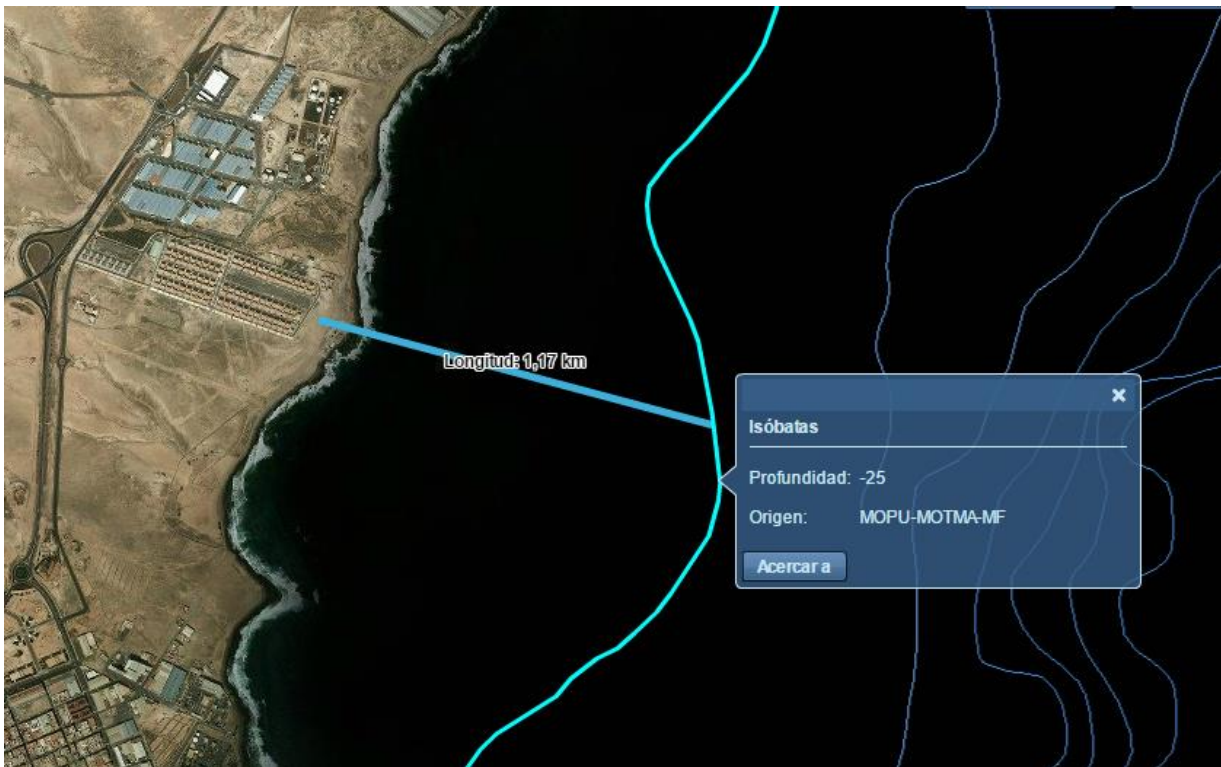


Figura 27. Isóbata más cercana a la costa de Puerto del Rosario

Dicho emisario debe conducir el rechazo de $203.7 \text{ m}^3/\text{hora}$ mar a dentro. Para ello, no es necesaria la utilización de ninguna bomba, ya que con la diferencia de cota el fluido es capaz de llegar al punto de salida, según se puede comprobar en el Anexo I.

7.6. Postratamiento del agua de mar

El postratamiento del agua desalada tiene como finalidad regular los valores que sean necesarios para conseguir la potabilidad de dicha agua. Aunque, como en el caso del pretratamiento, no se entra en detalle en el dimensionado del postratamiento, si se destacan aspectos que deben tenerse en cuenta.

Se ha de tener en cuenta el valor de pH obtenido para el permeado, que en este caso es muy bajo, siendo este de 5.3. Según la tabla 3, habría que aumentarlo a valores de entre 6.5 y 9.5 para hacerla óptima para consumo humano.

Este problema se puede solucionar añadiendo productos químicos al agua permeada o bien mezclándola con otras aguas potables.

Asimismo, se debe prestar especial atención a los niveles de boro que, si bien este caso se mantiene por debajo del nivel establecido, puede llegar a ser tóxico, suministrado en valores elevados, para los humanos.

7.7. Sistema eólico

7.7.1. Recurso eólico

Como se comentó en el apartado 3.5 de este documento, es necesario determinar el recurso eólico existente en el lugar de la instalación del aerogenerador, que en este caso coincide con el emplazamiento de la planta desaladora. Esto es fundamental, ya que en función de las velocidades del viento, cambiará el aerogenerador necesario para alimentar la planta.

Inicialmente, se obtiene la Rosa de los vientos con el fin de conocer cuál es la dirección predominante del viento durante el año. Este gráfico se construye a partir de datos proporcionados por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía teniendo en cuenta las coordenadas del emplazamiento.

| Dirección | Frecuencia (%) | Velocidad (m/s) | Potencia (%) | Weibull C (m/s) | Weibull K |
|-----------|----------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------|
| N | 13,11 | 6,583 | 15,35 | 7,325 | 2,885 |
| NNE | 28,07 | 6,991 | 35,63 | 7,67 | 3,324 |
| NE | 24,71 | 6,621 | 25,76 | 7,221 | 3,518 |
| ENE | 8,69 | 5,261 | 4,83 | 5,797 | 3,195 |
| E | 3,52 | 4,797 | 2,05 | 5,645 | 2,493 |
| ESE | 1,66 | 4,565 | 1 | 5,542 | 2,201 |
| SE | 1,29 | 4,709 | 0,94 | 5,397 | 1,737 |
| SSE | 1,13 | 5,53 | 1,21 | 6,15 | 1,747 |
| S | 0,45 | 3,938 | 0,21 | 4,45 | 1,619 |
| SSW | 0,47 | 5,261 | 0,64 | 5,68 | 1,333 |
| SW | 0,81 | 5,154 | 0,66 | 5,708 | 1,813 |
| WSW | 1,41 | 4,74 | 0,71 | 5,217 | 2,201 |
| W | 2,42 | 5,279 | 1,56 | 5,784 | 2,387 |
| WNW | 2,82 | 5,417 | 1,83 | 5,922 | 2,638 |
| NW | 3,36 | 5,342 | 1,98 | 5,88 | 3,061 |
| NNW | 6,07 | 6,145 | 5,66 | 6,71 | 2,693 |

Tabla 9. Resumen de datos del recurso eólico proporcionados por el IDAE

Con los datos de dirección y frecuencia se obtiene la Rosa de los vientos de frecuencias, que indica la dirección predominante del viento la mayor parte del tiempo.

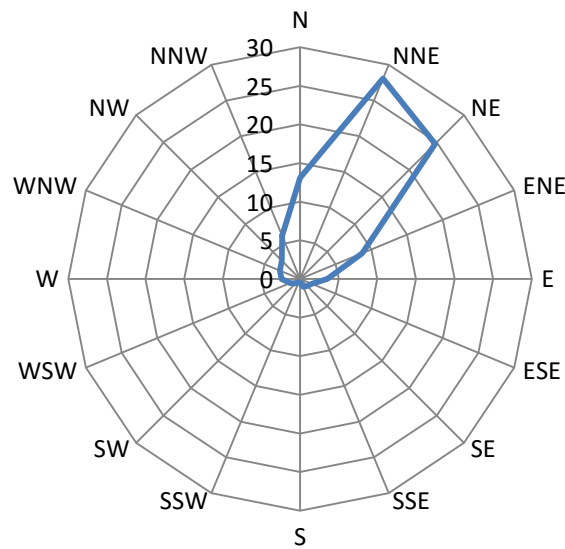


Figura 28. Rosa de los vientos de frecuencias

Del mismo modo, con los datos de dirección y velocidad se realiza la Rosa de los vientos de velocidades, en la que se refleja que velocidad predomina en cada dirección.

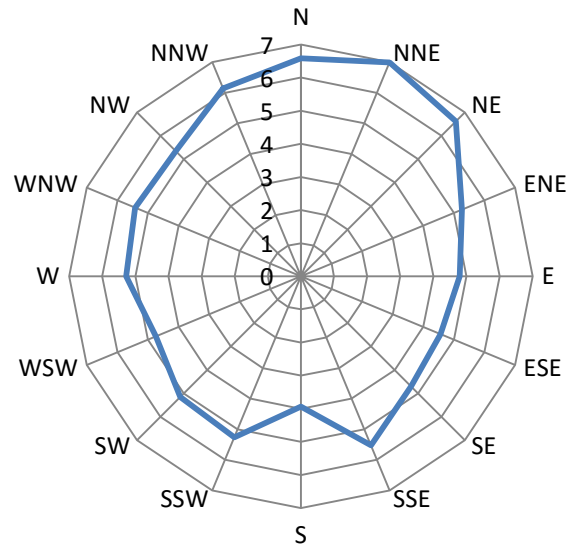


Figura 29. Rosa de los vientos de velocidades

En conclusión, y como se puede observar en las figuras 29 y 30, el viento sopla con mayor frecuencia en dirección Norte-nordeste, dándose la mayor velocidad también en dicha dirección, por lo que se deduce que el aerogenerador estará orientado la mayor parte del año en dicha dirección.

Por otro lado, se realiza la distribución de probabilidades de Weibull con el fin de determinar cuál es la probabilidad de que la velocidad del viento sea de un determinado valor.

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

Donde:

$f(v)$ = probabilidad de velocidad de viento en el intervalo v

k = factor de forma de Weibull; refleja la amplitud de la distribución

c = factor de escala de Weibull

v = velocidad del viento

En este sentido, se utiliza la función proporcionada por Excel para calcular dicha distribución. Inicialmente se toma un valor medio para el factor de escala y de forma de Weibull, extraído de los datos de la tabla 9.

| | |
|---------------------------------|------|
| Factor de forma de Weibull (K) | 2,76 |
| Factor de escala de Weibull (C) | 6,2 |

Tabla 10. Factores de Weibull

Con los factores anteriormente expresados, se halla la distribución de Weibull para cada velocidad.

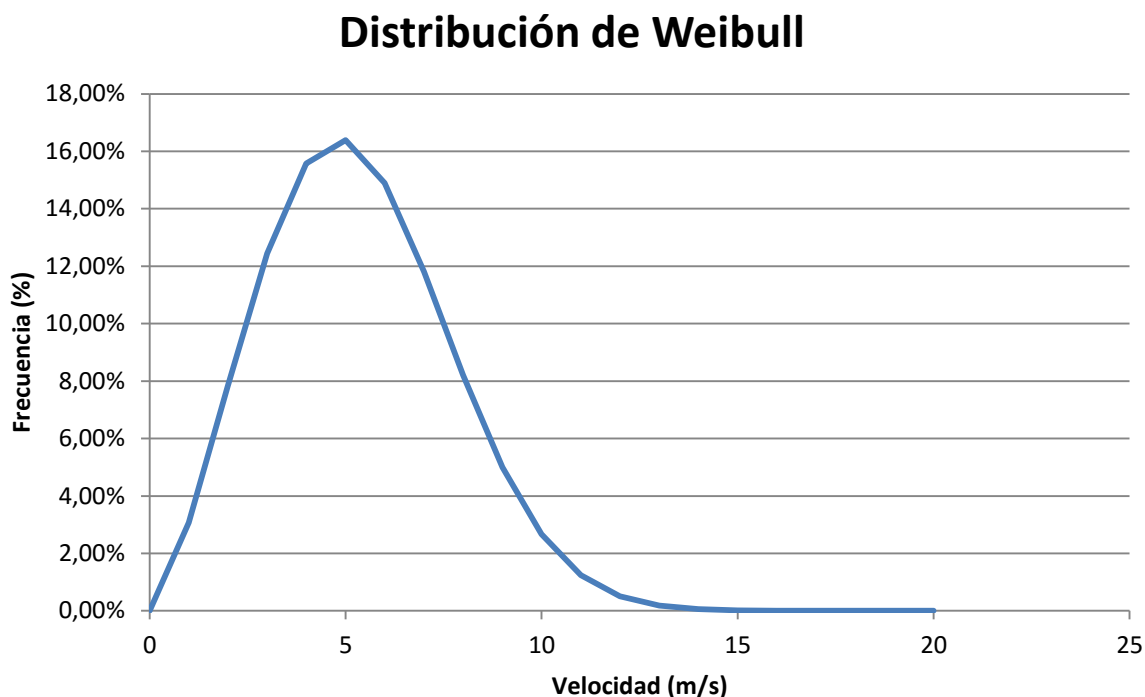


Figura 30. Distribución de Weibull a partir de los datos proporcionados por la IDAE

Se observa que los vientos que se dan con mayor frecuencia son aquellos comprendidos entre 3 y 8 m/s de velocidad.

7.7.2. Selección del aerogenerador

Según el cálculo realizado en el Anexo I, se obtiene un consumo de la planta desaladora de 598 kW. Este valor se traduce en un consumo de energía de 4714632 kWh consumidos en el periodo de un año, teniendo en cuenta una disponibilidad de la instalación del 90%, que tendrá que aportar el aerogenerador a la planta.

Teniendo en cuenta dicho valor, se calcula la energía anual estimada que proporcionan distintos aerogeneradores, teniendo en cuenta su curva de potencia y las horas al año a las que se da una determinada velocidad del viento. Este cálculo se realiza de forma más detallada en el Anexo II.

| Modelo de aerogenerador | Energía anual estimada (kWh) |
|-------------------------|------------------------------|
| GE ENERGY GE 2,5 XL | 5475111,7 |
| MADE AE-90/2 MW | 5016912,5 |
| NORDEX N90/2500 LS | 5049035,7 |
| REPOWER MM-92 | 4986328,7 |
| SIEMENS SWT-2,3-93 | 5072608,5 |
| VESTAS V90/1800 | 4833900,4 |

Tabla 11. Modelos de aerogeneradores que se ajustan a la producción anual necesaria

Como se puede observar en la tabla anterior, el aerogenerador que mejor se ajusta al consumo de la planta es el proporcionado por el fabricante VESTAS, con 4833900.4 kWh de producción de energía anual.

Además, como parámetro adicional se determina el factor de carga de cada aerogenerador.

$$FC(\%) = \frac{\text{Producción anual (kWh)}}{\text{Potencia nominal (kW)}} * \frac{100\% * 1 \text{ día}}{365 \text{ días} * 24 \text{ horas}}$$

Este parámetro indica que porcentaje de tiempo al año trabaja el aerogenerador a su máxima potencia, considerando la calificación para un aerogenerador con Factor de carga mayor al 30% de muy bueno.

| Modelo | Energía anual estimada (kWh) | Potencia nominal (kW) | Factor de carga (%) | Calificación |
|---------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------|
| GE ENERGY GE 2,5 XL | 5475111,7 | 2500 | 25,00 | Bueno |
| MADE AE-90/2 MW | 5016912,5 | 2000 | 28,64 | Bueno |
| NORDEX N90/2500 LS | 5049035,7 | 2500 | 23,05 | Aceptable |
| REPOWER MM-92 | 4986328,7 | 2000 | 28,46 | Bueno |
| SIEMENS SWT-2,3-93 | 5072608,5 | 2000 | 28,95 | Bueno |
| VESTAS V90/1800 | 4833900,4 | 1800 | 30,66 | Muy bueno |

Tabla 12. Factor de carga determinado para cada modelo de aerogenerador

Teniendo en cuenta la producción de energía y el factor de carga, se determina que el aerogenerador elegido es el VESTAS V90/1800, ya que es el que mejor se ajusta a la producción necesaria así como el que presenta un mejor Factor de carga.

Con los datos calculados anteriormente se obtiene una producción sobrante de 119268.4 kWh al año, es decir, se desperdicia una potencia de 13.62 kW.

7.7.3. Estudio del aprovechamiento energético

Como el viento es un recurso un tanto impredecible, existe la posibilidad de que durante determinados periodos del año, la planta necesite estar conectada a la red eléctrica para asegurar el funcionamiento continuo de la misma. Asimismo, se podría contemplar la opción de instalar un sistema de abastecimiento mediante energía fotovoltaica como complemento, ya que se dispondría de dos fuentes independientes de energía renovable, aportando así mayor seguridad al suministro.

Del mismo modo, ante la imprevisibilidad del recurso eólico, también pueden existir momentos del año en que la energía proporcionada por el aerogenerador sea mayor a la que necesita la planta, por lo que en este caso, habría que buscar una alternativa para no desaprovechar dicha energía.

Una opción sería inyectar dicha energía en la red eléctrica, ya que la Ley del Sector Eléctrico garantiza la prioridad en el acceso a las redes de transporte y de distribución de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables. Sin embargo, esta prioridad está condicionada al mantenimiento de la fiabilidad y seguridad de las redes, por lo que se da la circunstancia que en momentos de alta producción eólica y baja demanda, la electricidad a partir de fuentes renovables es restringida por el operador del sistema.

Esta situación obliga a buscar soluciones alternativas que permitan almacenar la energía sobrante de forma que esta no se desperdicie.

Hoy en día existen principalmente tres tipos de formas de almacenar la energía eólica sobrante: la elevación de agua, la compresión de aire y el almacenamiento químico como el hidrógeno o el metano.

La elevación de agua o bombeo reversible, consiste en almacenar energía eléctrica en forma de energía potencial. Cuando hay un excedente de producción de energía, se bombea el agua desde un embalse a otro que se encuentra a mayor altura aumentando la energía potencial de la masa de agua bombeada. Cuando se requiere un pico de energía eléctrica, se deja caer el agua del embalse superior al que se encuentra situado a menor altura, haciendo pasar esa agua por una turbina y generando electricidad. El principal problema del bombeo reversible es la

dependencia de la orografía del terreno y, en este caso, no resulta propicia ya que no existen grandes diferencias de altura en el emplazamiento elegido.

Por otro lado, cuando la demanda de la red es baja y no se puede inyectar energía en la misma, se pueden poner a trabajar unos compresores para comprimir aire y cuando la demanda sea alta se emplea ese aire comprimido para mover una serie de turbinas las cuales generan electricidad. La mayor limitación en este caso es la capacidad del propio depósito.

Finalmente, el último concepto de almacenamiento de energía es el denominado Power to Gas (P2G). El principio de esta tecnología consiste en el uso de la electricidad para la disociación de la molécula de agua mediante electrólisis para obtener oxígeno e hidrógeno. Una vez producido se puede almacenar y distribuir el hidrógeno producido, consumirlo en estaciones de servicio para vehículos urbanos o potencia el gas para uso doméstico. Asimismo, es posible la inyección de este hidrógeno resultante en la red de gas natural tras un proceso de metanización.

8. Resultados finales

En este apartado se detallan las determinaciones finales que se han hecho para la instalación de desalación alimentada mediante energía eólica, que debe producir 4000 m³/día de agua desalada.

8.1. Desalación

8.1.1. Captación

La captación se realiza mediante toma de agua cerrada, con la colocación de tres pozos ubicados en el emplazamiento de la instalación desaladora debido a su proximidad al mar. Dichos pozos tienen una separación mínima entre ellos de 20 metros y disponen de 40 metros de profundidad. En ellos se colocan tres bombas sumergibles, proporcionadas por el fabricante KSB. Dos de dichas bombas funcionan permanentemente, mientras que la tercera funciona en caso de rotura o mantenimiento de alguna de las bombas principales.

8.1.2. Pretratamiento

A pesar de que no se ha realizado un dimensionado exhaustivo del pretratamiento que necesita el agua de mar antes de entrar al núcleo de desalación, si se establecen una serie de recomendaciones a tener en cuenta.

Se deben realizar dos tipos de pretratamiento, uno físico y otro químico. En el pretratamiento físico se eliminan en gran parte los elementos sólidos del agua mediante la realización de una filtración inicial con filtros de arena seguida de una filtración por cartuchos.

Por otro lado, en el pretratamiento químico se ajustan los parámetros que pueden afectar a la composición química de las membranas. Se utiliza antiincrustante para evitar la corrosión y la precipitación de sales minerales.

8.1.3. Núcleo de desalación

El núcleo de la desalación consta de la bomba de alta presión, el bastidor de membranas, un sistema de recuperación de energía y una bomba booster.

- Bomba de alta presión: bomba de cámara partida del fabricante Flowserve
- Bastidor de membranas: se opta por la utilización de membranas con alto rechazo de boro proporcionadas por el fabricante Hydranautics.
- Recuperador de energía: intercambiador de presión de la marca Calder.
- Bomba booster: bomba proporcionada por el fabricante Flowserve.

Cabe destacar que, tanto para la bomba de alta presión como para la bomba booster, debe instalarse una bomba con las mismas características para que, en caso de rotura o mantenimiento de alguna de ellas, pueda asegurarse el funcionamiento continuo de la planta.

8.1.4. Rechazo de salmuera

Para el rechazo se utiliza un emisario submarino que transporta la salmuera a 1.25 km de la costa, con el fin de asegurar que no afecte a la salinidad del agua de captación. En este caso no es necesaria la colocación de ninguna bomba.

8.1.5. Distribución y postratamiento

La distribución de agua se realiza mediante una bomba proporcionada por el fabricante Flowserve hacia un depósito situado a mayor cota con el fin de realizar desde él, la distribución a la población por gravedad.

Se plantea la colocación de una segunda bomba de distribución con el fin de que ésta entre en funcionamiento en caso de avería o mantenimiento de la principal, asegurando así el funcionamiento continuo de la planta.

En cuanto al postratamiento, éste se debe realizar antes de que el agua sea consumida por la población, ajustando el pH mediante la adición de químicos o mezclando el agua desalada con otras aguas potables.

9. Conclusiones

Mediante la realización de este proyecto se han podido poner en práctica los conocimientos adquiridos durante el desarrollo del Grado, si bien se han aplicado conceptos relativos a unas asignaturas en mayor medida que otras. En este sentido, se han podido poner en práctica conceptos estudiados en Ingeniería Fluidomecánica, Instalaciones y Máquinas Hidráulicas y Oficina Técnica principalmente.

En cuanto a la realización del proyecto, la redacción de éste ha permitido tomar un contacto más cercano con lo que podría ser un proyecto real a realizar por un ingeniero técnico en la vida laboral del mismo, ya que su redacción ha implicado toma de decisiones ante diferentes posibles soluciones, búsqueda de información veraz y contrastada, así como lectura e interpretación de leyes.

Por otro lado, en cuanto al proyecto en concreto, éste está enfocado hacia el abastecimiento de un recurso que escasea, tanto en el mundo en general como en las Islas Canarias concretamente, y que tiene gran importancia para sus habitantes. En este sentido, el crecimiento de la población implicará el uso cada vez más extendido de tecnologías de desalación para obtener agua potable. Además, se plantea la alimentación de la planta mediante energías renovables, lo que resulta de vital importancia en un mundo que cada vez se encuentra con mayores niveles de contaminación.

En conclusión, de este modo se consigue un sistema útil que produce un producto de primera necesidad que, además, no perjudica al medioambiente de forma tan impactante como tecnologías basadas en combustibles fósiles desarrolladas, antaño en mayor medida, y que hoy en día siguen siendo un grave problema para la evolución natural del planeta.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TITULACIÓN: GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DE UNA PLANTA DE DESALACIÓN ALIMENTADA MEDIANTE
ENERGÍA EÓLICA

AUTOR: IRINA AMPARO LÓPEZ HERNÁNDEZ

TUTOR: VICENTE JOSÉ ROMERO TERNERO

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Dimensionado de la instalación desaladora..... | 11 |
| 1.1. Dimensionado del núcleo de desalación | 11 |
| 1.1.1. Elección de las membranas..... | 11 |
| 1.1.2. Dimensionado del intercambiador de presión..... | 17 |
| 1.1.3. Dimensionado de la bomba de alta presión..... | 23 |
| 1.1.4. Dimensionado de la bomba Booster..... | 27 |
| 1.2. Dimensionado del sistema de captación | 29 |
| 1.2.1. Cálculo de pérdidas de carga | 32 |
| 1.2.1.1. Cálculo de pérdidas de carga de la tubería de alimentación..... | 32 |
| 1.2.1.2. Cálculo de pérdidas de carga en la tubería de captación | 35 |
| 1.2.1.3. Cálculo de pérdidas de carga debidas a accesorios | 36 |
| 1.2.1.4. Cálculo de pérdidas de carga debidas a la unión de la tubería de alimentación y las de captación..... | 37 |
| 1.2.2. Elección de las bombas de captación..... | 37 |
| 1.3. Dimensionado del sistema de distribución | 40 |
| 1.3.1. Cálculo de pérdidas de carga | 40 |
| 1.3.1.1. Cálculo de pérdidas de carga debido a la tubería de distribución ... | 40 |
| 1.3.1.2. Cálculo de pérdidas de carga secundarias | 42 |
| 1.3.2. Elección de la bomba de distribución | 42 |
| 1.4. Dimensionado del sistema de rechazo de salmuera | 45 |
| 1.4.1. Cálculo de pérdidas de carga | 45 |
| 1.4.1.1. Cálculo de pérdidas de carga debido a tuberías | 45 |
| 1.4.1.2. Cálculo de pérdidas de carga secundarias | 47 |
| 1.4.2. Elección de la bomba de rechazo..... | 48 |
| 1.5. Dimensionado del pretratamiento | 49 |
| 1.5.1. Pretratamiento químico..... | 49 |

| | |
|--|----|
| 1.5.2. Pretratamiento físico | 50 |
| 1.6. Dimensionado del postratamiento | 50 |
| 1.7. Consumo específico de la planta..... | 51 |
| 2. Dimensionado del sistema eólico | 55 |
| 2.1. Determinación del recurso eólico..... | 55 |
| 2.2. Selección del aerogenerador | 59 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Temperaturas medias máximas y mínimas del agua de mar en las islas Canarias (Puertos del Estado) | 13 |
| Figura 2. Datos de análisis introducidos en el Software IMSdesign. | 14 |
| Figura 3. Datos de diseño introducidos en el software IMSdesign | 15 |
| Figura 4. Selección de la membrana en el software IMSdesign..... | 15 |
| Figura 5. Datos iniciales para el dimensionado del intercambiador de presión | 16 |
| Figura 6. Especificación del bastidor de membranas | 16 |
| Figura 7. Resultados de cálculo según los parámetros establecidos para la primera iteración del intercambiador de presión..... | 17 |
| Figura 8. Valores de caudal, presión, TDS, pH y Boro en cada paso de la desalación según el software IMSdesign | 18 |
| Figura 9. Esquema de la instalación desaladora proporcionado por la hoja Excel del intercambiador en la primera iteración | 19 |
| Figura 10. Datos obtenidos del Excel del intercambiador para la segunda iteración | 20 |
| Figura 11. Segunda iteración para el dimensionado del intercambiador | 20 |
| Figura 12. Reultados de cálculo según los parámetros establecidos para la segunda iteración..... | 21 |
| Figura 13. Variación de los datos de presión, TDS, pH y Boro tras la segunda iteración en el software IMSdesign..... | 21 |
| Figura 14. Esquema de la instalación proporcionado por la hoja Excel del dimensionado del intercambiador tras la segunda iteración..... | 22 |
| Figura 15. Datos obtenidos del Excel del intercambiador para la tercera iteración ... | 22 |
| Figura 16. Curvas características para la bomba de alta presión proporcionada por Flowserve | 24 |
| Figura 17. Curvas características para la bomba de alta presión proporcionada por KSB | 25 |
| Figura 18. Curvas características para la bomba de alta presión proporcionada por Lowara | 26 |
| Figura 19. Bomba multietapa de cámara partida proporcionada por Flowserve, modelo 4X10DMXD-A | 27 |
| Figura 20. Curvas características para la bomba Booster proporcionada por Flowserve | 28 |

| | |
|--|----|
| Figura 21. Ubicación aproximada de los pozos de captación..... | 30 |
| Figura 22. Elevación máxima del terreno donde se va a construir la planta desaladora | 31 |
| Figura 23. Datos del nivel del mar en Puerto del Rosario (REDMAR)..... | 31 |
| Figura 24. Diámetros nominales para tuberías de PRFV del fabricante FLOWTITE | 33 |
| Figura 25. Curvas características para la bomba de captación proporcionada por KSB..... | 39 |
| Figura 26. Diferencia de cota entre el lugar de instalación de la planta desaladora y el depósito de distribución | 40 |
| Figura 27. Curvas características para la bomba de distribución más adecuada proporcionada por Flowserve | 43 |
| Figura 28. Curvas características para la bomba de distribución más adecuada proporcionada por KSB..... | 44 |
| Figura 29. Isóbata más cercana a la costa de Puerto del Rosario (IEO). | 45 |
| Figura 30. Recurso eólico para las coordenadas de la desaladora (IDAE) | 55 |
| Figura 31. Rosa de los vientos de frecuencias | 56 |
| Figura 32. Rosa de los vientos de velocidades..... | 57 |
| Figura 33. Distribución de Weibull a partir de los datos proporcionados por la IDAE | 59 |
| Figura 34. Curva de potencia para el aerogenerador seleccionado | 62 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Composición química del agua del Océano Atlántico | 12 |
| Tabla 2. Características físico-químicas y relativas a sustancias no deseables en el agua potable..... | 12 |
| Tabla 3. Datos solicitados para el cálculo del ERD | 19 |
| Tabla 4. Datos solicitados para el cálculo del ERD | 20 |
| Tabla 5. Rendimientos para los distintos modelos de bomba de alta presión adecuados..... | 26 |
| Tabla 6. Rendimiento para el modelo de bomba Booster seleccionado..... | 29 |
| Tabla 7. Viscosidad cinemática del agua a 1 bar | 34 |
| Tabla 8. Iteración para la obtención del factor de fricción para la tubería de alimentación | 34 |
| Tabla 9. Datos para hallar las pérdidas de carga de la conducción de alimentación | 35 |
| Tabla 10. Iteración para la obtención del factor de fricción para la tubería de captación..... | 36 |
| Tabla 11. Resumen de datos necesarios para hallar las pérdidas de carga en la conducción de alimentación | 36 |
| Tabla 12. Pérdidas de carga en la captación | 38 |
| Tabla 13. Rendimiento para el modelo de bomba de captación elegido | 39 |
| Tabla 14. Iteración para la obtención del factor de fricción para la tubería de distribución | 41 |
| Tabla 15. Datos para hallar las pérdidas de carga de la conducción de distribución | 42 |
| Tabla 16. Pérdidas de carga en la distribución..... | 43 |
| Tabla 17. Rendimientos para los distintos modelos de bomba de distribución adecuados..... | 44 |
| Tabla 18. Iteración para la obtención del factor de fricción para la tubería de rechazo | 46 |
| Tabla 19. Datos para hallar las pérdidas de carga en la conducción de rechazo..... | 47 |
| Tabla 20. Pérdidas de carga en la conducción de rechazo..... | 48 |
| Tabla 21. Consumo de potencia de la instalación..... | 51 |
| Tabla 22. Consumo específico de las bombas de la planta | 51 |
| Tabla 23. Resumen de datos del recurso eólico proporcionado por IDAE | 56 |
| Tabla 24. Factores necesarios para calcular la distribución de Weibull | 58 |

| | |
|---|----|
| Tabla 25. Tabla de frecuencias de velocidades según la distribución de Weibull y horas al año que ocurre cada velocidad | 58 |
| Tabla 26. Modelos de aerogeneradores que se ajustan a la producción anual necesaria | 60 |
| Tabla 27. Calificación del funcionamiento de un aerogenerador según el factor de carga (Villarrubia López)..... | 61 |
| Tabla 28. Factor de carga determinado para cada modelo de aerogenerador | 61 |

ANEXO I

DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN DESALADORA

1. Dimensionado de la instalación desaladora

En este anexo se describe el procedimiento llevado a cabo a la hora de dimensionar los distintos equipos incluidos en el sistema de desalación.

1.1. Dimensionado del núcleo de desalación

Inicialmente, se comienza por dimensionar el núcleo de la desalación, consistente en el bastidor de membranas, el recuperador de energía, la bomba de alta presión y la bomba booster.

1.1.1. Elección de las membranas

Para realizar la elección de las membranas, se deben tener en cuenta una serie de factores que afectan a su dimensionado, como son la salinidad, el pH y la temperatura del agua de mar captada en la zona del emplazamiento donde se va a situar la obra.

Se comienza con el análisis químico del agua de la zona. Como no se dispone de datos concretos del punto de realización de la obra, se toman como válidos los valores obtenidos del análisis químico de agua del laboratorio LABAQUA realizado a una muestra remitida por la desaladora de Santa Cruz de Tenerife.

Cationes

| | |
|-----------------|------------|
| Calcio | 431 mg/l |
| Magnesio | 1470 mg/l |
| Potasio | 451 mg/l |
| Sílice | 1.1 mg/l |
| Sodio | 11870 mg/l |

Aniones

| | |
|--------------------|------------|
| Bicarbonato | 141.5 mg/l |
| Cloruro | 21280 mg/l |
| Fluoruros | 862 µg/l |
| Nitratos | 0.7 mg/l |
| Sulfatos | 3148 mg/l |

| Metales | |
|------------------|-----------|
| Bario | 17 µg/l |
| Boro | 5.23 mg/l |
| Estroncio | 10 mg/l |

Tabla 1. Composición química del agua del Océano Atlántico

Por otro lado, se debe tener en cuenta que dichos valores de la composición química deben descender hasta un límite establecido según el Real Decreto 140/2003, donde se definen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

| Parámetro | Valor paramétrico |
|------------------|--------------------------|
| pH | 6.5<pH<9.5 |
| Amonio | 0.5 mg/l |
| Boro | 1 mg/l |
| Cloruro | 250 mg/l |
| Fluoruro | 1.5 mg/l |
| Nitrato | 50 mg/l |
| Sodio | 200 mg/l |
| Sulfato | 250 mg/l |

Tabla 2. Características físico-químicas y relativas a sustancias no deseables en el agua potable

En cuanto al valor de pH tomado, se establece un pH de 8, para la misma muestra de agua y el mismo laboratorio mencionados anteriormente.

Para la temperatura, se toman los valores medios máximos y mínimos proporcionados por “Puertos del Estado” para la temperatura superficial de las aguas de las costas Canarias, obteniendo un valor de 19°C para la temperatura de diseño de captación del agua de mar, teniendo en cuenta que ésta se realizará en pozo y no en superficie.

| Ts: Temperatura Superficial Media del Agua/ <i>Mean Surface Temperature of Water</i> ° C | | | | |
|--|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|
| Boya de Gran Canaria 1997 - 2016 | | | | |
| Mes/ <i>Month</i> | Ts Max./ <i>Max. Ts</i> | Año/ <i>Year</i> | Ts Min./ <i>Min. Ts</i> | Año/ <i>Year</i> |
| Enero/ <i>January</i> | 21.7 | 2011 | 18.3 | 2009 |
| Febrero/ <i>February</i> | 20.8 | 2010 | 17.6 | 2015 |
| Marzo/ <i>March</i> | 20.7 | 2002 | 17.4 | 2015 |
| Abril/ <i>April</i> | 21.4 | 2003 | 17.7 | 2015 |
| Mayo/ <i>May</i> | 22.0 | 2011 | 18.0 | 2015 |
| Junio/ <i>June</i> | 23.3 | 2009 | 19.2 | 2015 |
| Julio/ <i>July</i> | 23.3 | 2003 | 20.5 | 2015 |
| Agosto/ <i>August</i> | 25.1 | 2004 | 20.9 | 2009 |
| Septiembre/ <i>September</i> | 25.6 | 2012 | 22.1 | 2005 |
| Octubre/ <i>October</i> | 25.6 | 2015 | 21.1 | 2008 |
| Noviembre/ <i>November</i> | 24.7 | 2015 | 20.0 | 2008 |
| Diciembre/ <i>December</i> | 22.6 | 2009 | 19.0 | 2008 |

Generado por/*Generated by* Puertos del Estado

Figura 1. Temperaturas medias máximas y mínimas del agua de mar en las islas Canarias (Puertos del Estado)

Una vez establecidos los parámetros necesarios para dimensionar las membranas, se procede a introducir dichos valores en el software seleccionado, el IMSdesign de Hydranautics (Nitto Group Company).

Inicialmente, en la primera ventana emergente que aparece, se seleccionan las unidades deseadas para trabajar así como el idioma. Seguidamente, se fijan los parámetros de análisis que solicita el programa, estableciendo los valores del análisis químico, pH y temperatura ya mencionados.

En cuanto a la toma de agua se establece como “Mar pozo convencional”, ya que ésta es la determinación tomada para la captación, según se comenta en el apartado “Análisis de soluciones” de la Memoria.

| | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------------|------------|----------------|-----------|--------------|--------------|------------|--------|-----------------|-----------------------|--|
| Proyecto: | ESIDEO | | Calculado por: | Irina | | Temperatura: | 19,0 °C | | Tipo de agua: | Mar Pozo Convencional | |
| pH | 8,00 | | CO3 | 1,30 mg/l | | CO2 | 0,763 mg/l | | E Conductividad | 60103,5 µs/cm | |
| Cationes | | | Aniones | | | | | | | | |
| | mg/l | mg/l CaCO3 | | mg/l | mg/l CaCO3 | | | | | | |
| Ca | 431,00 | 1077,50 | HCO3 | 141,50 | 115,98 | | | | | | |
| Mg | 1470,00 | 6024,59 | SO4 | 3148,00 | 3279,17 | | | | | | |
| Na | 11870,00 | 25804,35 | Cl | 21280,00 | 30014,10 | | | | | | |
| K | 451,00 | 576,76 | F | 0,86 | 2,26 | | | | | | |
| NH4 | 0,00 | 0,00 | NO3 | 0,70 | 0,56 | | | | | | |
| Ba | 0,017 | 0,01 | PO4 | 0,00 | 0,00 | | | | | | |
| Sr | 10,000 | 11,41 | SiO2 | 1,10 | | | | | | | |
| | | | B | 5,23 | | | | | | | |
| Total, meq/l | | | 669,89 | | Total, meq/l | | | 668,66 | | | |
| Saturaciones | | | | | | | | | | | |
| TDS Calculado | 38822 mg/l | | CaSO4 | 24,7 % | | | | | | | |
| Fuerza ionica | 0,774 | | BaSO4 | 72,4 % | | | | | | | |
| Presión osmotica | 27,7 bar | | SrSO4 | 35,7 % | | | | | | | |
| Ca3(PO4)2 SI | 0,00 | | CaF2 | 14,2 % | | | | | | | |
| | | | Silica | 0,9 % | | | | | | | |

Figura 2. Datos de análisis introducidos en el Software IMSdesign.

Seguidamente, se introducen los parámetros de diseño que solicita el software. El pH se modifica con el fin de que este se ajuste en el pretratamiento a 7, ya que un pH muy elevado podría dañar a las membranas, como ya se comentó en el apartado “Requisitos de diseño” de la Memoria, utilizando para ello el ácido sulfúrico.

La conversión se establece en un 45%, ya que cuando se colocan las membranas en tubos de presión, el valor máximo de recuperación por tubo de 6 membranas es del 45% según la literatura.

El caudal permeado se establece en 4000 m³/día, según los requisitos de diseño, y la edad de las membranas en 3 años, ya que no sería fiable realizar el diseño con un valor de 0 años.

El aporte de partículas que superan todos los elementos del pretratamiento se contemplan como un coeficiente reductor, el coeficiente de disminución de flujo por año, comprendido entre el 5 y el 10% según sea el tipo de agua a tratar. En este caso se fija en un 5%.

Asimismo, el coeficiente de ensuciamiento es un factor reductor que contempla el conjunto de los dos aspectos mencionados anteriormente, es decir, la edad de la membrana y el coeficiente de disminución de flujo por año. Por tanto, al variar estos dos parámetros, el software corrige automáticamente dicho valor.

Por último, en cuanto al incremento de paso de sales al año se establece según el material de las membranas. Para membranas de poliamida se supone un incremento anual de entre el 5 y el 15% por lo que en este caso se establece en un 7%.

| Trenes | | Paso 1 | | Paso 1 | |
|-------------------------|------|--------|--------|---|-------|
| pH Alimentación | | | 7,00 | Producto químico | H2SO4 |
| Conversión | % | | 45,00 | Concentración de la solución,% | 100 |
| Caudal de permeado, | m3/d | | 4000,0 | Tasa de dosificación de productos químico | mg/l |
| Flujo promedio | lmh | | 0,000 | Edad membrana | años |
| Caudal de alimentación, | m3/d | | 8888,9 | Disminución Fluj por año | |
| Caudal de rechazo | m3/d | | 4888,9 | Factor de ensuciamiento | |
| | | | | Incremento de paso de sales/año, % | 7,0 |

Figura 3. Datos de diseño introducidos en el software IMSdesign

A continuación, se establece el sistema de recuperación de energía, el número de etapas, que en este caso será una, y además se establece el tipo de membrana a utilizar.

Primero, se selecciona la membrana SWC4 MAX debido a que es la que mejor condiciones finales ofrece para el caudal permeado con los requisitos requeridos, como ya se comentó en el apartado “Análisis de soluciones” de la Memoria.

| Selección de elemento | | | | | | | | | | | |
|------------------------|--|--------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------|----------------|--------------------------|-------------------------------|--------------|--|
| Membranas recomendadas | | | | | | | | | | | |
| | Modelo | Producción nominal (GPD) | Rechazo de sal,% | Tipo de elemento | Tamaño (IN X IN) | Área (Pies cuadrados) | spaciado (mil) | Presión de prueba (psig) | Presión de alimentación (bar) | TDS permeado | |
| C | <input checked="" type="checkbox"/> SWC4 MAX | 7200 | 99,8 | SWRO Highest Rejection | 8 X 40 | 440 | 28 | 800 | 67,8 | 126 | |
| C | <input type="checkbox"/> SWC4-LD | 6500 | 99,8 | SWRO High Rejection Low ... | 8 X 40 | 400 | 34 | 800 | | | |
| C | <input type="checkbox"/> SWC5 MAX | 9900 | 99,8 | SWRO High Rejection | 8 X 40 | 440 | 28 | 800 | | | |
| C | <input type="checkbox"/> SWC5-LD | 9000 | 99,8 | SWRO High Rejection Low ... | 8 X 40 | 400 | 34 | 800 | | | |
| C | <input type="checkbox"/> SWC6 MAX | 6600 | 99,6 | SWRO Highest Flow | 8 X 40 | 440 | 28 | 600 | | | |
| C | <input type="checkbox"/> SWC6-LD | 6000 | 99,6 | SWRO High Flow Low Dp | 8 X 40 | 400 | 34 | 600 | | | |

Figura 4. Selección de la membrana en el software IMSdesign

Seguidamente, se selecciona como sistema de recuperación de energía (Energy Recovery Device) un intercambiador de presión, como se indicó en el apartado “Análisis de soluciones” de la Memoria.

Inicialmente, se mantienen los parámetros proporcionados por el programa para posteriormente ajustarlos a la instalación.

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

Figura 5. Datos iniciales para el dimensionado del intercambiador de presión

Finalmente, se establece el número de etapas, el número de tubos de presión y el número de elementos por tubo. En este caso se fija una única etapa, con 41 tubos de presión que contienen 6 membranas por tubo.

| Especificación del Sistema | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|---|
| Tipo de elemento | <input type="text" value="SWC4 MAX"/> | Etapas |
| Elementos / tubo de presión | <input type="text" value="6"/> | Paso1 <input type="text" value="1"/> |
| Nº de tubos de presión | <input type="text" value="41"/> | <input type="button" value="Recalcular arreglo"/> |

Figura 6. Especificación del bastidor de membranas

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

| Resultados de Cálculo | | | | | | | | | (Todos los caudales son) |
|-----------------------|-----------------|--------------------|------------|---------------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------------|
| Arreglo | Tubo de presión | Alimentación (bar) | Conc (bar) | Alimentación (m3/h) | Conc (m3/h) | Flujo (lmh) | Flujo máximo (lmh) | Beta máximo | |
| 1-1 | 41 | 69,5 | 68,2 | 9,03 | 4,97 | 16,6 | 26,1 | 1,04 | |

| Concentración de permeado | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------|-----|-------|------|-------|-----|--------|------|-------|-----|-------------|
| Ca | 0,351 | K | 2,202 | Sr | 0,008 | Cl | 74,973 | P04 | 0,000 | CO2 | 8,036 |
| Mg | 1,198 | NH4 | 0,000 | HCO3 | 0,907 | NO3 | 0,018 | SiO2 | 0,003 | CO3 | 0,000 |
| Na | 46,373 | Ba | 0,000 | SO4 | 2,785 | F | 0,006 | B | 0,641 | pH | 5,3 |
| | | | | | | | | | | TDS | 129,47 mg/l |

| Saturaciones del rechazo y parámetros | | | | | | | |
|---------------------------------------|------|----------|-----|------------------|----------|-----|--------------|
| CaSO4, % | 54 | SrSO4, % | 78 | Fuerza ionica | 1,44 | pH | 7,3 |
| BaSO4, % | 148 | SiO2, % | 2 | Presión osmotica | 51,7 bar | TDS | 72439,0 mg/l |
| Ca3(P04)2 SI | 0,00 | CaF2, % | 151 | Langelier | 0,72 | | |

Figura 7. Resultados de cálculo según los parámetros establecidos para la primera iteración del intercambiador de presión

Finalmente, se obtiene una presión de alimentación de las membranas de 69.5 bar y una presión para el rechazo de 68.2 bar. Con estos datos se realizará el dimensionado del intercambiador de presión.

1.1.2. Dimensionado del intercambiador de presión

El intercambiador seleccionado va a ser el proporcionado por el fabricante Flowserve. Este intercambiador, de la marca Calder, es el dispositivo de recuperación de energía más eficiente desarrollado actualmente. Puede recuperar hasta el 98% de la energía del rechazo de salmuera, que se usa para presurizar el agua de mar filtrada y reducir el consumo de energía de las bombas de alimentación de alta presión hasta en un 60%.

Con el DWEER, la bomba de alta presión no tiene que estar conectada con el dispositivo de recuperación de energía. Esto permite el uso de menos bombas, pero más grandes y más eficientes. Gracias a que la recuperación de energía es independiente del caudal de la bomba de alta presión no hay punto de eficiencia óptima. Debido a su curva de eficiencia plana, el DWEER es capaz de funcionar de manera eficiente con cualquier rango de caudales y presiones sin necesidad de ajustes.

Según los datos obtenidos del resultado de cálculo para las membranas con el software anterior se procede a realizar una iteración para dimensionar el intercambiador de presión.

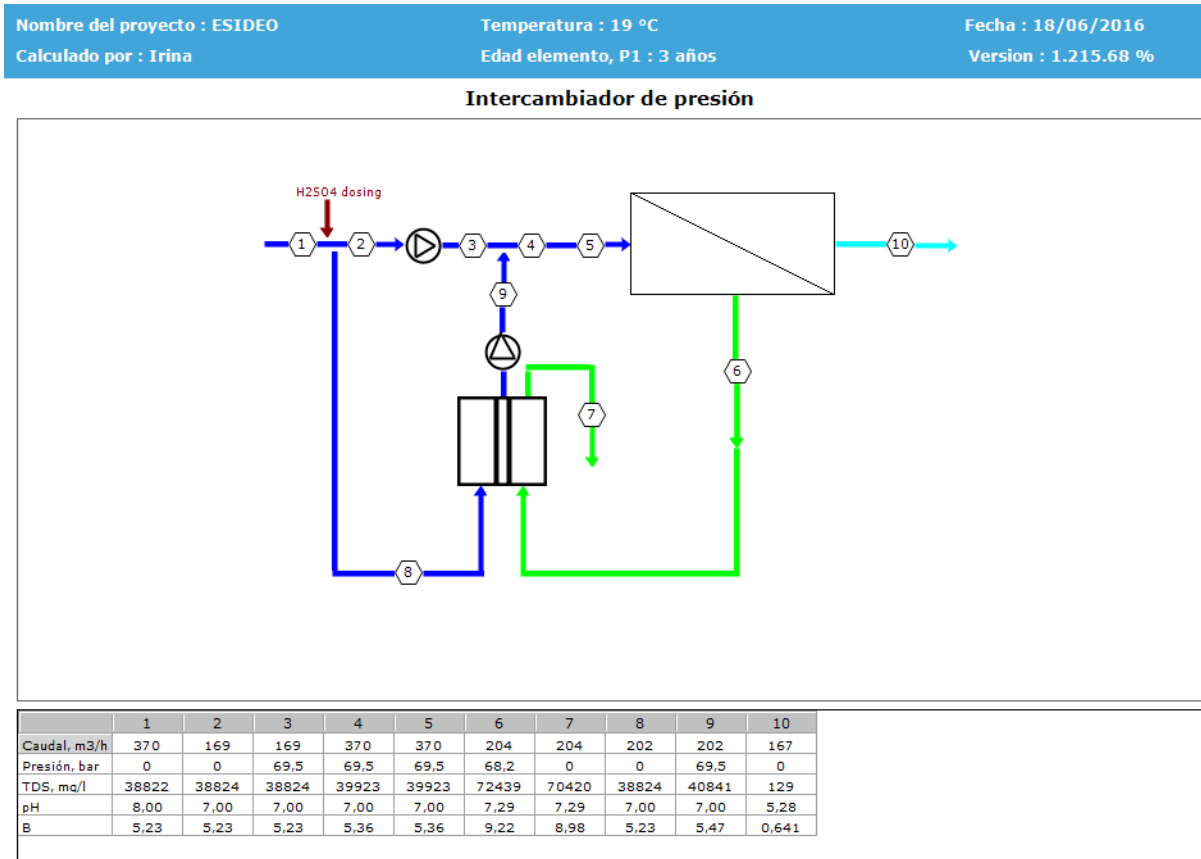


Figura 8. Valores de caudal, presión, TDS, pH y Boro en cada paso de la desalación según el software IMSdesign

Se obtiene una presión de alimentación de 69.5 bar y una de rechazo de salmuera de 68.2 bar. Dichos datos serán necesarios para el dimensionado del intercambiador.

El dimensionado del intercambiador se realiza con una hoja Excel facilitada por la página web de la empresa Flowserve. Este documento permite verificar si el intercambiador DWEER puede cubrir las necesidades de la instalación de desalación.

Inicialmente, se introducen los datos necesarios para el dimensionado según la tabla 3.

| | |
|--|---------------|
| Caudal permeado (m ³ /día) | 4000 |
| TDS permeado (ppm) | 129.47 |
| TDS alimentación (ppm) | 38822 |
| Presión de alimentación de las membranas (bar) | 69.5 |
| Caída de presión en las membranas bar) | 1.3 |
| Factor de conversión (%) | 45 |

Tabla 3. Datos solicitados para el cálculo del ERD

Con ellos, el documento Excel proporciona un esquema de la instalación con los caudales, presiones y sólidos totales disueltos en distintos puntos de la misma.

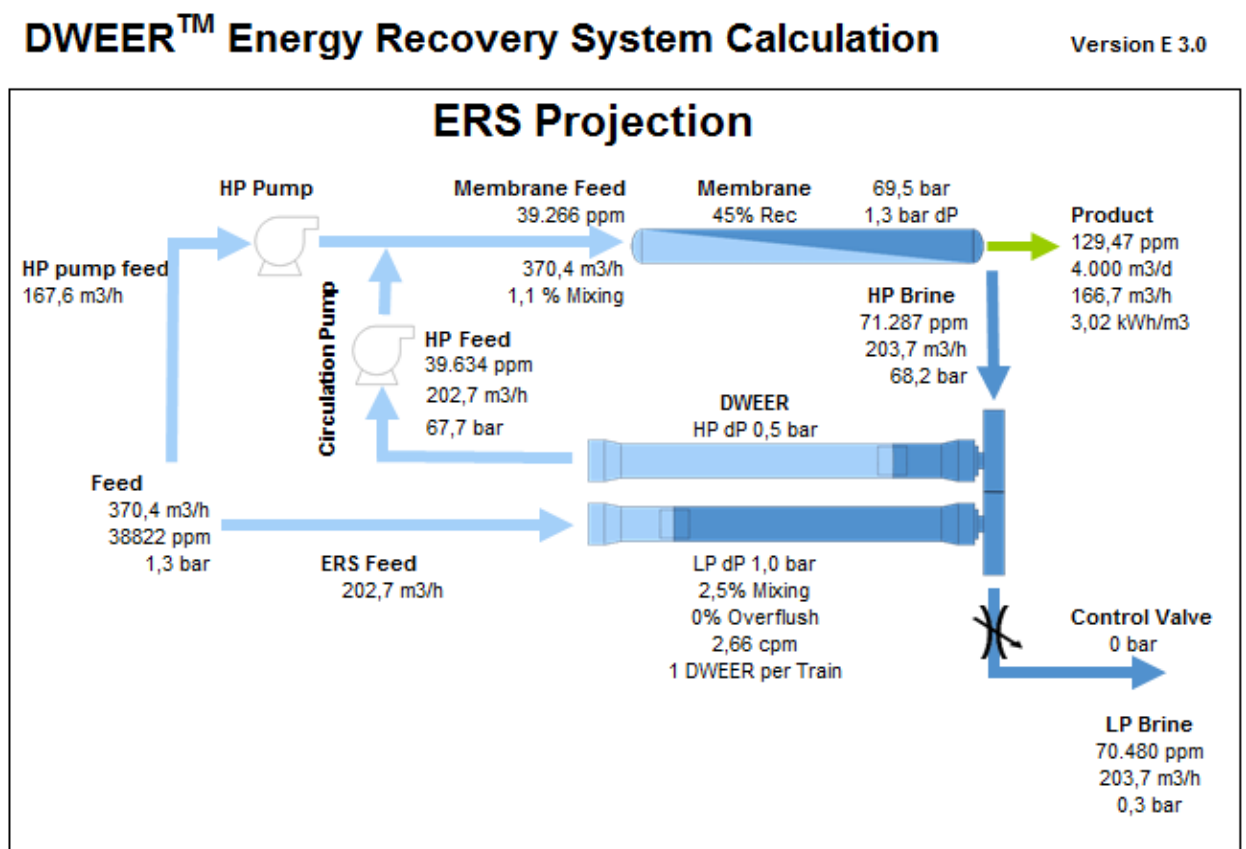


Figura 9. Esquema de la instalación desaladora proporcionado por la hoja Excel del intercambiador en la primera iteración

Seguidamente, se obtienen los datos del intercambiador necesarios para realizar la segunda iteración en el software IMSdesign, por lo que estos se modifican en el mencionado programa.

| Performance parameters | DWEER |
|------------------------|-------|
| Mixing over Device | 2,5% |
| Leakage | 0,5% |
| HP dP | 0,5 |

Figura 10. Datos obtenidos del Excel del intercambiador para la segunda iteración

Se sustituyen dichos datos en el software de dimensionado de membranas.

| Cálculos ERD | | |
|---------------------------|------|-----|
| Intercambiador de presión | | |
| Fuga | 0,50 | % |
| Mezcla volumétrica | 2,50 | % |
| H.P. diferencial | 0,50 | bar |
| Bomba booster | 1,76 | bar |

Figura 11. Segunda iteración para el dimensionado del intercambiador

Con la modificación de estos datos se produce una ligera modificación en algunos datos que se introdujeron inicialmente en el Excel de dimensionado del intercambiador, que son los que se muestran en la siguiente tabla.

| | |
|--|--------|
| TDS permeado (ppm) | 127.26 |
| Presión de alimentación de las membranas (bar) | 68.5 |
| Caída de presión en las membranas bar) | 1.2 |

Tabla 4. Datos solicitados para el cálculo del ERD

Asimismo, se observa una variación del valor del Índice de Saturación de Langelier, si bien este sigue siendo positivo, y de las cantidades de elementos químicos presentes en el permeado y en la salmuera.

| Resultados de Cálculo (Todos los caudales son po) | | | | | | | | | |
|--|-----------------|--------------------|------------|---------------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|--|
| Arreglo | Tubo de presión | Alimentación (bar) | Conc (bar) | Alimentación (m3/h) | Conc (m3/h) | Flujo (lmh) | Flujo máximo (lmh) | Beta máximo | |
| 1-1 | 41 | 68,5 | 67,3 | 9,03 | 4,97 | 16,6 | 26,0 | 1,04 | |

| Concentración de permeado | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------|-----|-------|------|-------|-----|--------|------|-------|-----|-------|
| Ca | 0,345 | K | 2,164 | Sr | 0,008 | Cl | 73,689 | P04 | 0,000 | CO2 | 8,036 |
| Mg | 1,177 | NH4 | 0,000 | HCO3 | 0,892 | NO3 | 0,018 | SiO2 | 0,003 | CO3 | 0,000 |
| Na | 45,579 | Ba | 0,000 | SO4 | 2,737 | F | 0,006 | B | 0,632 | pH | 5,3 |
| TDS 127,26 mg/l | | | | | | | | | | | |

| Saturaciones del rechazo y parámetros | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------|----------|-----|------------------|----------|-----|--------------|--|--|
| CaSO4, % | 53 | SrSO4, % | 76 | Fuerza ionica | 1,42 | pH | 7,3 | | |
| BaSO4, % | 146 | SiO2, % | 2 | Presión osmotica | 50,9 bar | TDS | 71252,8 mg/l | | |
| Ca3(PO4)2 SI | 0,00 | CaF2, % | 141 | Langelier | 0,69 | | | | |

Figura 12. Reultados de cálculo según los parámetros establecidos para la segunda iteración

Se observa que los parámetros de los elementos químicos establecidos para el permeado en la figura 12, se encuentran por debajo de los valores máximos permitidos según la tabla 2. En el caso del pH observa que este es demasiado bajo, por lo que habría que considerar su ajuste en el postratamiento.

En cuanto a los valores que aparecen destacados en amarillo en la figura 12, serán comentados en el apartado 1.5 de este anexo.

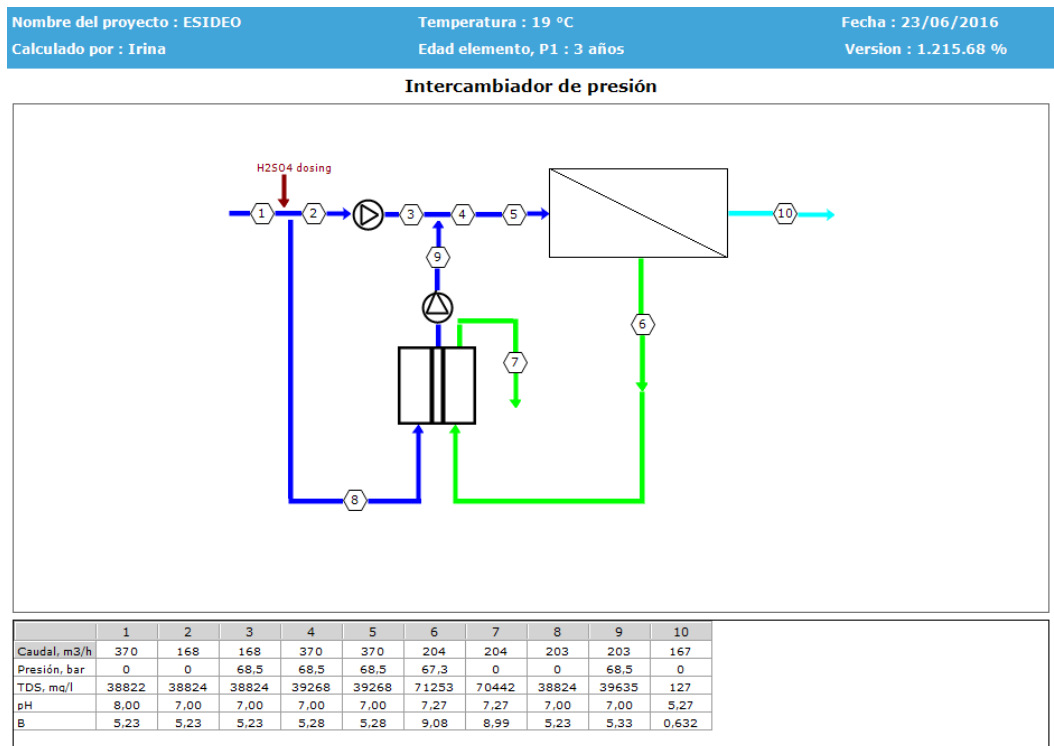


Figura 13. Variación de los datos de presión, TDS, pH y Boro tras la segunda iteración en el software IMSdesign

Por tanto, variando los datos de la Tabla 4 en el Excel del dimensionado del intercambiador, se obtiene un esquema de proyecto como se refleja a continuación.

DWEER™ Energy Recovery System Calculation

Version E 3.0

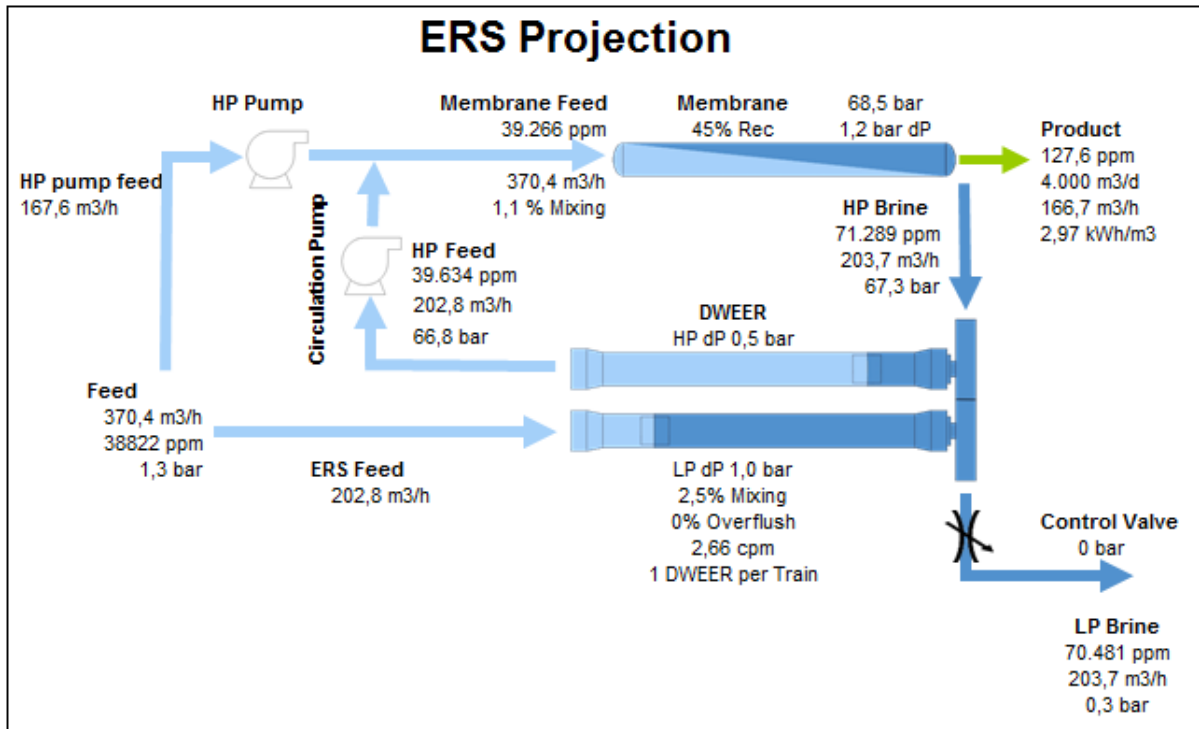


Figura 14. Esquema de la instalación proporcionado por la hoja Excel del dimensionado del intercambiador tras la segunda iteración

A la vista de los resultados obtenidos, se observa que la influencia de los parámetros alterados no varía los datos que influyen en el cálculo de las membranas, así que no es necesario realizar una tercera iteración.

| Performance parameters | DWEER |
|------------------------|-------|
| Mixing over Device | 2,5% |
| Leakage | 0,5% |
| HP dP | 0,5 |

Figura 15. Datos obtenidos del Excel del intercambiador para la tercera iteración

Además, se aprecia que todos los parámetros del intercambiador de la instalación se ajustan a los requeridos por los límites de diseño, teniendo una eficiencia en el intercambiador del 97.4%.

1.1.3. Dimensionado de la bomba de alta presión

Según los datos obtenidos del proceso anterior se obtiene una presión necesaria que debe alcanzar de 68.5 bar y un caudal de 167.6 m³/hora.

Considerando los datos mencionados anteriormente, se recurre a una serie de empresas que suministran maquinaria industrial como Flowserve, KSB y Lowara.

Inicialmente, todas las empresas solicitan el caudal que va a suministrar la bomba y la altura manométrica que debe proporcionar la misma, para lo cual se hace uso de la ecuación 1.

$$H_{AP} = \frac{P_{out} - P_{in}}{\rho * g} + z_{out} - z_{in} + \frac{v_{out}^2 - v_{in}^2}{2 * g} + \sum H_r \quad (\text{Ec. 1})$$

Para este cálculo se considera que las variaciones de energía cinética y potencial son despreciables, así como las pérdidas de carga insignificantes. Del mismo modo, se utiliza un valor de densidad aproximado para el agua (ρ) de 1000 kg/m³ y un valor para la aceleración de la gravedad (g) de 9.81 m/s². Para el valor de las presiones, se considera el valor de salida de presión de la bomba obtenido mediante el software de membranas, es decir, 68.5 bar y para la entrada se supone una presión de entrada de 2 bar para asegurar que la bomba no cavite. Teniendo en cuenta dichas consideraciones se obtiene un valor de altura para la bomba de alta presión de 698.27 metros.

$$H_{AP} = \frac{(68.5 - 2) * 10^5 Pa}{1000 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2}} = 677.88 m$$

Una vez introducidos los datos solicitados por los fabricantes de bombas se obtienen los parámetros relevantes de aquellas que presentan un mayor rendimiento. Seguidamente, se muestran las curvas características de las bombas que ofrecen un mejor rendimiento para los fabricantes anteriormente mencionados.

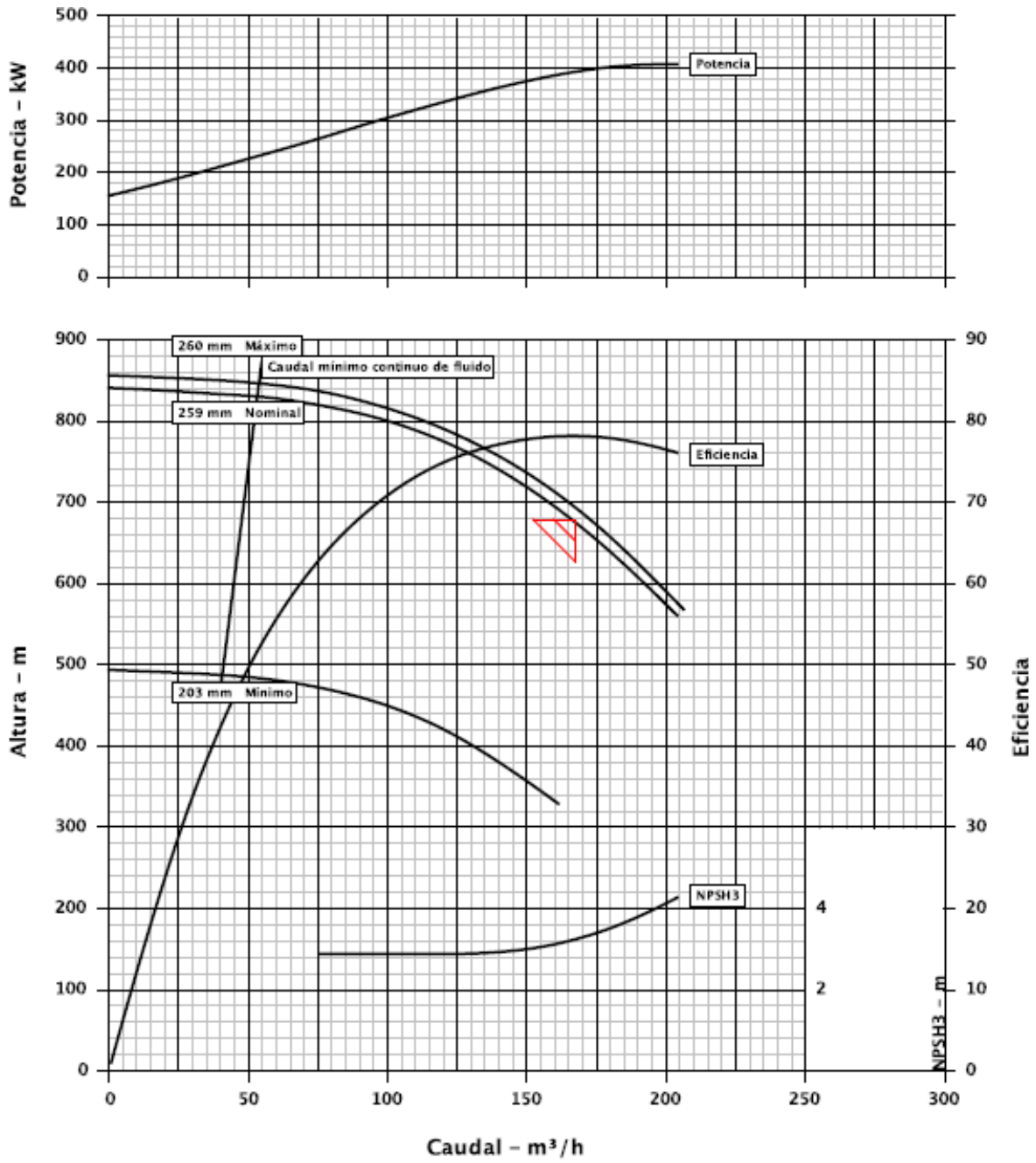


Figura 16. Curvas características para la bomba de alta presión proporcionada por Flowserve

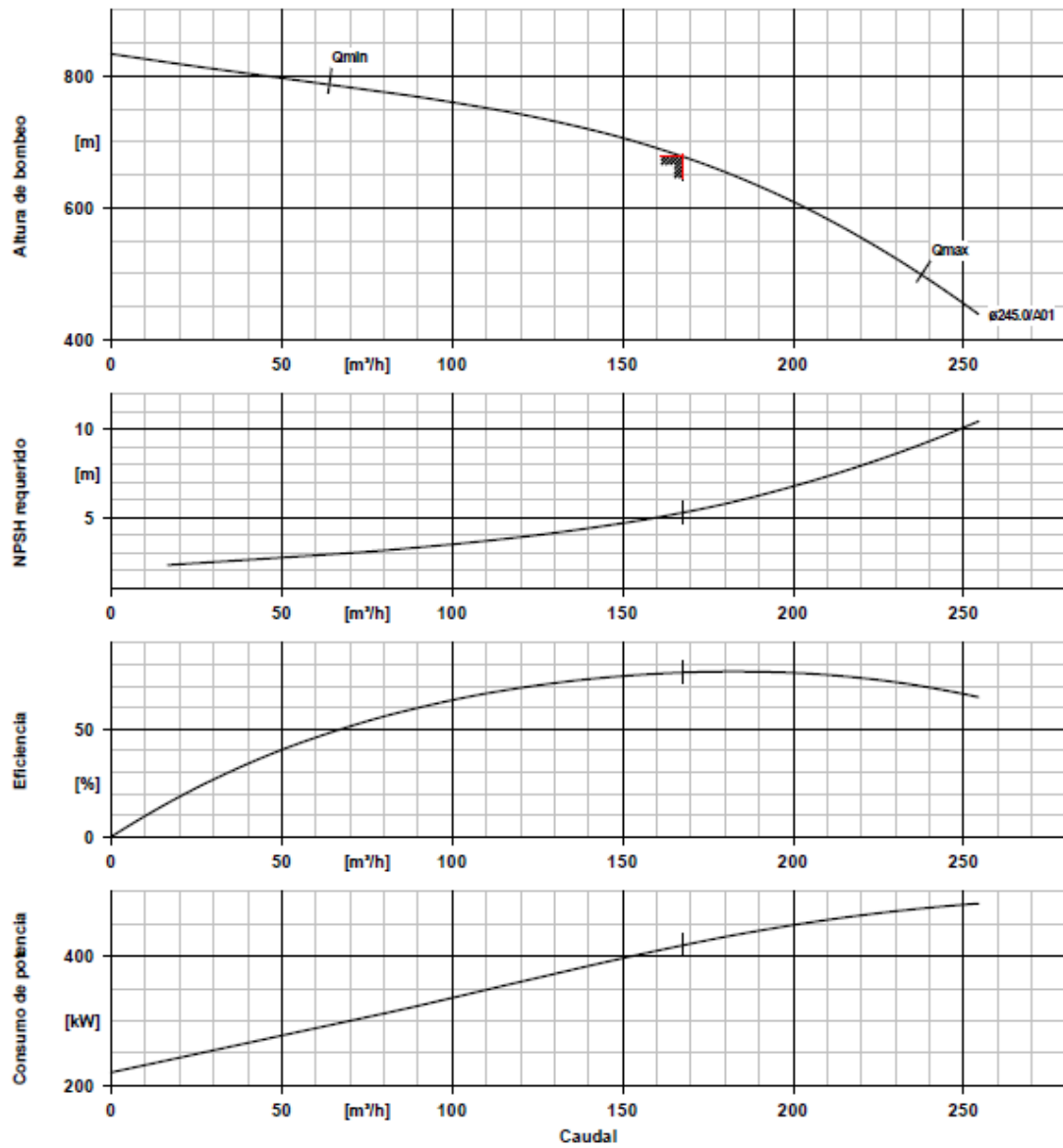


Figura 17. Curvas características para la bomba de alta presión proporcionada por KSB

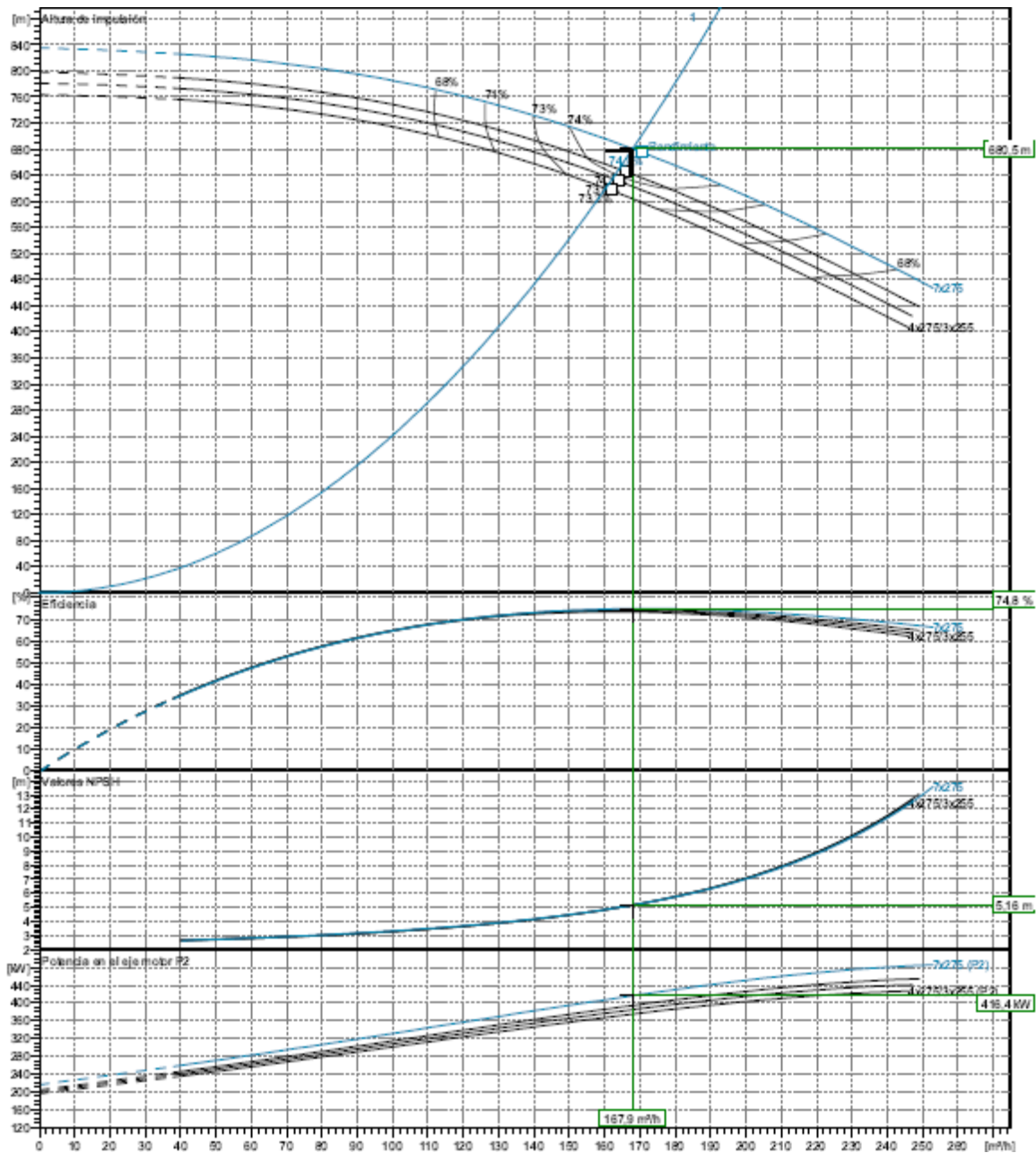


Figura 18. Curvas características para la bomba de alta presión proporcionada por Lowara

En resumen, los datos significativos obtenidos para las distintas bombas ofrecidas por los distintos fabricantes son:

| Fabricante | Modelo | Rendimiento bomba (%) |
|------------|-------------------|-----------------------|
| Flowserve | 4X10DMXD-A | 78.4 |
| KSB | Multitec RO A 100 | 76.3 |
| Lowara | MPE 125.0 | 74.76 |

Tabla 5. Rendimientos para los distintos modelos de bomba de alta presión adecuados

A la vista de los resultados obtenidos, se considera que la bomba más adecuada es la proporcionada por el fabricante Flowserve por presentar el mayor rendimiento. Además, se observa que la altura mínima de aspiración ($NPSH_r$) de la bomba seleccionada es de 3.2 m, equivalente a unos 0.32 bar, por lo que al haber supuesto una presión de entrada de 2 bar y la requerida ser menor, se deduce que no existirá cavitación en la bomba.

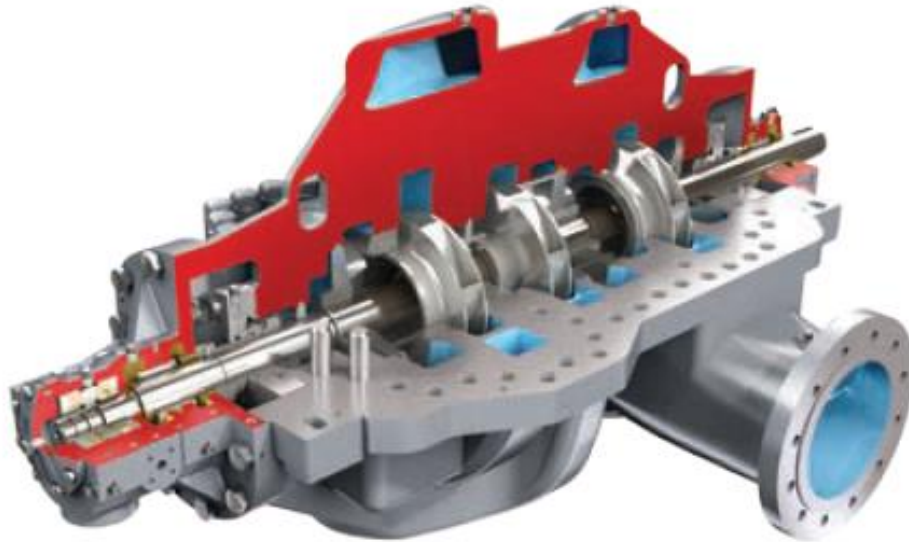


Figura 19. Bomba multietapa de cámara partida proporcionada por Flowserve, modelo 4X10DMXD-A

Finalmente, se obtiene para esta bomba una potencia nominal de 394 kW, así que teniendo en cuenta un rendimiento para el motor eléctrico de la misma de un 95% se obtiene un consumo de potencia en el punto de trabajo de 414.74 kW. Sin embargo, el fabricante indica que la potencia instalada para el motor será de 447 kW, así que esta será la que se tenga en cuenta a la hora de calcular el consumo específico de la planta.

1.1.4. Dimensionado de la bomba Booster

Para realizar el dimensionado de la bomba Booster se recurre a los fabricantes utilizados para el dimensionado de la bomba de alta presión. Del mismo modo que para dicho caso, se solicita el caudal y la altura proporcionada por la bomba, siendo estos 202.8 m³/hora y 17.94 metros, respectivamente, teniendo en cuenta la ecuación 1 y las mismas consideraciones respecto a la energía cinética y potencial, así como los valores de densidad y gravedad. En este caso, la diferencia

de presión que tiene que proporcionar la bomba Booster para alcanzar la requerida por las membranas viene dada por el propio software de diseño de las mismas como se puede ver en la Figura 11, es decir, $p_{out} - p_{in} = 1.76 \text{ bar}$, que además coincide con el diferencial de presión que se obtiene según el dimensionado del intercambiador.

En este caso, el fabricante KSB no permitió la obtención de la curva característica para la bomba adecuada y el fabricante Lowara no proporcionó ninguna bomba que se adaptara a las condiciones necesarias, así que a continuación se muestran las curvas características proporcionadas por el fabricante Flowserve para la bomba considerada más apropiada de su catálogo.

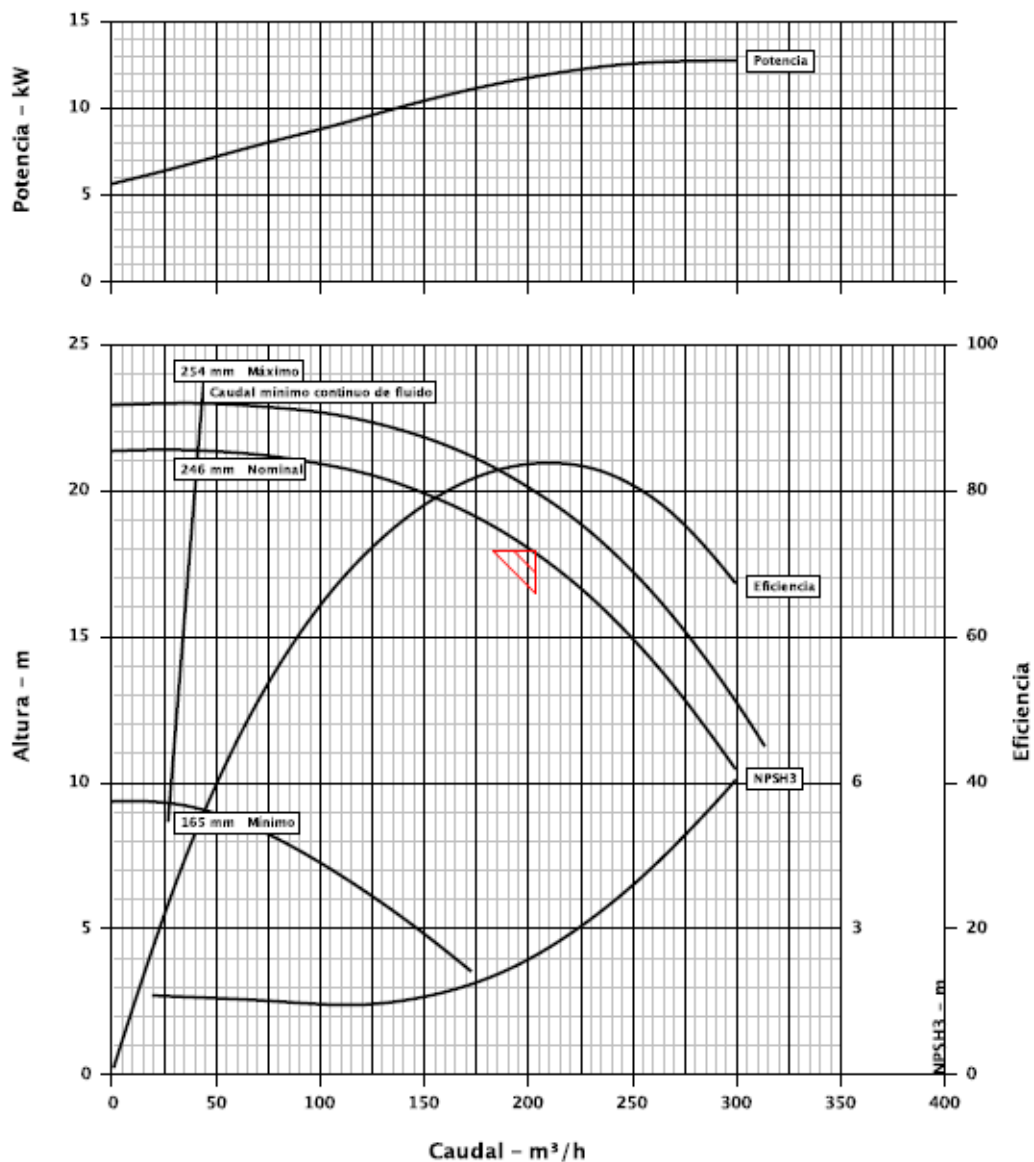


Figura 20. Curvas características para la bomba Booster proporcionada por Flowserve

En este caso, los datos significativos obtenidos son los siguientes.

| Fabricante | Modelo | Rendimiento bomba (%) |
|------------|-------------------|-----------------------|
| Flowserve | 2K6x4M-10HRV M3SM | 84 |

Tabla 6. Rendimiento para el modelo de bomba Booster seleccionado

Seleccionada dicha bomba, se obtiene para la misma una potencia en el punto de trabajo de 11.8 kW. Teniendo en cuenta un rendimiento para el motor del 95%, se obtiene un consumo de 12.42 kW. Sin embargo, el fabricante indica que la potencia instalada para el motor será de 15 kW, así que este consumo de potencia será el que se tenga en cuenta a la hora de calcular el consumo específico de la planta.

1.2. Dimensionado del sistema de captación

La captación del agua de mar de la planta desaladora va a ser realizado por dos bombas sumergidas en pozos, que suministran, cada una de ellas, la mitad del caudal de alimentación, y una tercera de repuesto, que suministra el mismo caudal que las otras dos, para que, en caso de avería de alguna de las dos bombas que trabajan principalmente, esta pueda entrar en funcionamiento y la producción de la planta no se vea afectada en exceso.

Tras el estudio de distintas posibles colocaciones de los pozos se concluye que el diseño de la disposición de los mismos será la expresada en la figura 21, y que estarán ubicados en el emplazamiento de la instalación de desalación por la cercanía de ésta respecto a la costa de la isla.



Figura 21. Ubicación aproximada de los pozos de captación.

Esta colocación permite un cálculo relativamente sencillo de las pérdidas de carga debido a las tuberías de captación por encontrarse todas a la misma distancia. Por ello, dichas pérdidas coincidirán para las tres bombas.

La distancia entre la instalación y el punto de alimentación se establece en 10 metros. En dicho punto se produce una bifurcación en tres tuberías de captación, cada una de las cuales transportará el caudal bombeado por las bombas mencionadas anteriormente. Cada una de estas tuberías medirá 20 metros con el fin de que la separación entre pozos sea suficiente.

Seguidamente, se estudia la profundidad mínima a la que se debe encontrar la bomba para asegurar que se encuentre sumergida en todo momento y evitar así que se produzca cavitación en la misma.

Para definir dicha profundidad, inicialmente se estudia la elevación máxima a la que se encuentra la parcela donde se va a instalar la planta desaladora. Según datos obtenidos mediante el Sistema de Información Geográfica sobre Google Maps "GoolZoom", se determina una elevación máxima sobre el nivel del mar de 9 metros.

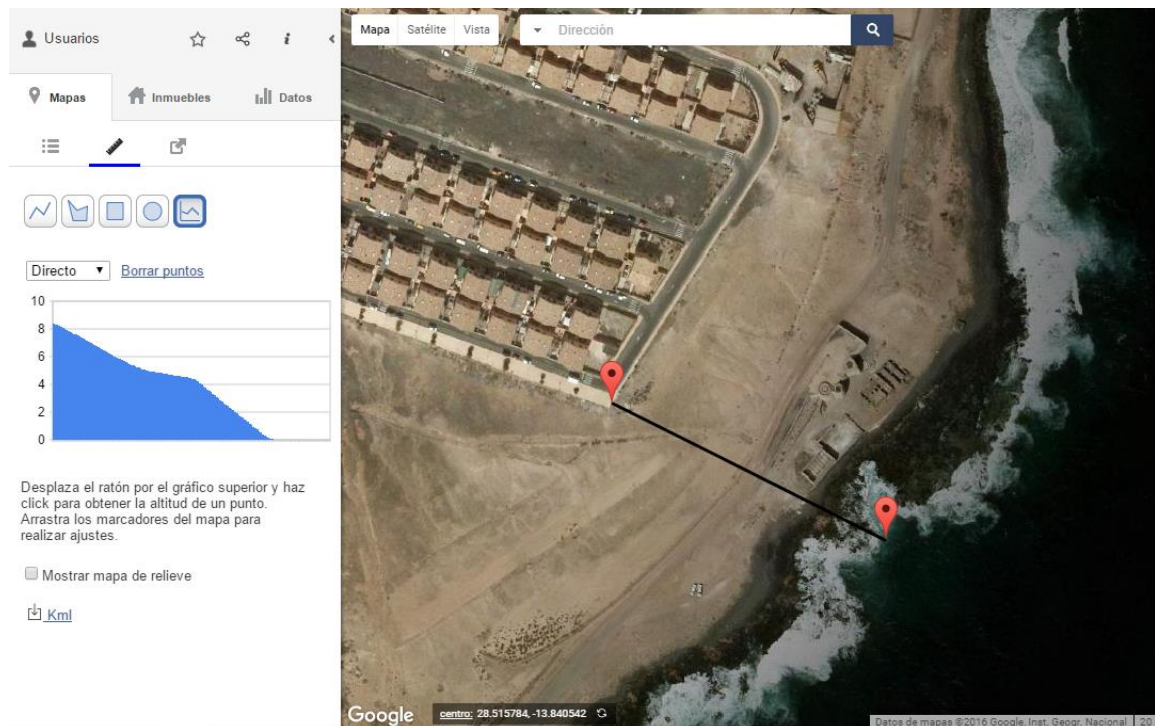


Figura 22. Elevación máxima del terreno donde se va a construir la planta desaladora

Seguidamente, se estudia cual es el valor de bajamar máxima que se da en esa zona. Dicho valor se extrae de un informe emitido por la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado, que dispone de datos registrados para Puerto del Rosario desde el año 2004 hasta el 2013.

Estadística Bajamares

| | |
|-------------|-------|
| Mínima (m): | -0.03 |
| Máxima (m): | 1.35 |
| Media (m): | 0.68 |

Figura 23. Datos del nivel del mar en Puerto del Rosario (REDMAR)

Por tanto, observando la Figura 23, se extrae un dato de bajamar máxima de 1.35 metros.

Finalmente, para añadir un margen de seguridad al cálculo de la profundidad mínima, se añaden 2 metros más para tener en cuenta posibles pérdidas por filtración así como el envejecimiento del terreno.

Teniendo en cuenta los parámetros mencionados anteriormente, se obtiene una profundidad mínima para las bombas sumergibles de 12.35 metros.

El proceso realizado anteriormente es una simple estimación teniendo en cuenta determinados factores. Para obtener una profundidad mínima del pozo más cercana a la realidad habría que realizar un estudio exhaustivo del terreno con el fin de conocer sus características de dureza y capacidad de filtración. Dado que dicho estudio no entra en el ámbito de este proyecto se han estudiado pozos existentes en otras desaladoras de las Islas Canarias, como es el caso de la desaladora de Santa Cruz de Tenerife, cuyos pozos tienen 30 metros de longitud. Teniendo en cuenta la profundidad mínima de 12.35 metros calculada anteriormente y el ejemplo de pozos de otras desaladoras del archipiélago, se opta por sumergir las bombas a 40 metros de profundidad para contar con un buen margen ante la falta de datos.

Una vez conocida la colocación de los pozos y sus medidas de separación y profundidad se calcula la longitud que tendrán las tuberías de captación, que finalmente será de 60 metros cada una.

1.2.1. Cálculo de pérdidas de carga

1.2.1.1. Cálculo de pérdidas de carga de la tubería de alimentación

Conocido el caudal a producir y el factor de conversión se calcula el caudal necesario en la alimentación según la ecuación 2.

$$Q_{alimentación} = \frac{Q_{producto}}{R} * 100\% \quad (\text{Ec. 2})$$

donde R es el factor de conversión de las membranas de ósmosis inversa.

Por tanto, se obtiene un caudal de alimentación de $370.37 \frac{m^3}{hora}$.

$$Q_{alimentación} = \frac{4000 \frac{m^3}{día}}{45\%} * 100\% = 8888.89 \frac{m^3}{día} = 370 \frac{m^3}{hora} = 0.1029 \frac{m^3}{s}$$

Una vez determinado el caudal que circula por la tubería de alimentación, se determina un diámetro mínimo para la misma aplicando el criterio de Bonnet, con el que se asegura no alcanzar una velocidad del fluido excesiva en la tubería que

conduciría a mayores pérdidas de carga, golpes de ariete más fuerte y erosiones y ruidos en las tuberías.

$$D_{\text{mínimo}} = 0.835 * Q^{2/5} \quad (\text{Ec. 3})$$

Sustituyendo en la ecuación 3 el caudal de alimentación, se obtiene un diámetro mínimo para la tubería de 0.336 metros. Conocido el diámetro mínimo orientativo, se elige uno mayor al mismo que tenga un valor comercial. En este caso se ha decidido que el material de las tuberías de la instalación sea poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) por presentar una gran resistencia a la corrosión. De los fabricantes existentes de tuberías de PRFV se ha seleccionado al fabricante FLOWTITE que ofrece los diámetros nominales de la Figura 24.

| | | | | | |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| • 100 | • 350 | • 700 | • 1200 | • 1800 | • 2600 |
| • 150 | • 400 | • 800 | • 1300 | • 1900 | • 2800 |
| • 200 | • 450 | • 900 | • 1400 | • 2000 | • 3000 |
| • 250 | • 500 | • 1000 | • 1500 | • 2200 | |
| • 300 | • 600 | • 1100 | • 1600 | • 2400 | |

Figura 24. Diámetros nominales para tuberías de PRFV del fabricante FLOWTITE

Por tanto, se selecciona un diámetro de 350 mm para la tubería de alimentación por ser el diámetro comercial inmediatamente superior al mínimo calculado.

Se determina que la velocidad que tendrá el fluido por la tubería será de 1.0695 m/s aplicando la ecuación 4.

$$Q = V * A \quad (\text{Ec. 4})$$

A continuación, se determina la viscosidad cinemática aproximada del agua utilizando los datos de las propiedades físicas del agua a 1 bar proporcionados por el libro “Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas” del autor José Agüera Soriano. Como dichos datos se establecen para 15 y 20 °C pero no para 19 °C se realiza una interpolación.

| Temperatura (°C) | Viscosidad cinemática $\nu \cdot 10^{-6}$ (m ² /s) |
|------------------|---|
| 15 | 1.14 |
| 19 | 1.0304 |
| 20 | 1.003 |

Tabla 7. Viscosidad cinemática del agua a 1 bar

Conocidos el caudal de alimentación, el diámetro de la tubería y la viscosidad cinemática se calcula el número de Reynolds según la ecuación 5.

$$Re_D = \frac{4 * Q}{\pi * \nu * D} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$4 * 0.1029 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Re_{D \text{ alimentación}} = \frac{4 * 0.1029 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * 1.0304 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} * 0.35 \text{ m}} = 363288.46$$

Por tanto, el fluido se encuentra en régimen turbulento por ser el número de Reynolds mayor que 4000. Al ser este el caso, se aplica la fórmula de Colebrook, expresada en la ecuación 6, para hallar el factor de fricción.

$$\frac{1}{\sqrt{f_{n+1}}} = -2 * \log \left(\frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re_D * \sqrt{f_n}} \right) \quad (\text{Ec. 6})$$

El fabricante FLOWTITE establece un valor para la rugosidad de la tubería de PRFV de $k=0.029$ mm, así que teniendo en cuenta el diámetro de tubería de 350 mm se determina una rugosidad relativa, k/D , de $8.28 \cdot 10^{-5}$.

Estableciendo un valor inicial para el factor de fricción de 0.015 se realizan las correspondientes iteraciones para hallar el final.

| Factor de fricción | |
|--------------------|-----------|
| f_n | f_{n+1} |
| 0.015 | 0.01485 |
| 0.01485 | 0.01486 |
| 0.01486 | 0.01486 |
| 0.01486 | 0.01486 |

Tabla 8. Iteración para la obtención del factor de fricción para la tubería de alimentación

Finalmente, se obtienen las pérdidas de carga en la conducción de alimentación mediante la aplicación de la ecuación de Darcy-Weissbach, ecuación 7.

$$H_r = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} \quad (\text{Ec. 7})$$

A continuación, se resumen los datos que se han de sustituir en la ecuación 7 para hallar las pérdidas de carga en la tubería de alimentación.

| Resumen de datos | |
|---|----------------|
| Factor de fricción, f | 0.01486 |
| Longitud, L (m) | 10 |
| Diámetro, D (m) | 0.35 |
| Velocidad, V (m/s ²) | 1.0695 |
| Aceleración de la gravedad, g (m/s ²) | 9.81 |

Tabla 9. Datos para hallar las pérdidas de carga de la conducción de alimentación

Sustituyendo los datos de la tabla 9 en la ecuación 7 se obtienen unas pérdidas de carga de 0.0248 metros.

1.2.1.2. Cálculo de pérdidas de carga en la tubería de captación

El cálculo de la pérdida de carga en las tuberías de captación se realiza para una única bomba ya que, como se mencionó anteriormente, las tres impulsarán el mismo caudal y tendrán la misma longitud de tubería.

El caudal impulsado por cada bomba será la mitad del caudal de alimentación, por lo tanto se deduce que:

$$Q_{\text{captación}} = \frac{Q_{\text{alimentación}}}{2} = \frac{0.1029 \text{ m}^3/\text{s}}{2} = 0.0514 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Siguiendo el mismo proceso que en el caso del cálculo de pérdidas de carga en la conducción de alimentación, se determina un diámetro mínimo según el criterio de Bonnet (Ec. 3) de 0.255 metros por lo que recurriendo a la Figura 24 se determina un diámetro de 300 mm para la tubería de captación de cada bomba.

Con el caudal que circula por la tubería de captación y el diámetro de la misma se determina una velocidad del fluido de 0.7272 m/s según la ecuación 4.

Se determina que el número de Reynolds para este caso, teniendo en cuenta el valor de viscosidad cinemática determinado den la tabla 7., es de 211671.23 con lo que este caso también se trata de régimen turbulento. Por tanto, se aplica la ecuación 6 para hallar el factor de fricción, comenzando con un valor inicial para el mismo de 0.015.

| Factor de fricción | |
|--------------------|----------------|
| f_n | f_{n+1} |
| 0.015 | 0.01635 |
| 0.01635 | 0.01623 |
| 0.01623 | 0.01624 |
| 0.01624 | 0.01624 |

Tabla 10. Iteración para la obtención del factor de fricción para la tubería de captación

Hallado el valor de factor de fricción para la tubería de captación se cuenta con todos los datos para calcular la pérdida de carga ocurrida en dicha tubería mediante la aplicación de la ecuación 7.

| Resumen de datos | |
|---|----------------|
| Factor de fricción, f | 0.01624 |
| Longitud, L (m) | 60 |
| Diámetro, D (m) | 0.3 |
| Velocidad, V (m/s ²) | 0.7272 |
| Aceleración de la gravedad, g (m/s ²) | 9.81 |

Tabla 11. Resumen de datos necesarios para hallar las pérdidas de carga en la conducción de alimentación

Finalmente, se obtiene para cada tubería de captación una pérdida de carga de 0.0875 metros.

1.2.1.3. Cálculo de pérdidas de carga debidas a accesorios

Se calculan unas pérdidas locales mínimas originadas por un codo de 90° colocado en cada una de las tuberías de captación. Para calcular dichas pérdidas se aplica el método del coeficiente de pérdida, en el que el coeficiente de pérdida "K" es

un número adimensional tal que multiplicado por la altura cinética da la pérdida que origina el accesorio expresada según la ecuación 8.

$$H_{ra} = K * \frac{V^2}{2 * g} \quad (\text{Ec. 8})$$

Se obtiene que el coeficiente de pérdida del codo de 90° normal es 0.9, según el libro “Mecánica de fluidos incompresible y turbomáquinas hidráulicas” del autor José Agüera Soriano.

Con la velocidad que quedó determinada en el punto 1.2.1.2 de este anexo y un valor de aceleración de la gravedad de 9.81 m/s² se obtiene una pérdida de carga de 0.0243 metros.

1.2.1.4. Cálculo de pérdidas de carga debidas a la unión de la tubería de alimentación y las de captación

El punto de unión de las tuberías de captación con la de alimentación genera una pérdida de carga que se calcula según la ecuación 8. En este caso, el valor de coeficiente de pérdida se tomará para un empalme en T normal por ser el valor que mejor se ajusta de los disponibles.

Por tanto, con K=1.8 y teniendo en cuenta la mayor velocidad del fluido de los que pasan por ese punto, es decir 1.0695 m/s², se obtiene una pérdida de carga de 0.105 metros.

1.2.2. Elección de las bombas de captación

Para realizar el dimensionado de las bombas de captación se necesita conocer, como en el caso de la bomba de alta presión y la bomba Booster, el valor de caudal y altura manométrica de la bomba.

El caudal es el calculado en apartado 1.2.1.2.

$$Q_{captación} = \frac{Q_{alimentación}}{2} = \frac{0.1029 \text{ m}^3/\text{s}}{2} = 0.0514 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 185.04 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Y para hallar la altura manométrica se recurre a la ecuación 1.

En este caso, la presión de entrada de cada bomba de captación se estimará en 1 bar con el fin de evitar la cavitación. La presión de salida es la establecida para la bomba de captación, es decir, 2 bar, pero además se añaden 2.5 bar de pérdidas estimadas en el pretratamiento físico con filtración por cartuchos, comentadas en el apartado 1.5.2 de este anexo. Así que la presión de salida requerida para las bombas de captación es 4.5 bar.

La variación de energía cinética se considera despreciable y la entrada de caudal a la bomba se toma como 0 metros. Por tanto la cota de salida del fluido la correspondiente a la suma de la profundidad del pozo, 40 metros, más el desnivel al que se encuentra la planta, 9 metros.

Además, hay que tener en cuenta las pérdidas de carga, ocasionadas por conducciones y accesorios, calculadas en apartados anteriores.

| Pérdidas de carga (m) | |
|-------------------------|---------------|
| Tubería de alimentación | 0.0248 |
| Tubería de captación | 0.0875 |
| Accesorios | 0.0243 |
| Unión de las tuberías | 0.105 |
| Total | 0.2416 |

Tabla 12. Pérdidas de carga en la captación

Finalmente, se obtiene que cada bomba de captación debe proporcionar una altura de 84.8 metros.

$$H_{captación} = \frac{(4.5 - 1) * 10^5 Pa}{1000 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2}} + 49m - 0m + 0.2416m = 84.8m$$

Teniendo la altura de la bomba y su caudal se introducen los datos en los buscadores de bombas de los fabricantes Flowserve, Lowara y KSB. En este caso solo se obtiene una bomba que se adapte a las necesidades exigidas, la fabricada por KSB.

1.3. Dimensionado del sistema de distribución

1.3.1. Cálculo de pérdidas de carga

1.3.1.1. Cálculo de pérdidas de carga debido a la tubería de distribución

Se pretende que la distribución se pueda realizar por gravedad aprovechando alguna zona, cercana a la zona a la que se va a distribuir el agua, que tenga mayor altitud que la misma.

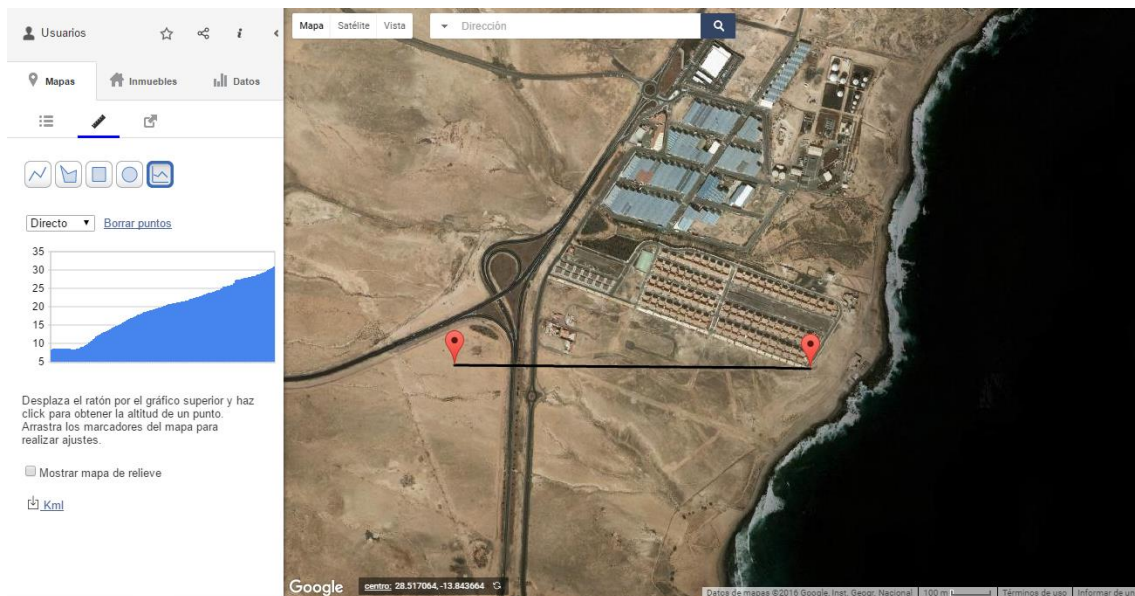


Figura 26. Diferencia de cota entre el lugar de instalación de la planta desaladora y el depósito de distribución

Como se puede ver en la figura 26, se ha determinado que el depósito de distribución va a ir colocado previsiblemente en una zona cuya cota es de 30 metros por encima del nivel del mar. La distancia lineal entre dichos puntos es de unos 900 metros, si bien de harán los cálculos con una longitud de 1000 metros con el fin de tener en cuenta posibles irregularidades del terreno.

Como quedó especificado en el apartado “Requisitos de diseño” de la Memoria, el caudal a distribuir será de 4000 m³/día.

$$Q_{\text{producto}} = 4000 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 166.67 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}} = 0.04629 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Seguidamente, y como en los casos anteriores, se halla el diámetro mínimo de la tubería de PRFV aplicando el criterio de Bonnet, según la ecuación 3,

obteniendo un diámetro de 0.244 metros, por lo que para este caso se determina un diámetro comercial de 250 mm.

Teniendo el diámetro de la tubería de distribución y el caudal que circula por la misma, es posible determinar la velocidad del fluido aplicando la ecuación 4 con la que se obtiene una velocidad de 0.943 m/s.

Se calcula el número de Reynolds teniendo en cuenta el valor de viscosidad cinemática determinado den la tabla 7.

$$Re_{D \text{ distribución}} = \frac{4 * 0.04629 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * 1.0304 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} * 0.25\text{m}} = 228753.19$$

Como se trata de un valor superior a 4000 el fluido se encuentra en régimen turbulento por lo que se aplica la ecuación de Colebrook, ecuación 6, para hallar el factor de fricción de la tubería, suponiendo un valor inicial para f de 0.015.

| Factor de fricción | |
|--------------------|----------------|
| f_n | f_{n+1} |
| 0.015 | 0.01629 |
| 0.01629 | 0.01618 |
| 0.01618 | 0.01619 |
| 0.01619 | 0.01619 |

Tabla 14. Iteración para la obtención del factor de fricción para la tubería de distribución

Hallado el factor de fricción final de la tubería, se calculan las pérdidas de carga debido a la tubería aplicando la ecuación de Darcy-Weissbach.

A continuación, se resumen los datos que se han de sustituir en la ecuación 7 para hallar las pérdidas de carga en la tubería de distribución.

| Resumen de datos | |
|---|----------------|
| Factor de fricción, f | 0.01619 |
| Longitud, L (m) | 1000 |
| Diámetro, D (m) | 0.25 |
| Velocidad, V (m/s ²) | 0.943 |
| Aceleración de la gravedad, g (m/s ²) | 9.81 |

Tabla 15. Datos para hallar las pérdidas de carga de la conducción de distribución

Con dichos datos se obtiene un valor de pérdida de carga de 2.94 metros.

1.3.1.2. Cálculo de pérdidas de carga secundarias

En este caso, al no disponer de valores concretos sobre el recorrido de la tubería ni de los accesorios de los que dispondrá, se suponen unas pérdidas de carga que suponen el 10% de las pérdidas principales.

$$H_{ra\ distribución} = 0.1 * 2.94m = 0.294\ m$$

Por tanto, las pérdidas secundarias serán de 0.294 metros.

1.3.2. Elección de la bomba de distribución

Para hallar la altura que debe proporcionar la bomba se utiliza la ecuación 1, considerando en este caso que la presión de entrada de la bomba será de 1 bar y la que tiene que alcanzar también de 1 bar por ser esta la del agua en el depósito. Por tanto, su diferencia será nula.

La variación de velocidad en este caso también se considera despreciable y en cuanto a las cotas de entrada y salida, como ya se comentó previamente, la de entrada será la cota a la que está situada la planta, es decir 9 metros, y la de salida donde se supone que irá colocado el depósito, 30 metros.

En cuanto a las pérdidas de carga debido a tuberías y accesorios, se resumen en la tabla 16.

| Pérdidas de carga (m) | |
|-------------------------|-------------|
| Tubería de distribución | 2.94 |
| Secundarias | 0.294 |
| Total | 3.23 |

Tabla 16. Pérdidas de carga en la distribución

Por tanto, la altura que tendrá que suministrar la bomba es de 24.23 metros.

$$H_{distribución} = 30m - 9m + 3.23m = 24.23m$$

Con la altura que debe suministrar la bomba y su caudal se obtienen las curvas características para los tres fabricantes de bombas utilizados hasta ahora, obteniendo bombas adecuadas únicamente con Flowserve y KSB.

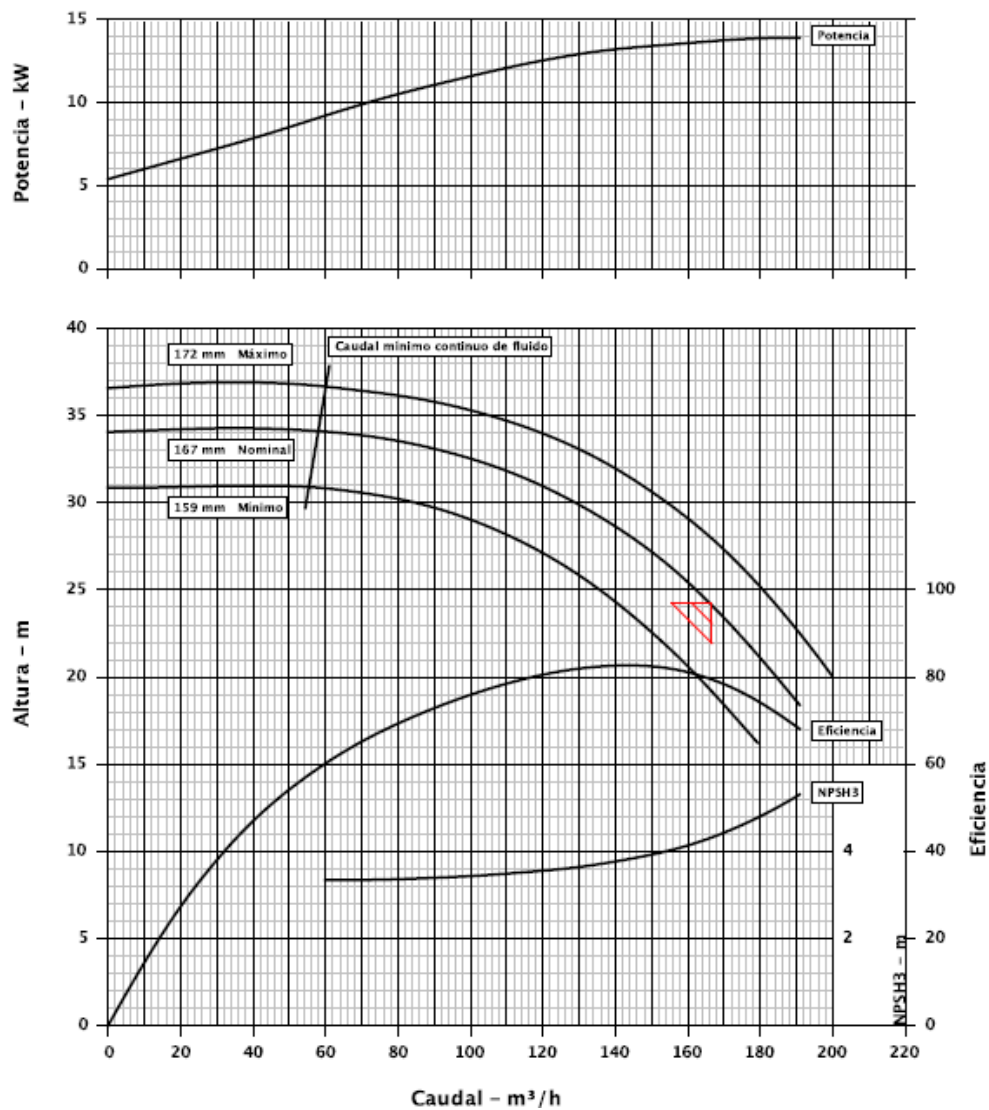


Figura 27. Curvas características para la bomba de distribución más adecuada proporcionada por Flowserve

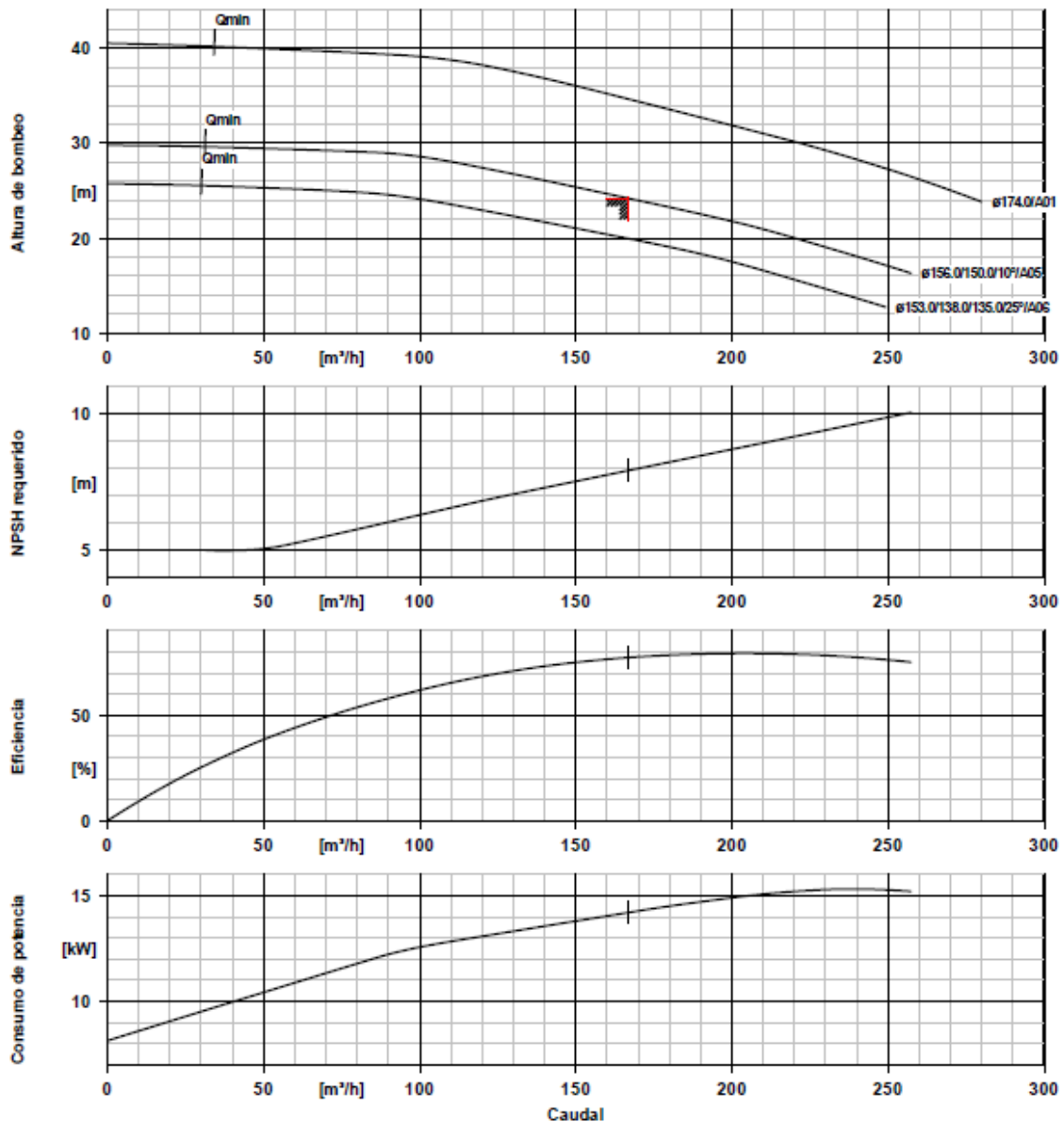


Figura 28. Curvas características para la bomba de distribución más adecuada proporcionada por KSB

Seguidamente, se recogen los datos de rendimiento para las bombas anteriores.

| Fabricante | Modelo | Rendimiento bomba (%) |
|------------|---------------|-----------------------|
| Flowserve | MBLC100-80-60 | 80.1 |
| KSB | ETN 100-80-60 | 77.3 |

Tabla 17. Rendimientos para los distintos modelos de bomba de distribución adecuados

Se observa que la que presenta mejor rendimiento es la proporcionada por Flowserve, por lo que esta será la seleccionada.

En el punto de trabajo la bomba tiene un consumo de 13.7 kW según los datos del fabricante. Añadiendo un 95% del rendimiento del motor se obtiene un consumo eléctrico de 14.42 kW. Si bien, el fabricante da un valor de potencia instalada para el motor de 16 kW.

1.4. Dimensionado del sistema de rechazo de salmuera

Se supone la instalación de un emisario submarino para realizar el rechazo de la salmuera lo suficientemente lejos de la costa como para que no afecte a la salinidad del agua de captación.

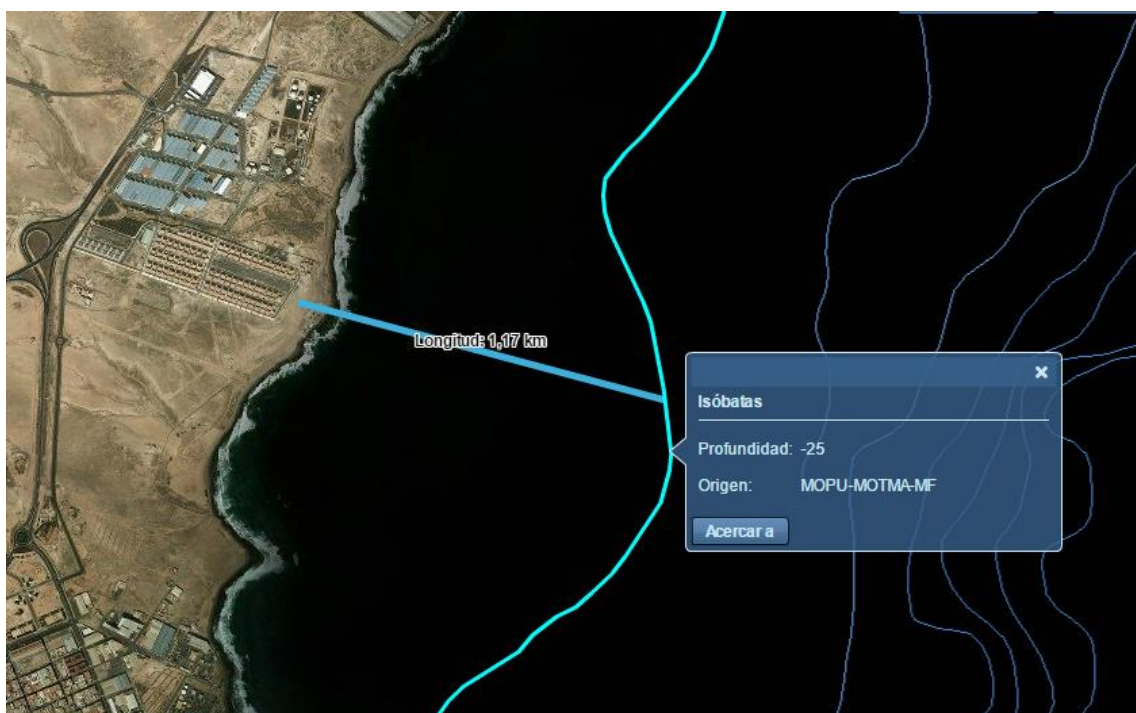


Figura 29. Isóbata más cercana a la costa de Puerto del Rosario (IEO).

Este emisario presenta una longitud lineal de 1170 metros y una profundidad máxima de 25 metros según datos obtenidos del Instituto Español de Oceanografía.

1.4.1. Cálculo de pérdidas de carga

1.4.1.1. Cálculo de pérdidas de carga debido a tuberías

Para hallar las pérdidas de carga debido a la tubería de rechazo de salmuera debe conocerse el caudal que circulará por la misma teniendo en cuenta el caudal

permeado que se quiere obtener y el factor de conversión de las membranas de ósmosis inversa.

$$Q_{rechazo} = \frac{4000 \text{ m}^3/\text{día} * (1 - 0.45)}{0.45} = 4888.89 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 203.7 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}} = 0.057 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Conocido el caudal, se halla el diámetro mínimo que debe tener la tubería de PRFV aplicando el criterio de Bonnet, según la ecuación 3, obteniendo un valor mínimo de 0.265 metros. Según la Figura 24, en la que se expresan los diámetros comerciales proporcionados por FLOWTITE, se elige el diámetro inmediatamente superior al valor calculado, es decir, 300 mm.

Hallados el valor de caudal que circula por la tubería y el diámetro de la misma es posible conocer la velocidad a la que circula el fluido, según la ecuación 4, obteniendo un valor de 0.801 m/s.

Seguidamente, se obtiene el valor del número de Reynolds para este caso aplicando la ecuación 5, teniendo en cuenta el valor de la viscosidad cinemática para el agua calculado en la Tabla 7.

$$Re_{D \text{ rechazo}} = \frac{4 * 0.0566 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * 1.0304 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} * 0.3 \text{ m}} = 233130.69$$

Como el número de Reynolds obtenido es mayor que 4000, indica que el fluido se encuentra en régimen turbulento, por lo que se aplica la ecuación de Colebrook, ecuación 6, para hallar el factor de fricción de la tubería comenzando la iteración con un valor de factor de fricción inicial de 0.015.

| Factor de fricción | |
|--------------------|----------------|
| f_n | f_{n+1} |
| 0.015 | 0.01608 |
| 0.01608 | 0.01599 |
| 0.01599 | 0.01599 |
| 0.01599 | 0.01599 |

Tabla 18. Iteración para la obtención del factor de fricción para la tubería de rechazo

Se obtiene un valor final para el factor de fricción de 0.01599.

Finalmente, es necesario determinar la longitud que tendrá la tubería de rechazo de salmuera para poder calcular las pérdidas de carga producidas en la misma.

Según datos obtenidos del Instituto Español de Oceanografía, la medida de isóbata más cercana a la costa del lugar del emplazamiento de la instalación se encuentra a 25 metros de profundidad y se encuentra a una distancia de 1.17 km. Por tanto, se considera que la tubería de rechazo tiene 1.25 km de longitud para establecer un margen ante posibles irregularidades del terreno.

Finalmente, se resumen los datos obtenidos necesarios para calcular las pérdidas de carga en conducciones en la tabla 19.

| Resumen de datos | |
|---|----------------|
| Factor de fricción, f | 0.01599 |
| Longitud, L (m) | 1250 |
| Diámetro, D (m) | 0.3 |
| Velocidad, V (m/s ²) | 0.801 |
| Aceleración de la gravedad, g (m/s ²) | 9.81 |

Tabla 19. Datos para hallar las pérdidas de carga en la conducción de rechazo

Sustituyendo dichos datos en la ecuación de pérdidas en conducciones de Darcy-Weissbach (Ec. 7) se obtiene un valor de pérdidas de carga en la conducción de rechazo de 2.18 metros.

1.4.1.2. Cálculo de pérdidas de carga secundarias

Como no se conoce exactamente el trazado que tendrá la tubería de rechazo, se estiman unas pérdidas de carga secundarias que suponen el 10% de las pérdidas principales debidas a tuberías que serán por tanto de 0.218 metros.

$$H_{ra\ rechazo} = 0.1 * 2.18m = 0.218 m$$

1.4.2. Elección de la bomba de rechazo

Para elegir la bomba de rechazo es necesario determinar la altura manométrica que debe suministrar al fluido. Para ello se aplica la ecuación 1 considerando la variación de energía cinética despreciable.

Para los valores de presión de entrada y salida se considera lo siguiente: para el valor de entrada de presión en la bomba se toma el valor de presión proporcionado por el programa de dimensionado del intercambiador que establece dicha presión a la salida del intercambiador es de 0.3 bar. Para la presión de salida se considera la profundidad de 25 metros determinada en la Figura 29 y, estimando que 1 bar equivale a 10 metros columna de agua, dicha profundidad equivaldrá a 2.5 bar de presión que debe proporcionar la bomba.

En cuanto a la cota, esta será para la entrada de la bomba de 9 metros, ya que es la cota de ubicación de la planta, y para la salida de 25 metros de profundidad con respecto al nivel del mar.

Finalmente, se tienen en cuenta las pérdidas de carga calculadas para la tubería de rechazo y los posibles accesorios, que suman 2.4 metros.

| Pérdidas de carga (m) | |
|-----------------------|------------|
| Tubería de rechazo | 2.18 |
| Secundarias | 0.218 |
| Total | 2.4 |

Tabla 20. Pérdidas de carga en la conducción de rechazo

Hallados todos los datos se calcula la altura que debe proporcionar la bomba de rechazo a la salmuera, aplicando la ecuación 1.

$$H_{rechazo} = \frac{(2.5 - 0.3) * 10^5 Pa}{1000 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2}} + (-25m) - 9m + 2.4m = -9.17m$$

Que el resultado sea negativo implica que no es necesaria ninguna bomba de rechazo ya que la diferencia de cota es suficiente para que la salmuera llegue al mar.

1.5. Dimensionado del pretratamiento

Para conseguir una operación de desalación con resultado satisfactorio, es necesario acondicionar el agua bruta de mar mediante un pretratamiento físico y químico, que garantice la total eliminación de problemas al funcionamiento de las membranas de ósmosis inversa.

El dimensionado del pretratamiento se hará de forma genérica, mencionando los elementos que se deben tener en cuenta pero no las cantidades, ya que no entra dentro del ámbito del proyecto.

1.5.1. Pretratamiento químico

El tratamiento químico se realiza para evitar ataques a la membrana o precipitados de sales sobre la misma.

En la figura 12, proporcionada por el software de membranas, destacan algunos valores que deben tenerse en cuenta a la hora de realizar el pretratamiento químico.

En cuanto al índice de saturación de Langelier (ISL) se aprecia que éste se encuentra resaltado en amarillo por el propio software de membranas. Este índice permite determinar la capacidad de corrosión del agua teniendo en cuenta que para un valor negativo de dicho índice el agua será corrosiva y para uno positivo será incrustante. En este caso, el valor es positivo por lo que será necesario añadir una sustancia antiincrustante a la fase química del pretratamiento.

Asimismo, también destacan los valores de saturación de Sulfato de Bario y Fluoruro cálcico que indica la precipitación de dichas sales minerales. Estas sales son poco solubles y requieren especial atención, así que es recomendable utilizar una dispersante para evitar su precipitación.

Además, se debe añadir ácido sulfúrico con el fin de disminuir la velocidad de hidrólisis de las membranas.

1.5.2. Pretratamiento físico

El tratamiento físico está destinado a eliminar fundamentalmente los elementos sólidos, algas y materia orgánica.

Los componentes físicos en suspensión comprenden desde arenas hasta partículas coloidales y deben ser eliminados de los circuitos hidráulicos de la instalación, o al menos controlarse dentro de unos límites.

Para mejorar estos aspectos físicos del agua, se recurre fundamentalmente a distintos procesos de filtración que cubren la fase de separación de sólidos contenidos en líquidos.

La primera etapa de filtración se realiza con filtros de arena que eliminan las mayores partículas sólidas, tiene un nivel de filtración grosera.

Seguidamente, resulta imprescindible en las instalaciones de ósmosis inversa la filtración sobre cartuchos, ya que con ellos se consigue la eliminación de partículas de pocas micras.

Las partículas retenidas por los cartuchos incrementan las pérdidas de carga del mismo, por lo que cuando se alcanza un valor determinado se procede a su sustitución.

En este sentido se han observado distintos catálogos de filtros de cartuchos de la empresa 3M, y en ellos se recomienda que se realice el cambio de cartucho cuando la presión diferencial en ellos alcance los 2.5 bar, por lo que esta será la pérdida de carga a tener en cuenta en el pretratamiento físico.

1.6. Dimensionado del postratamiento

El agua desalada en la instalación tiene un pH bajo, de 5.3, lo que incumple la normativa relativa a aguas de consumo humano, que establece que el pH debe encontrarse entre unos valores de 6.5 y 9.5.

El ajuste del pH se puede realizar añadiendo productos químicos. Sin embargo, una mejor opción resulta la mezcla con otras aguas, en la que el agua desalada suponga al menos un 10% de la mezcla.

1.7. Consumo específico de la planta

Finalmente, según los cálculos realizados para cada una de las bombas de la instalación, se obtiene un consumo de potencia total de 598 kW, lo que se traduce en un consumo de energía anual de 4714632 kWh en un año, teniendo en cuenta una disponibilidad de la instalación del 90%.

$$\text{Consumo} = 598 \text{ kW} * 365 \text{ días} * \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} * 0.9 = 4714632 \text{ kWh}$$

| Tipo de bomba | Número de bombas | Potencia eléctrica instalada (kW) |
|---------------------------------|------------------|-----------------------------------|
| Captación | 2 | 60 |
| Alta presión | 1 | 447 |
| Booster | 1 | 15 |
| Distribución | 1 | 16 |
| Potencia total consumida | | 598 |

Tabla 21. Consumo de potencia de la instalación.

Asimismo, se halla el consumo específico de la planta.

| Elemento | Consumo específico (kWh/m ³) |
|----------------------|--|
| Captación | 0.72 |
| Núcleo de desalación | 2.77 |
| Distribución | 0.096 |
| Total | 3.59 |

Tabla 22. Consumo específico de las bombas de la planta

Se observa, como era de esperar, que el mayor consumo específico se produce en el núcleo de la desalación. A este consumo se le aplica un 90% de disponibilidad de la instalación para tener un consumo que se ajuste mejor a la realidad, siendo este finalmente de 3.23 kWh/m³.

ANEXO II

DIMENSIONADO DEL SISTEMA EÓLICO

2. Dimensionado del sistema eólico

2.1. Determinación del recurso eólico

Para la estimación de la producción de un aerogenerador, es importante que la altura de medición del viento coincida con la altura de montaje del aerogenerador.

Como herramientas matemáticas auxiliares es preciso obtener previamente la curva de potencia del aerogenerador y la distribución del viento.

Inicialmente, se recurre al atlas eólico de España, proporcionado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, para conocer los datos del recurso eólico en el emplazamiento de la instalación desaladora a 80 metros de altura, ya que a mayor altura el viento es más homogéneo y de mayor intensidad.

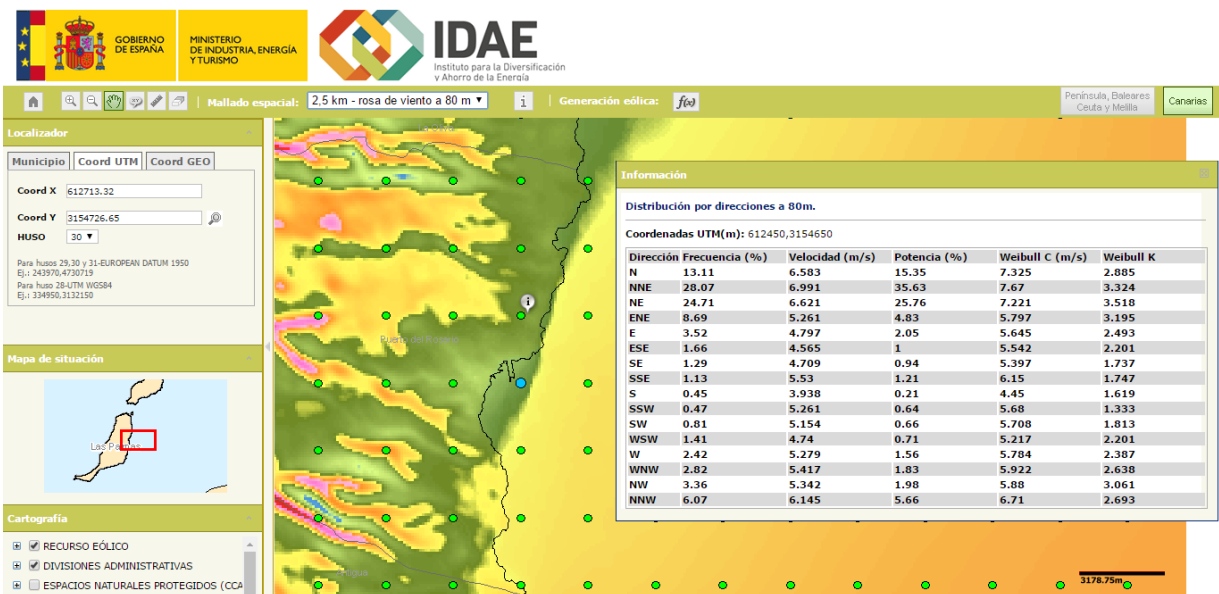


Figura 30. Recurso eólico para las coordenadas de la desaladora (IDAE)

Con los datos obtenidos del IDAE se realiza una tabla en Excel para visualizar los datos con mayor claridad y manejarlos más fácilmente para la realización de los cálculos.

| Dirección | Frecuencia (%) | Velocidad (m/s) | Potencia (%) | Weibull C (m/s) | Weibull K |
|-----------|----------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------|
| N | 13,11 | 6,583 | 15,35 | 7,325 | 2,885 |
| NNE | 28,07 | 6,991 | 35,63 | 7,67 | 3,324 |
| NE | 24,71 | 6,621 | 25,76 | 7,221 | 3,518 |
| ENE | 8,69 | 5,261 | 4,83 | 5,797 | 3,195 |
| E | 3,52 | 4,797 | 2,05 | 5,645 | 2,493 |
| ESE | 1,66 | 4,565 | 1 | 5,542 | 2,201 |
| SE | 1,29 | 4,709 | 0,94 | 5,397 | 1,737 |
| SSE | 1,13 | 5,53 | 1,21 | 6,15 | 1,747 |
| S | 0,45 | 3,938 | 0,21 | 4,45 | 1,619 |
| SSW | 0,47 | 5,261 | 0,64 | 5,68 | 1,333 |
| SW | 0,81 | 5,154 | 0,66 | 5,708 | 1,813 |
| WSW | 1,41 | 4,74 | 0,71 | 5,217 | 2,201 |
| W | 2,42 | 5,279 | 1,56 | 5,784 | 2,387 |
| WNW | 2,82 | 5,417 | 1,83 | 5,922 | 2,638 |
| NW | 3,36 | 5,342 | 1,98 | 5,88 | 3,061 |
| NNW | 6,07 | 6,145 | 5,66 | 6,71 | 2,693 |

Tabla 23. Resumen de datos del recurso eólico proporcionado por IDAE

Conocidos los datos de dirección del viento y la frecuencia con la que ocurre en cada dirección, se obtiene la dirección principal que suele tener el viento en el emplazamiento de la planta, mediante un diagrama de coordenadas polares que representa la frecuencia con que sopla el viento en cada dirección, denominado Rosa de los vientos.

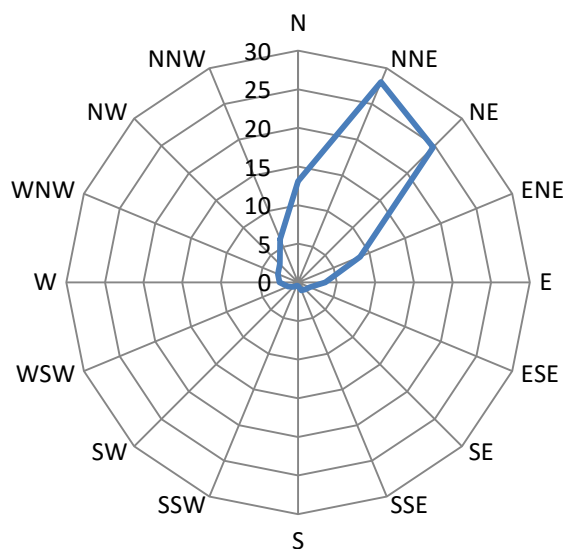


Figura 31. Rosa de los vientos de frecuencias

Asimismo, se obtiene una Rosa de los vientos de velocidades, en la que se refleja la velocidad que predomina en cada dirección.

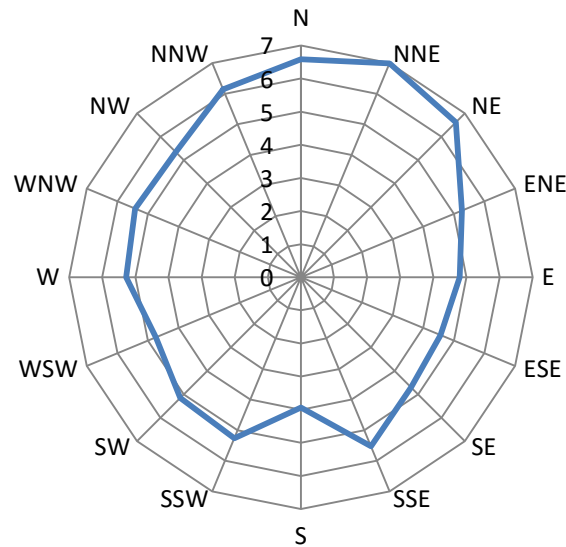


Figura 32. Rosa de los vientos de velocidades

Conocida la dirección predominante del viento, que indica en qué sentido colocar el aerogenerador, se calcula la distribución de probabilidad de velocidades del viento.

La distribución de probabilidades proporciona la probabilidad de que la velocidad del viento esté comprendida en un determinado intervalo de velocidades. La distribución más usada es la denominada distribución de Weibull.

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

Donde:

$f(v)$ = probabilidad de velocidad de viento en el intervalo v

k = factor de forma de Weibull

c = factor de escala de Weibull

v = velocidad del viento

El valor de k refleja la amplitud de la distribución; mientras más amplia sea la distribución, menor será el valor de k .

En este sentido, se utiliza la función proporcionada por Excel para calcular dicha distribución. Inicialmente se toma un valor medio para el factor de escala y de forma de Weibull, extraído de los datos de la tabla 1.

| | |
|---------------------------------|------|
| Factor de forma de Weibull (K) | 2,76 |
| Factor de escala de Weibull (C) | 6,2 |

Tabla 24. Factores necesarios para calcular la distribución de Weibull

Por otro lado, se establecen intervalos de velocidades de 1 m/s para el cálculo de la distribución. Asimismo, una vez obtenida la frecuencia de cada velocidad del viento, se obtiene el número de horas al año que se dispondrá de dicha velocidad del viento multiplicando la frecuencia por el número de horas existentes en un año.

| Velocidad (m/s) | Frecuencia (%) | Horas/año |
|-----------------|----------------|-----------|
| 0 | 0,00% | 0,00 |
| 1 | 3,07% | 269,08 |
| 2 | 7,82% | 685,41 |
| 3 | 12,44% | 1090,09 |
| 4 | 15,57% | 1364,30 |
| 5 | 16,40% | 1436,30 |
| 6 | 14,90% | 1305,15 |
| 7 | 11,81% | 1034,79 |
| 8 | 8,21% | 718,86 |
| 9 | 5,00% | 437,95 |
| 10 | 2,67% | 233,78 |
| 11 | 1,25% | 109,13 |
| 12 | 0,51% | 44,44 |
| 13 | 0,18% | 15,74 |
| 14 | 0,06% | 4,83 |
| 15 | 0,01% | 1,28 |
| 16 | 0,00% | 0,29 |
| 17 | 0,00% | 0,06 |
| 18 | 0,00% | 0,01 |
| 19 | 0,00% | 0,00 |
| 20 | 0,00% | 0,00 |

Tabla 25. Tabla de frecuencias de velocidades según la distribución de Weibull y horas al año que ocurre cada velocidad

Una vez obtenidos los datos necesarios, se representan gráficamente para obtener la distribución de Weibull de velocidades en la que se observa que los vientos que se dan con mayor frecuencia se encuentran entre 3 y 8 m/s de velocidad.

Distribución de Weibull

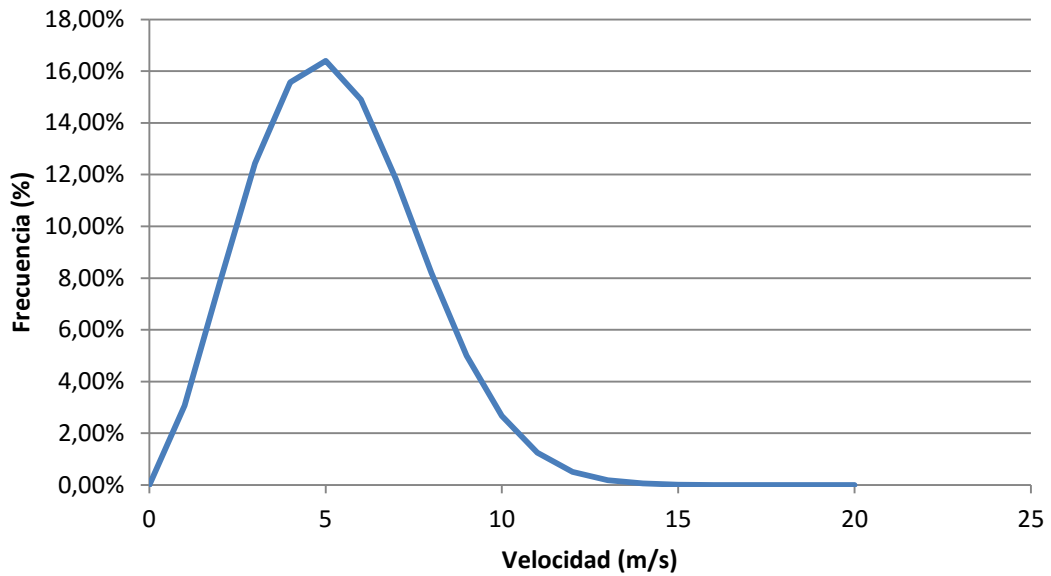


Figura 33. Distribución de Weibull a partir de los datos proporcionados por la IDAE

Por otro lado, la curva de potencia presenta la potencia que genera el sistema en función de la velocidad del viento incidente perpendicular al área del rotor y es suministrada por el fabricante.

2.2. Selección del aerogenerador

Según el cálculo realizado en el Anexo I, se obtiene un consumo de la planta desaladora de 598 kW. Este valor se traduce en un consumo de energía de 4714632 kWh consumidos en el periodo de un año, teniendo en cuenta una disponibilidad de la instalación del 90%.

$$\text{Consumo} = 598 \text{ kW} * 365 \text{ días} * \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} * 0.9 = 4714632 \text{ kWh}$$

Teniendo en cuenta dicho valor se recurre a la herramienta de cálculo proporcionada por el Instituto Tecnológico de Canarias para hallar la energía anual estimada producida por el aerogenerador, calculada a partir de los factores de escala y forma de la distribución de Weibull a la altura de 80 metros, y de la curva de potencia del aerogenerador seleccionado.

Concretamente, la energía total proporcionada por el aerogenerador se obtiene al realizar el sumatorio de las multiplicaciones de las horas al año que ocurre cada velocidad, según el cálculo realizado mediante la distribución de Weibull, por la potencia suministrada por el aerogenerador para cada una de dichas velocidades, obtenida a partir de la curva de potencia del aerogenerador.

En la ecuación 9 se detalla la operación que hay que realizar para hallar la energía que produce el aerogenerador para una determinada velocidad.

$$E(kWh) = n^{\circ} \text{ de horas al año (horas)} * \text{Potencia (kW)} \quad (\text{Ec. 9})$$

De los tipos de aerogeneradores proporcionados por el ITC se seleccionan aquellos con los que se obtiene una energía anual mayor a la calculada para el consumo de la planta, con el fin de asegurar el abastecimiento completo de la misma.

Se muestra el resumen de los datos proporcionados para los aerogeneradores adecuados de los fabricantes considerados por el ITC en la Tabla 26.

| Modelo de aerogenerador | Energía anual estimada (kWh) |
|-------------------------|------------------------------|
| GE ENERGY GE 2,5 XL | 5475111,7 |
| MADE AE-90/2 MW | 5016912,5 |
| NORDEX N90/2500 LS | 5049035,7 |
| REPOWER MM-92 | 4986328,7 |
| SIEMENS SWT-2,3-93 | 5072608,5 |
| VESTAS V90/1800 | 4833900,4 |

Tabla 26. Modelos de aerogeneradores que se ajustan a la producción anual necesaria

Como se puede observar en la tabla 26, el aerogenerador proporcionado por el fabricante VESTAS es el que mejor se ajusta al consumo de la planta con 4833900.4 kWh de producción.

Por otro lado, también es necesario determinar el Factor de carga del aerogenerador. Este factor resulta de la producción anual de energía dividida por la potencia nominal, si la máquina estuviera funcionando a dicha potencia durante las 8760 horas del año. La expresión que lo define viene expresada por la ecuación 3.1.

$$FC(\%) = \frac{\text{Producción anual (kWh)}}{\text{Potencia nominal (kW)}} * \frac{100\% * 1 \text{ día}}{365 \text{ días} * 24 \text{ horas}} \quad (\text{Ec. 10})$$

Se establece el criterio reflejado en la tabla 27 para calificar el funcionamiento del aerogenerador según el factor de carga.

| Factor de carga | Calificación |
|-----------------|----------------|
| Menos del 20% | Inaceptable |
| 20%-25% | Aceptable |
| 25%-30% | Bueno |
| 30%-40% | Muy bueno |
| 40%-50% | Excelente |
| Mayor del 50% | Extraordinario |

Tabla 27. Calificación del funcionamiento de un aerogenerador según el factor de carga (Villarrubia López)

Por tanto, teniendo en cuenta la ecuación 10, se halla el factor de carga para cada modelo de aerogenerador.

| Modelo | Energía anual estimada (kWh) | Potencia nominal (kW) | Factor de carga (%) | Calificación |
|---------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------|
| GE ENERGY GE 2,5 XL | 5475111,7 | 2500 | 25,00 | Bueno |
| MADE AE-90/2 MW | 5016912,5 | 2000 | 28,64 | Bueno |
| NORDEX N90/2500 LS | 5049035,7 | 2500 | 23,05 | Aceptable |
| REPOWER MM-92 | 4986328,7 | 2000 | 28,46 | Bueno |
| SIEMENS SWT-2,3-93 | 5072608,5 | 2000 | 28,95 | Bueno |
| VESTAS V90/1800 | 4833900,4 | 1800 | 30,66 | Muy bueno |

Tabla 28. Factor de carga determinado para cada modelo de aerogenerador

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de las tablas 27 y 28, se observa que el aerogenerador que se ajusta mejor a la producción de energía necesaria para la planta y que presenta un mejor factor de carga es el proporcionado por el fabricante VESTAS.

En la figura 34 se muestra la curva de potencia del aerogenerador seleccionado.

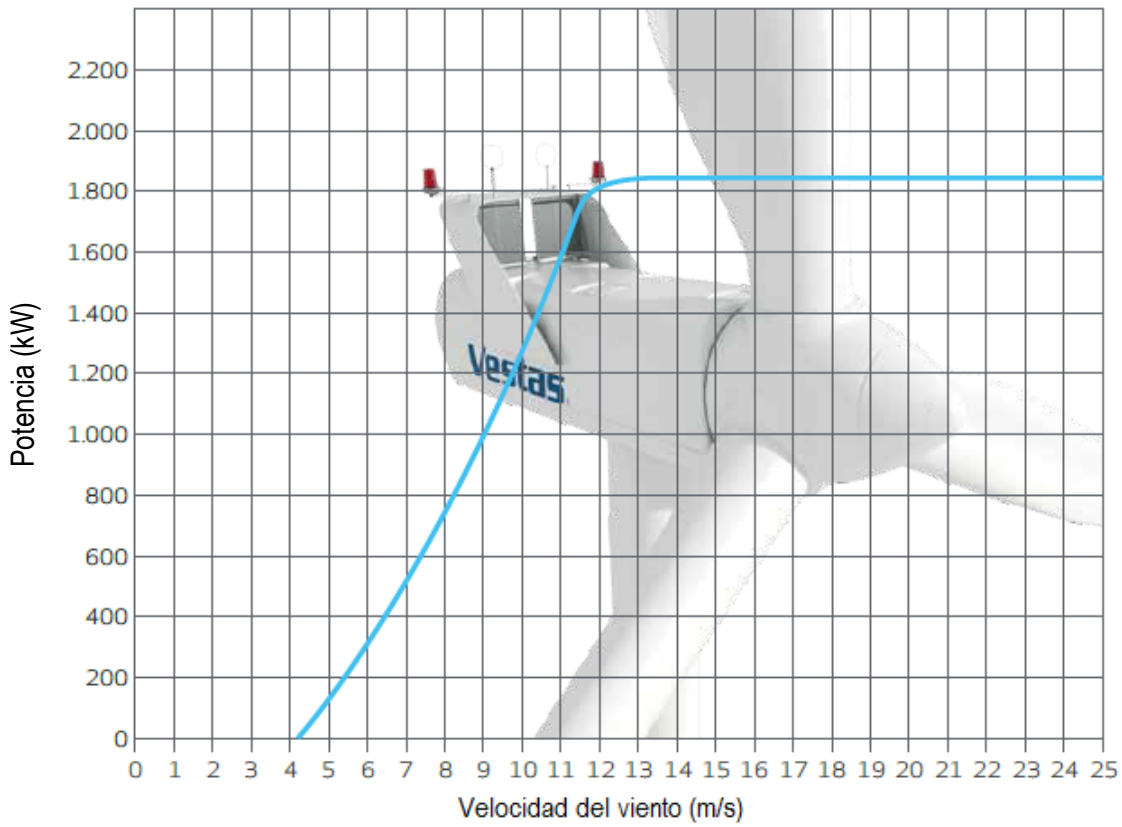


Figura 34. Curva de potencia para el aerogenerador seleccionado