



ULL

Universidad
de La Laguna

Escuela Superior de
Ingeniería y Tecnología

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

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

Autor: Leona Grimm

Tutor: Vicente José Romero Ternero

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ÍNDICE GENERAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

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

Autor: Leona Grimm

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Memoria

Objeto.....	10
Abstract	10
Alcance	10
Antecedentes	11
Recursos hídricos en Canarias.....	11
Desalación del agua de mar	13
Desalación por ósmosis inversa	13
Desalación de agua en Canarias.....	16
Energías renovables	20
Energía eólica	20
El viento.....	20
Normas y referencias	21
Disposiciones legales y normas aplicadas	21
Bibliografía	22
Programas de cálculo	24
Definiciones y abreviaturas.....	25
Definiciones.....	25
Abreviaturas	25
Requisitos de diseño	26
Emplazamiento.....	26
Capacidad de la planta	28
Temperatura y composición del agua.....	28
Agua producida	29
Análisis de soluciones.....	29
Captación del agua	29
Toma abierta	29
Laguna artificial	30
Toma mediante torre	30
Toma mediante pozo	31
Pretratamiento.....	31
Pretratamiento físico.....	32
Pretratamiento químico	32

Selección de las membranas	32
Selección del sistema de recuperación de energía	33
Turbocharger	33
Intercambiador de presión.....	34
Selección de las bombas	35
Bomba de captación.....	35
Bomba de alta presión	35
Bomba booster	35
Bomba de distribución	36
Post tratamiento	36
Rechazo salmuera	36
Selección del aerogenerador.....	36
Uso de la electricidad sobrante.....	39
Producción de hidrógeno	39
Conectar la planta a la red eléctrica.....	39
Dar electricidad a otras empresas.....	40
Emplear la electricidad para elevar agua	40
Perder la electricidad	40
Resultados	40
Sistema de ósmosis inversa.....	40
Ubicación y finalidad de la planta	40
Sistema de captación	40
Pretratamiento.....	41
Núcleo de la desalación.....	41
Postratamiento.....	41
Distribución del agua.....	41
Rechazo de salmuera	42
Aerogenerador	42
Conclusiones	42

Anexos

DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA	9
Cálculos relativos a la elección de membranas.....	11
Software	11
Datos a introducir.....	11
Composición del agua de mar y pH.....	11
Temperatura.....	12
Introducción de los datos.....	12
Elección y dimensionado del intercambiador de presión	19
Elección y dimensionado de las tuberías	20
Elección del diámetro.....	21
Elección de la longitud	22
Cálculo de las pérdidas de carga	25
En las tuberías	25
Desde el pozo hasta la bomba de alta presión	27
Desde la planta desaladora hasta el mar	29
En los accesorios	29
Desde el pozo hasta la bomba de alta presión	30
Desde la planta desaladora hasta el depósito de agua.....	30
Desde la planta desaladora hasta el mar	30
Todas las pérdidas.....	30
Elección de bombas.....	31
Bomba de captación.....	31
Bomba de alta presión	35
Bomba booster	38
Bomba de distribución	42
Bomba rechazo.....	46
Bombas seleccionadas	46
Pretratamiento.....	46
Pretratamiento físico.....	47
Pretratamiento químico	47
Postratamiento	47
Distribución de los componentes.....	48
Consumo energético de la planta desaladora.....	48

DIMENSIONADO DEL AEROGENERADOR	50
Elección del aerogenerador	52
Orientación del aerogenerador.....	52
Elección del aerogenerador	54
Balance energético.....	58
USO DE LA ENERGÍA PRODUCIDA SOBRANTE	60
Producción de hidrógeno	62
Electrolizador	62
Pila de combustión.....	63

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

MEMORIA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

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

Autor: Leona Grimm

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Hoja de identificación

Título del proyecto

Estudio de un sistema de desalación y de producción de hidrógeno alimentado mediante energías renovables

Promotor

Razón social: Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna

Dirección:

Camino San Francisco de Paula, s/n.

Campus de Anchieta.

San Cristóbal de La Laguna. S/C de Tenerife.

Teléfono: +34 922 84 50 31

Fax: +34 922 84 54 07

e-mail: esit@ull.edu.es

Proyectista

Autor: Leona Grimm

DNI: X-8709779-R

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Fecha:

Marzo de 2017

Índice

Objeto.....	10
Abstract	10
Alcance	10
Antecedentes	11
Recursos hídricos en Canarias.....	11
Desalación del agua de mar	13
Desalación por ósmosis inversa	13
Desalación de agua en Canarias.....	16
Energías renovables	20
Energía eólica	20
El viento.....	20
Normas y referencias	21
Disposiciones legales y normas aplicadas	21
Bibliografía	22
Programas de cálculo	24
Definiciones y abreviaturas.....	25
Definiciones.....	25
Abreviaturas	25
Requisitos de diseño	26
Emplazamiento.....	26
Capacidad de la planta	28
Temperatura y composición del agua.....	28
Agua producida	29
Análisis de soluciones.....	29
Captación del agua	29
Toma abierta	29
Laguna artificial	30
Toma mediante torre	30
Toma mediante pozo	31
Pretratamiento.....	31
Pretratamiento físico.....	32
Pretratamiento químico	32

Selección de las membranas	32
Selección del sistema de recuperación de energía	33
Turbocharger	33
Intercambiador de presión.....	34
Selección de las bombas	35
Bomba de captación.....	35
Bomba de alta presión	35
Bomba booster	35
Bomba de distribución	36
Post tratamiento	36
Rechazo salmuera	36
Selección del aerogenerador.....	36
Uso de la electricidad sobrante.....	39
Producción de hidrógeno	39
Conectar la planta a la red eléctrica.....	39
Dar electricidad a otras empresas.....	40
Emplear la electricidad para elevar agua	40
Perder la electricidad	40
Resultados	40
Sistema de ósmosis inversa.....	40
Ubicación y finalidad de la planta	40
Sistema de captación	40
Pretratamiento.....	41
Núcleo de la desalación.....	41
Postratamiento.....	41
Distribución del agua.....	41
Rechazo de salmuera	42
Aerogenerador	42
Conclusiones	42

Índice de figuras

Figura 1. Uso de agua en Canarias.	12
Figura 2. Evolución histórica de la oferta de agua en Canarias.	13
Figura 3. Principio de la Ósmosis Inversa. Fuente: KSB.....	14
Figura 4. Recipiente de presión con tres membranas de OI. Fuente: Manual de utilización del software “ROSA” para simulación de unidades de ósmosis inversa de Álvaro Muelas Expósito15	
Figura 5. Las primeras plantas desaladoras en Canarias. Fuente: Carmelo Santana Delgado, Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria	16
Figura 6. Las primeras plantas desaladoras que emplean membranas en Canarias. Fuente: Carmelo Santana Delgado, Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria.....	17
Figura 7. Disponibilidad de recursos hídricos en Canarias. Fuente: Carmelo Santana Delgado, Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria	18
Figura 8. Porcentaje de la demanda energética que presenta la desalación. Fuente: Carmelo Santana Delgado, Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria	19
Figura 9. Evolución del consumo energético para la desalación de agua.....	19
Figura 10. Tipos de energía requerida para diferentes formas de desalar. Fuente: Baltasar Peñate Suárez, Jefe Departamento de Agua ITC.....	20
Figura 11. Mapa eólico de las islas Canarias. Fuente: IDEA	21
Figura 12. Ubicación de la planta desaladora.	27
Figura 13. Medición de la distancia entre la EDAM y el núcleo habitado más cercano.	27
Figura 14. Mapa de viento del plan hidrológico de la demarcación hidrográfica de Gran Canaria. Fuente Gobierno de Canarias	28
Figura 15. Laguna artificial.	30
Figura 16. Toma mediante torre.	31
Figura 17. Listado de membranas que ofrece DOW para la desalación de agua de mar. Fuente: DOW	33
Figura 18. Intercambio de presión en un turbocharger. Fuente: Energy Recovery.....	34
Figura 19. Transferencia de presión mediante un intercambiador de presión. Fuente: Energy Recovery.....	34

Índice de tablas

Tabla 1. Las desaladoras en Canarias y su producción.....	26
Tabla 2. Evolución de la población en el municipio de Santa Lucía.	26
Tabla 3. Temperaturas mensuales y anual del agua de mar en Las Palmas de Gran Canaria.	28
Tabla 4. Composición del agua de mar en las Islas Canarias.	29
Tabla 5. Contenido máximo admitido de sustancias en agua potable.	29
Tabla 6. Posibles bombas de captación.	35
Tabla 7. Posibles bombas de alta presión.	35
Tabla 8. Posibles bombas booster.....	36
Tabla 9. Posibles bombas de distribución.	36
Tabla 10. Energía anual estimada producida por aerogeneradores ubicados en el lugar en que se colocará la EDAM.....	38

Objeto

Uno de los principales objetivos de este proyecto es reflejar los conocimientos adquiridos en las diferentes asignaturas cursadas durante los cuatro años del Grado de Ingeniería Mecánica sobre el manejo de normativas, la realización de cálculos, la toma de decisiones, etc.

El otro objetivo de este proyecto es el estudio de una planta de desalinización de agua de mar que es alimentada mediante energía eólica. El estudio se centra en el núcleo de la desalación y el dimensionado de sus componentes principales, además del dimensionado del aerogenerador que proporciona la potencia requerida por la planta desaladora. El agua producida por la planta tiene calidad de agua potable para abastecer parcialmente el consumo de una población cercana a la desaladora. Además se estudia la posibilidad de producir hidrógeno y se dan otras alternativas de usos que se pueden dar al exceso de energía producida por el aerogenerador.

Abstract

One of the principal purposes of this project is to reflect the knowledge acquired in the different subjects studied during the four years of the mechanical engineering degree about the use of regulations, the realization of calculations, taking decisions, etc.

The other purpose of this project is realizing a study about a sea water desalination plant which runs with wind energy. This study is focused on the desalinations nucleus and the dimensioning of its principal components as well as the dimensioning of the windmill. The water produced by this plant has tap water quality. Also the production of hydrogen is studied and there are given other alternatives for the usage of the excess of energy that the wind mill may produces.

Alcance

En este proyecto se realiza el estudio de una planta de desalinización de agua de mar con una producción de 4800 m³/día de agua potable, ubicada en el sureste de Gran Canaria, concretamente en la costa del municipio de Santa Lucía de Tirajana. También se estudian la alimentación de la planta por energía eólica y la posible producción de hidrógeno.

Se realizan principalmente el estudio del núcleo de la planta desaladora, incluyendo bombas de agua, membranas y tuberías para el transporte del agua, y el estudio de la energía eólica y de la producción de hidrógeno.

Dentro de la desalación se tratarán los siguientes apartados:

- La ubicación de la planta desaladora.
- La selección de las membranas para la ósmosis inversa.
- La selección del sistema de recuperación de energía.
- El dimensionado de las bombas de captación, de alta presión, booster y de distribución.
- Cálculo del consumo energético de la planta.

Dentro del bloque correspondiente a la alimentación por energía eólica de la planta se tratarán los siguientes apartados:

- Evaluación de los recursos eólicos disponibles.
- Selección del aerogenerador.

La producción de hidrógeno se tratará en un último bloque en el que se evaluarán diferentes formas de aprovechar o almacenar la energía no consumida por la planta.

Dentro de este proyecto no se tratarán las siguientes partes:

- Las instalaciones eléctricas, electrónicas, sistemas de automatización y control, climatización, saneamiento, sistema contra incendios y otros sistemas.
- Estudio geológico del suelo, de las mareas, de ornitología y de otros factores que pueden afectar a la realización del proyecto o ser perjudicados por él.
- La obra civil del proyecto.
- Las instalaciones de pre y posttratamiento del agua.
- Planos.
- Pliego de condiciones.
- Estado de mediciones.
- Presupuesto.
- Estudio de seguridad y salud.
- Control del rechazo de salmuera.

Antecedentes

Recursos hídricos en Canarias

Las islas Canarias constan de unos recursos hídricos limitados, especialmente las islas orientales, por lo que en ellas tienen una gran importancia la desalación y la reutilización de agua. En cambio, en las islas occidentales se aprovechan al máximo los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

Las formas de aprovechamiento de los recursos hídricos superficiales y subterráneos empleadas en Canarias son las siguientes: manantiales, de los cuales ha desaparecido el 75% de los que existían a principios del siglo XX, embalses y presas, cuyo volumen supone poco más del 5% de los recursos hídricos actuales, pozos, los cuales representan el tipo de captación más importante, pero cuya calidad de agua a pesar de que se aumentan los caudales va disminuyendo, y galerías, de las que se obtiene agua de buena calidad pero cuya producción va disminuyendo.

Para la producción industrial de agua en Canarias se emplean desaladoras y depuradoras. En las depuradoras se limpian aguas residuales para emplearlas, por ejemplo, para el riego. En las desaladoras se separan las sales del agua de mar o aguas salobres para utilizarlas para el consumo humano, industrial o riegos.

El uso del agua en Canarias se distribuye de la siguiente manera: uso agrícola 58%, uso urbano 29%, uso turístico 11% y uso industrial 2%, aunque estos porcentajes varían mucho de una isla a otra.



Figura 1. Uso de agua en Canarias.

En los últimos años ha habido un fuerte incremento de la demanda de agua en Canarias debido tanto al crecimiento de la población como a al aumento del número de turistas que visitan las islas.

Desde 1978 hasta la actualidad se ha registrado un claro descenso de los recursos hídricos subterráneos y superficiales, a la vez que han ido aumentando la producción de aguas desaladas y la recuperación de aguas residuales. Gracias a este constante aumento de la producción y recuperación, los recursos hídricos totales en las islas han ido aumentando para poder abastecer la creciente demanda.

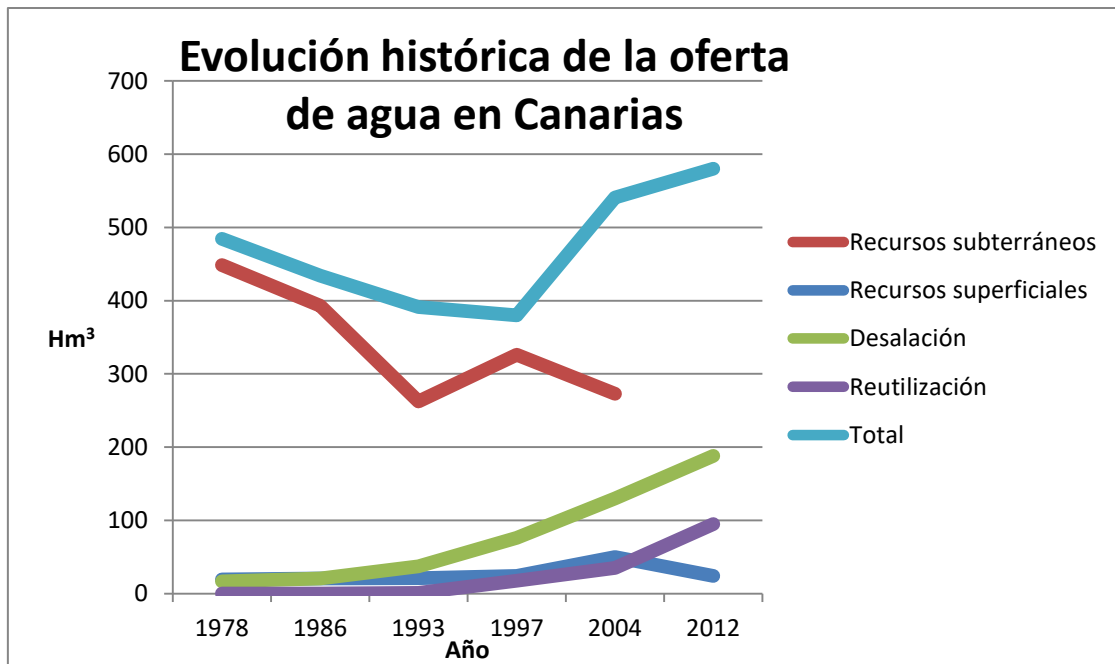


Figura 2. Evolución histórica de la oferta de agua en Canarias.

Desalación del agua de mar

La desalación de agua consiste principalmente en separar el agua de la sal para que pueda ser posteriormente utilizado para el consumo humano, riego u otros fines. La desalación de agua de mar se puede realizar por diferentes métodos como son la ósmosis inversa, la desalinización térmica, la destilación, la congelación, la evaporación relámpago o la electrodiálisis.

Dentro de los métodos por evaporación se encuentran la evaporación en múltiples etapas flash (MSF, Multi-stage flash distillation), que es el método más empleado actualmente y consiste en evaporar gotas de agua introduciéndolas en una cámara a muy baja presión, la evaporación en múltiples efectos (MED, Multiple-effect distillation), en la cual parte del agua se destila por MSF aunque la mayor parte es producida por ebullición utilizando el calor del vapor generado en un efecto, y la evaporación por compresión de vapor (CV), en la cual el calor que hace evaporar el agua proviene de la compresión de vapor. Dentro de los métodos que utilizan membranas se encuentran la electrodiálisis (ED), la cual utiliza membranas especiales y un campo eléctrico para separar las sales del agua, y la ósmosis inversa (OI), en la cual aplicando presión al agua se hace que esta atraviese una membrana que deja pasar las partículas de agua, pero no las sales.

Desalación por ósmosis inversa

La ósmosis consiste en separar por una membrana semipermeable dos fluidos de diferente concentración de sales. De esta forma el agua de la mezcla de menor concentración pasará a través de la membrana a la mezcla de mayor concentración, hasta que la concentración de sales sea igual en ambos lados. En la ósmosis inversa lo que se intenta es separar las sales del agua en que están disueltos, es decir, invertir el proceso de ósmosis. Para ello la mezcla de

agua y sales (agua de mar) se hace pasar por una membrana aplicándole una presión externa, esta presión debe superar la presión osmótica de la solución.

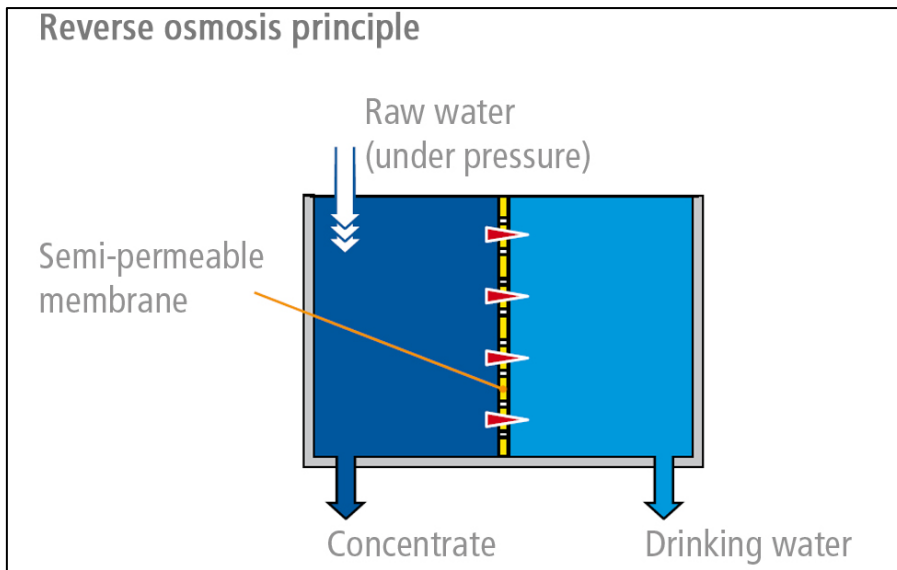


Figura 3. Principio de la Ósmosis Inversa. Fuente: KSB

En función de la calidad de agua que se desea obtener se debe emplear un tipo de membrana u otro. Para conocer qué membrana debe usarse se utiliza un software de cálculo. Otro valor importante que se obtiene mediante los programas de cálculo de las membranas es la presión que se ha de dar al agua de alimentación, ya que si esta es muy baja y no supera la presión osmótica del fluido este no pasará por las membranas. Además, antes de realizar el proceso de ósmosis inversa se debe pretratar el agua para disminuir su turbidez y el contenido de sólidos en suspensión.

Membranas

Las componentes más importantes de un sistema de desalación por ósmosis inversa son las membranas, ya que son las que separan las sales del agua, y del tipo de membranas que se emplean dependerán el caudal de alimentación, la conversión y la presión necesaria para realizar la desalación.

Clasificando las diferentes membranas según su forma destacan las membranas planas, las cuales presentan una baja área de contacto, las membranas tubulares, las cuales son las más usadas por tener un mayor área de contacto por unidad de volumen, y las membranas de fibra hueca, que presentan un elevado área de contacto por unidad de volumen, pero también una gran posibilidad de obstrucción.

La capa activa de las membranas, que es la capa que separa el agua de las sales y está soportada por una estructura porosa, puede ser fabricada a partir de componentes orgánicos como el triacetato de celulosa, acetato de celulosa, poliamidas aromáticas, poliéter-urea o poliacrilonitrilo, o a partir de componentes inorgánicos como vidros, cerámicas (alumina), fosfocenos o estructuras de carbono.

Las membranas además pueden ser de muy baja presión, entre 5 y 10 bar, de baja presión, entre 10 y 20 bar, de media presión, entre 20 y 40 bar, o de alta presión, entre 50 y 80 bar. Normalmente cuanto más elevado sea el contenido en sales del caudal de alimentación de mayor presión será la membrana a utilizarse para la desalinización.

Para realizar el proceso de ósmosis inversa las membranas se colocan en recipientes de presión. En cada uno de estos recipientes se pueden colocar varias membranas para aumentar así la conversión y por lo tanto el caudal del permeado.

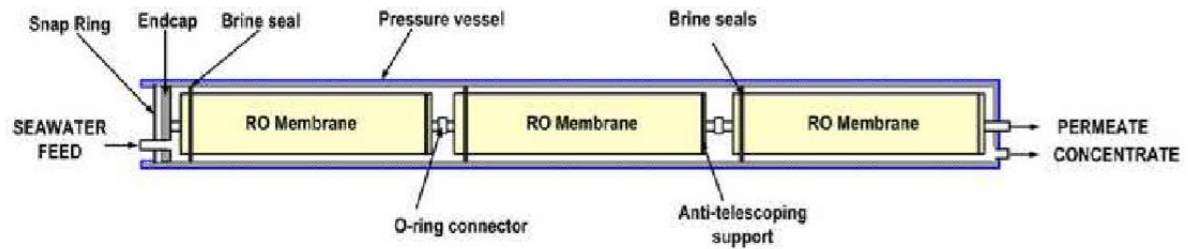


Figura 4. Recipiente de presión con tres membranas de OI. Fuente: Manual de utilización del software "ROSA" para simulación de unidades de ósmosis inversa de Álvaro Muelas Expósito

Además dentro de cada instalación de desalinización de agua se coloca una gran cantidad de recipientes de presión, cuyo número aumenta en función de la cantidad de permeado que se desea producir.

Desalación de agua en Canarias

Debido a la escasez de recursos hídricos en las islas Canarias estas son pioneras en la producción de agua mediante su desalación y recuperación, instalándose en Lanzarote en el año 1964 la primera desaladora de España.



Figura 5. Las primeras plantas desaladoras en Canarias. Fuente: Carmelo Santana Delgado, Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria

Hace más de 50 años que se ha comenzado a usar procesos térmicos para la desalación de agua de mar en Canarias, siendo las primeras desaladoras de las islas del tipo MSF y CV.



Figura 6. Las primeras plantas desaladoras que emplean membranas en Canarias. Fuente: Carmelo Santana Delgado, Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria

En 1979 se instaló la primera planta de desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa en Canarias en la isla de Gran Canaria, siguiéndole otras instaladas en Lanzarote y Gran Canaria pocos años después, y en 1986 la primera desaladora mediante electrodiálisis.

Actualmente en las islas orientales más de la mitad de los recursos hídricos son obtenidos mediante la desalación de agua de mar. Concretamente en Lanzarote y Fuerteventura la principal fuente de obtención de agua es la desalación, suponiendo en Lanzarote el 99% y en Fuerteventura el 80%. En Gran Canaria más del 50% de los recursos hídricos disponibles actualmente son obtenidos mediante desalación, en el Hierro suponen más del 40% del agua disponible y en Tenerife el 16%.



Figura 7. Disponibilidad de recursos hídricos en Canarias. Fuente: Carmelo Santana Delgado, Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria

En total en Canarias hay instaladas más de 300 desaladoras, las cuales producen más de 660.000 m³/día, lo que supone el 1% de la capacidad instalada a nivel mundial. Además la islas constan de la mayor densidad de plantas desaladoras en explotación del mundo.

La producción de agua mediante desalación supone un importante consumo de energía, y por lo tanto un gran coste, además de afectar al medioambiente si la energía no es producida de forma renovable.

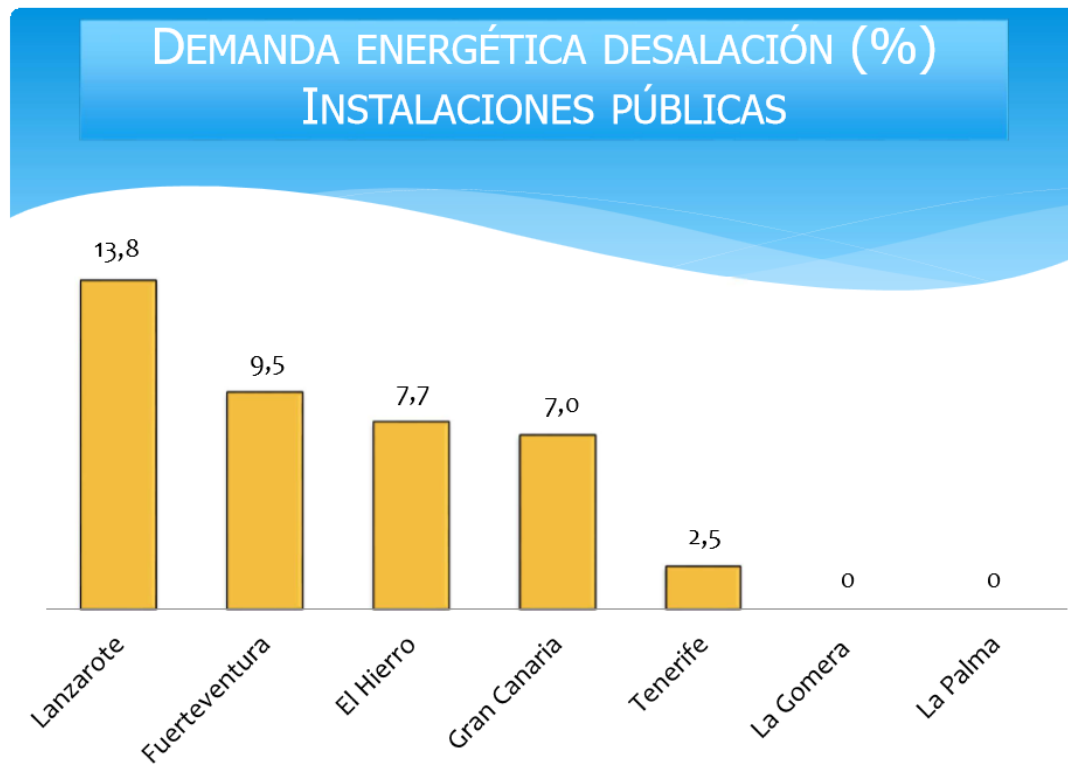


Figura 8. Porcentaje de la demanda energética que presenta la desalación. Fuente: Carmelo Santana Delgado, Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria

Para reducir este consumo energético se está reduciendo el consumo de las plantas desaladoras mediante innovaciones en la recuperación de energía y membranas que funcionan con presiones más bajas.

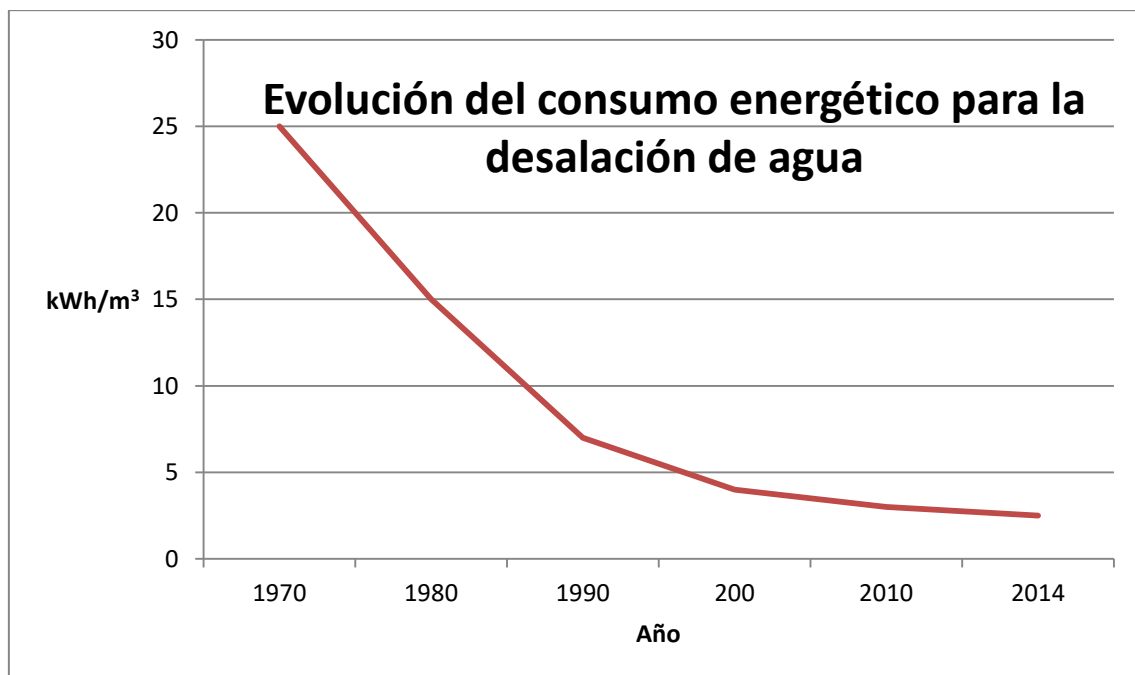


Figura 9. Evolución del consumo energético para la desalación de agua.

Energías renovables

El uso de las energías renovables gana cada vez más importancia, no solo por cuestiones ecológicas sino también económicas, ya que son una fuente de energía gratuita y básicamente suponen una elevada inversión inicial. Dentro de las diversas energías renovables se pueden destacar la energía eólica, la solar térmica, la solar fotovoltaica, la geotérmica, la undimotriz y la mareomotriz para su uso en la desalación.

Según la forma de desalar el agua se requiere energía en forma de calor o en forma de electricidad y en el caso de la compresión mecánica se requiere en ambas formas.

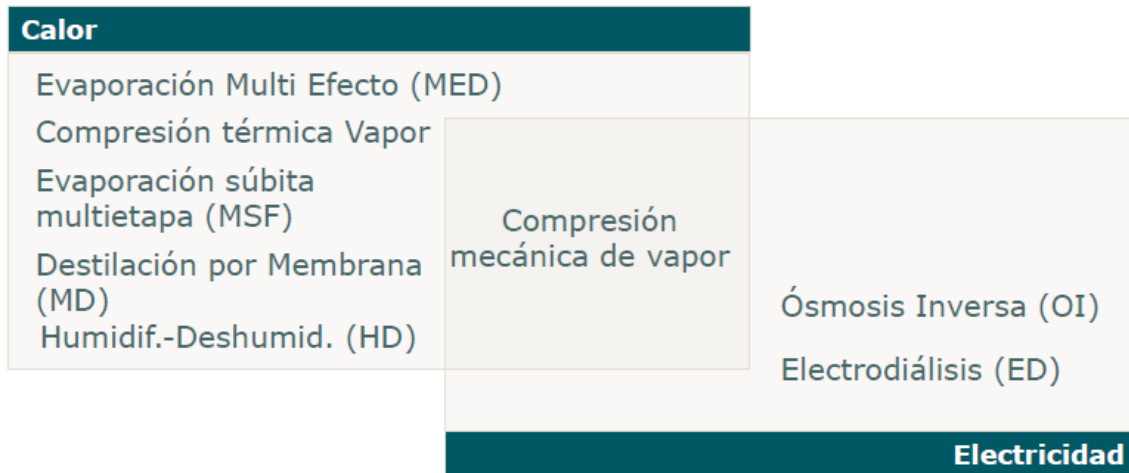


Figura 10. Tipos de energía requerida para diferentes formas de desalar. Fuente: Baltasar Peñate Suárez, Jefe Departamento de Agua ITC

En concreto en las islas Canarias se pueden destacar la energía solar, la eólica y la undimotriz, aunque esta última no está muy desarrollada, pero presenta un gran potencial. Según el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) la combinación más prometedora para la desalación a gran escala es la de ósmosis inversa con energía eólica.

Energía eólica

La energía eólica supone una importante fuente de energía limpia en Canarias, ya que las islas constan de zonas con viento casi constantemente. Para poder aprovechar esta energía que proporciona el viento se emplean aerogeneradores, cuyas aspas giran al viento creando así electricidad.

El viento

Según Günter D. Roth, astrónomo alemán y autor de diversos libros científicos sobre estudios del cielo y planetología el viento es “la compensación de las diferencias de presión atmosférica entre dos puntos.” El viento se suele definir en función de su dirección y velocidad. El viento se crea por el calentamiento del suelo, que a su vez calienta el aire, haciendo que este se expanda y ascienda, creando así el movimiento del aire denominado viento.

En Canarias son dominantes los vientos alisios, los cuales son relativamente constantes en verano y menos constantes en invierno, y constan de una velocidad de entre 20 y 22km/h con una dirección que oscila entre el este y el noreste.

Estudio de un sistema de desalación y de producción de hidrógeno alimentado mediante energías renovables

MAPA EÓLICO DE LAS ISLAS CANARIAS

Velocidad Media Anual a 80 m de altura

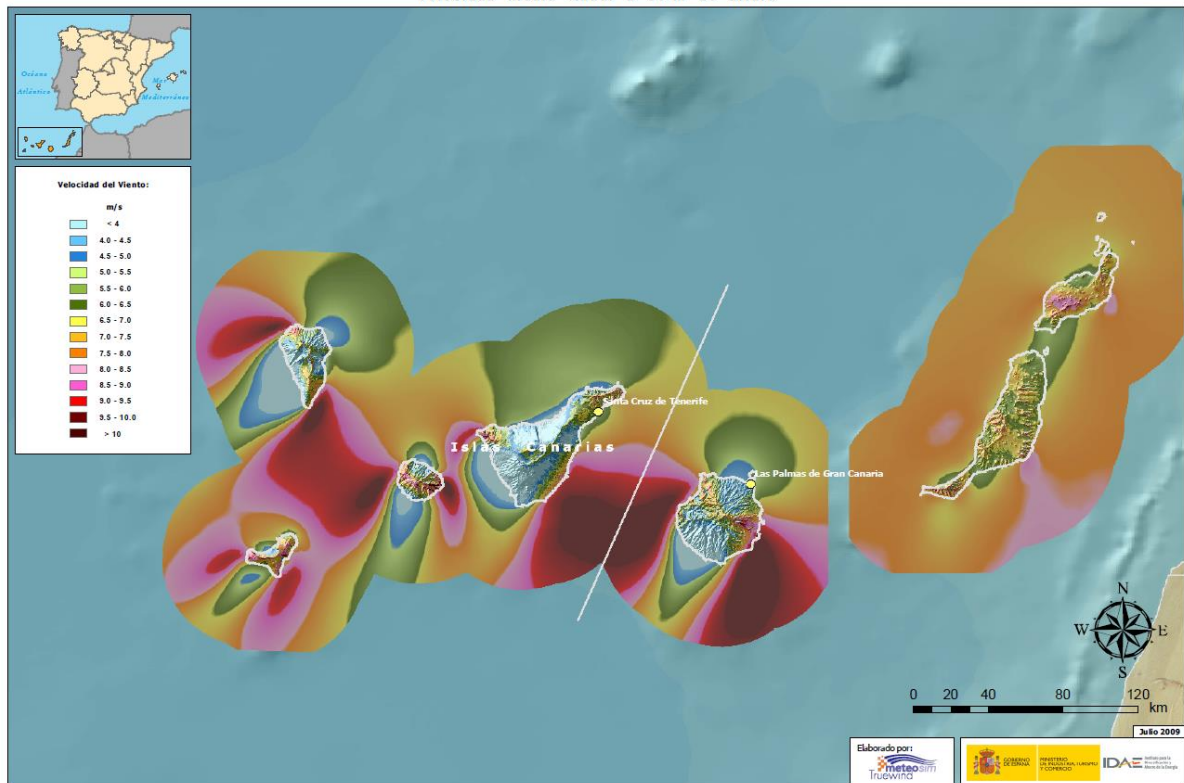


Figura 11. Mapa eólico de las islas Canarias. Fuente: IDEA

En este mapa se muestran las diferentes velocidades que lleva el viento en Canarias, haciendo visible que en las zonas noroeste y sureste el viento tiene una velocidad considerablemente mayor que en las zonas noreste y suroeste de las islas.

Normas y referencias

Disposiciones legales y normas aplicadas

- UNE 157001 de 2002 “Criterios generales para la elaboración de proyectos”
- UNE 50-132:94 “Numeraciones de las divisiones y subdivisiones de los documentos escritos”
- Artículo 29 del Decreto 6/2015, de 30 de enero del Boletín Oficial de Canarias, por el que se aprueba el Reglamento que regula la instalación y explotación de los Parques Eólicos en Canarias.
- Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.
- Plan hidrológico de la demarcación hidrográfica de Gran Canaria.
- Reglamento de la asignatura “Trabajo de fin de grado” de la Universidad de La Launa.

Bibliografía

‘Introducción a la desalación de aguas’ Autor: José Miguel Veza

‘Descripción del funcionamiento de la desaladora de agua de mar del canal de Alicante’ Autor: Carlos Vicente Caballero, Ingeniero Industrial Prointec, S.A.

‘Manual de utilización del software “ROSA” para simulación de unidades de ósmosis inversa’ Autor: Álvaro Muelas Expósito

‘Mejoras energéticas realizadas en las desaladoras de agua de mar del CIAGC. Ejemplos viables en el rediseño de procesos de desalación.’ Autor: Carmelo Santana Delgado, Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria.

‘Desalación con uso exclusivo de energías renovables: de la pequeña a la gran escala’ Autor: Baltasar Peñate Suárez, Jefe Departamento de Agua del Instituto Tecnológico de Canarias

‘Introducción al diseño de grandes plantas desaladoras de agua de mar’ Autor: José Luis Pérez Talavera, Consultor de grandes plantas de desalinización de agua de mar

‘Recurso eólico de Canarias’

http://www.itccanarias.org/recursoeolico/calculation_tool/index.html

‘ASETUB - Asociación Española de Fabricantes de Tubos Y Accesorios Plásticos - Fabricantes’

<http://www.asetub.es/fabricantes>

‘Batimetría de Las Islas Canarias’

<http://oag.maps.arcgis.com/apps/OnePane/basicviewer/index.html?appid=ac4d483d2bc14e32a14d8d6429f9d56a>

Center for History and New Media, ‘Guía Rápida’

http://zotero.org/support/quick_start_guide

‘Datos E Información Sobre El Agua. | Wikiaquae’, *Fundación Aquae*

<http://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/>

‘Dewind’

<http://www.dewindco.com/eng/dewind/about.asp>

‘Energy Recovery Home - Energy Recovery’

<http://www.energyrecovery.com/>

‘Filtration – Nordic Water’

<http://www.nordicwater.com/products/filtration/>

‘Fundación Centro Canario Del Agua Tratamientos Para El Agua’, *Fundación Centro Canario Del Agua*

Estudio de un sistema de desalación y de producción de hidrógeno alimentado mediante energías renovables

<http://fcc.a.es/>

'Gamesa'

<http://www.gamesacorp.com/es/>

'Gobierno de Canarias'

<http://www.gobiernodecanarias.org/principal/>

'Goolzoom'

<http://es.goolzoom.com/>

'Hispagua | Sistema Español de Información Sobre El Agua'

<http://hispagua.cedex.es/>

'Home (Enercon)'

<http://www.enercon.de/en/home/>

IDAE, 'IDAE, Instituto Para La Diversificación Y Ahorro de La Energía', 2007

<http://www.idae.es/>

'Inicio', *Adequa*

<http://adequa.es/>

'Inicio - Sulzer'

<http://www.sulzer.com/>

'ISTAC | Inicio'

<http://www.gobiernodecanarias.org/istac/>

'Lowara, a Xylem Brand - International Web Site', *Lowara - International*, 2012

<http://lowara.com/>

'Nordex: Nordex-Online.com - English'

<http://www.nordex-online.com/en>

'Ósmosis Inversa, Tratamiento de Agua Y Sistemas de Filtración'

<http://es.pureaqua.com/>

'Página Inicio | Puertos.es'

<http://www.puertos.es/es-es>

'Pumps, Valves and Service | KSB'

<https://www.ksb.com/ksb-en/>

‘Sati - Water Filtration Technology’

<http://www.satifiltri.com/?lang=es>

‘Temperatura Del Agua Del Mar. Temperaturas de La Superficie Del Agua En La Costa de Los Océanos Y Mares.’

<http://seatemperature.info/es/>

‘The DOW Chemical Company - Home’

<http://www.dow.com/>

‘VENSYS Energy AG – Welcome to VENSYS’

<http://vensys.de/energy-en/index.php>

‘Water Treatment and Purification - Lenntech’

<http://www.lenntech.com/>

‘Welcome to Wasserelektrolyse Hydrotechnik’

<http://www.en.ht-hydrotechnik.de/>

‘Www.brennstoffzelle-Energie.de’

<http://www.brennstoffzelle-energie.de/>

‘Www.fuhrlaender.de - Home’

<http://www.fuhrlaender.de/en/>

‘Pixelis Maps / Buscador de Coordenadas GPS’

<http://www.maps.pixelis.es>

‘Vestas | Wind It Means the World to Us’

<https://www.vestas.com/en>

Programas de cálculo

Software para dimensionar membranas ROSA9.

Hoja Excel para el dimensionado del intercambiador de presión ofrecido por Energy Recovery.

Microsoft Office Word 2010.

Microsoft Office Excel 2010.

Aplicación online para la selección de bombas ofrecida por KSB.

Aplicación online para la selección de bombas ofrecida por Sulzer.

Aplicación online para la selección de bombas ofrecida por Lowara.

Estudio de un sistema de desalación y de producción de hidrógeno alimentado mediante energías renovables

Aplicación online para la selección de aerogenerador ofrecida por el Instituto Tecnológico de Canarias.

Definiciones y abreviaturas

Definiciones

Salmuera: Agua saturada con sal que se produce al filtrar agua de mar por membranas de ósmosis inversa y es rechazada.

Índice de densidad de sedimentos (SDI): Indica la cantidad de sedimento que contiene el agua.

Factor de flujo: *Este factor se define como la fracción entre la permeabilidad al agua de una membrana y la de una membrana con el flujo nominal especificado, y su principal utilidad es el cálculo de la presión a la que hay que introducir la alimentación: cuanto menor sea el FF, mayor presión habrá que suministrar a la alimentación.* (Álvaro Muelas Expósito en *Manual de utilización del Software "ROSA" para simulación de unidades de ósmosis inversa*, 2011)

Eficiencia: la eficiencia o rendimiento de una bomba, intercambiador de calor, etc. es igual a la fracción entre la potencia que este dispositivo podría producir si fuese ideal y la potencia que realmente produce.

Permeado: Agua producto obtenida tras realizarse la ósmosis inversa.

Conversión: Porcentaje del caudal de alimentación que traspasa las membranas convirtiéndose en permeado.

Isóbata: indica en un mapa los puntos de igual profundidad del mar.

Abreviaturas

EDAM: Estación Desaladora de Agua de Mar

Slpm: standard litre per minute

IDEA: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía

ITC: Instituto Tecnológico de Canarias

ISTAC: Instituto Canario de Estadística

OI: Ósmosis Inversa

ED: Electrodiálisis

MED: Evaporación Multi Efecto

MSF: Evaporación Súbita multietapa

MD: Destilación por Membrana

HD: Humidificación – Deshumidificación

CV: Evaporación por Compresión de Vapor

DAF: Flotación de Aire Disuelto

Requisitos de diseño

Emplazamiento

Se ha decidido ubicar la planta de desalación en la isla de Gran Canaria, ya que de las islas Canarias es aquella con mayor número de desaladoras, debido a la elevada demanda y la escasez de aguas superficiales y subterráneas.

	Nº desaladoras	Públicas	Privadas	Producción [m ³ /día]
TENERIFE	44	5	36	118.143
GRAN CANARIA	137	11	126	336.195
FUERTEVENTURA	64	4	60	65.049
LANZAROTE	80	0	80	62.570
LA GOMERA	1	0	1	4.100
EL HIERRO	4	4	0	2.000
LA PALMA	0	0	0	0

Tabla 1. Las desaladoras en Canarias y su producción.

En concreto se ha decidido que la desaladora se ubicará en el municipio de Santa Lucía de Tirajana cuya población está en constante crecimiento, por lo que también aumenta la demanda de agua potable.

Año	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006
Población Santa Lucía	69.069	68.544	68.506	67.291	66.130	64.845	63.637	61.325	58.335	57.211

Año	2005	2004	2003	2002	2001	2000
Población Santa Lucía	56.268	53.820	52.684	49.902	47.161	44.974

Tabla 2. Evolución de la población en el municipio de Santa Lucía.

La ubicación exacta de la EDAM será la siguiente:



Figura 12. Ubicación de la planta desaladora.

Esta ubicación se ha elegido por su cercanía al mar y lejanía de población.

Según el artículo 29 del Decreto 6/2015, de 30 de enero del Boletín Oficial de Canarias la distancia mínima entre un aerogenerador y un núcleo habitado es de 400 metros para aerogeneradores de más de 900kW.

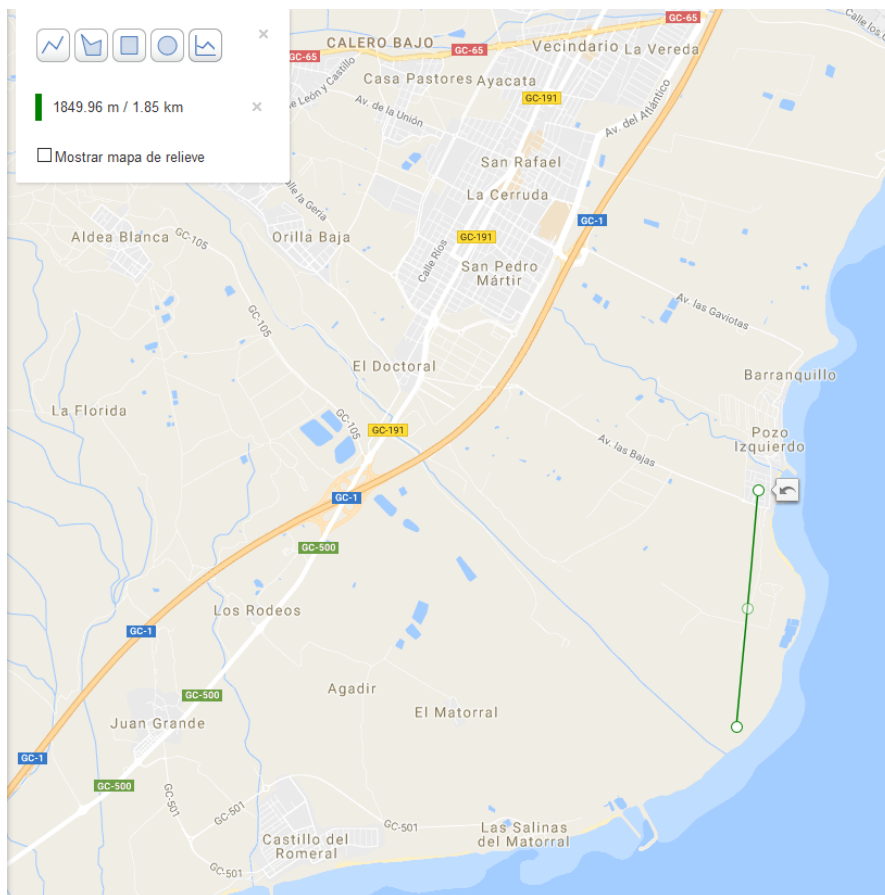


Figura 13. Medición de la distancia entre la EDAM y el núcleo habitado más cercano.

Según las medidas realizadas a través de la herramienta online GoolZoom el núcleo habitado más cercano se encuentra a aproximadamente 1,85 km, con lo que se cumple claramente con lo expuesto en el Decreto 6/2015.

Otra razón por la que se ha considerado que este es un buen sitio para ubicar la planta son las elevadas velocidades que alcanza el viento, permitiendo así una mayor generación de energía mediante un aerogenerador.

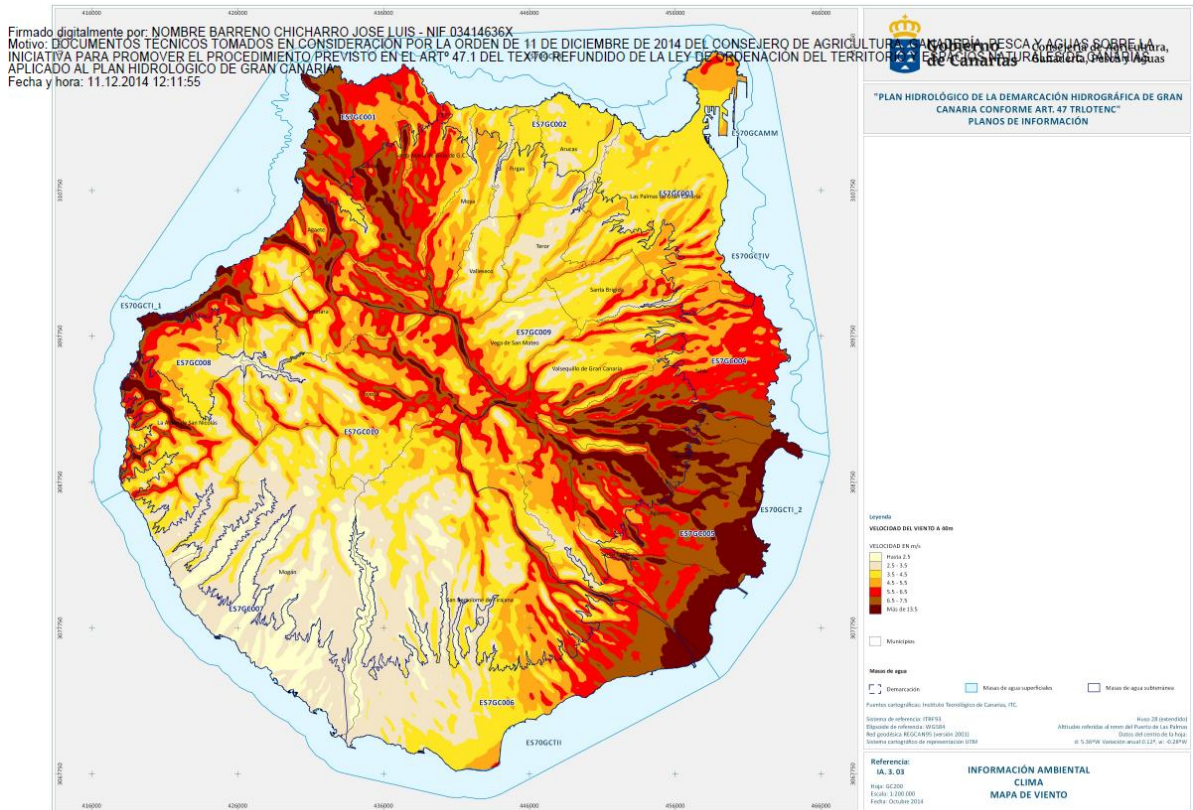


Figura 14. Mapa de viento del plan hidrológico de la demarcación hidrográfica de Gran Canaria. Fuente Gobierno de Canarias

Según este mapa en el emplazamiento elegido para la EDAM la velocidad del viento es de más de 13,5 m/s.

Capacidad de la planta

La planta será de tamaño pequeño y producirá 4800 m³/día de agua potable para abastecer parte del consumo de los habitantes del municipio.

Temperatura y composición del agua

A continuación se muestran las temperaturas medias de cada mes y la anual del agua de mar medidas en Las Palmas de Gran Canaria.

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Media
Temperatura [°C]	19	19	18	19	20	21	21	22	23	23	22	20	20.6

Tabla 3. Temperatras mensuales y anual del agua de mar en Las Palmas de Gran Canaria.

Estudio de un sistema de desalación y de producción de hidrógeno alimentado mediante energías renovables

La composición del agua de mar, medida en Santa Cruz de Tenerife, es la siguiente:

Potasio (K)	450,52 mg/l
Sodio (Na)	11.857,36 mg/l
Magnesio (Mg)	1.468,43 mg/l
Calcio (Ca)	430,54 mg/l
Estroncio (Sr)	9,99 mg/l
Bario (Ba)	0,02 mg/l
Carbonato (CO ₃)	26,03 mg/l
Bicarbonato (HCO ₃)	141,65 mg/l
Nitrato (NO ₃)	0,70 mg/l
Cloruro (Cl)	21.302,91 mg/l
Fluoruro (F)	0,86 mg/l
Sulfato (SO ₄)	3.151,39 mg/l
Sílice (SiO ₂)	1,10 mg/l
Boro (B)	4,42 mg/l
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,48 mg/l
STD (Sólidos Totales Disueltos)	38.866,59 mg/l
pH	8,20

Tabla 4. Composición del agua de mar en las Islas Canarias.

Agua producida

El agua producida debe tener la calidad de agua potable por lo que no puede superar la cantidad de sustancias indicadas en la siguiente tabla:

Sustancia	mg/l
Amonio (NH ₄)	0,5
Boro (B)	1
Cloruro (Cl)	250
Fluoruro (F)	1,5
Nitrato (NO ₃)	50
Sodio (Na)	200
Sulfato (SO ₄)	250
pH	6,5-9,5

Tabla 5. Contenido máximo admitido de sustancias en agua potable.

Análisis de soluciones

En este apartado se explicarán brevemente las diversas soluciones que se han barajado para diferentes partes del proyecto y se indicará por cuales se ha optado en cada parte.

Captación del agua

A continuación se explicarán diversas formas de captación de agua de mar.

Toma abierta

La toma de agua de mar abierta consiste principalmente en captar el agua de mar mediante una tubería que se lleva al mar hasta una cierta distancia de la costa, donde se recoge el agua de forma directa. La principal desventaja de este sistema de captación es que junto al agua de mar se recoge gran cantidad de sólidos en suspensión que pueden obstruir las bombas e

incluso las tuberías. Otra desventaja es que, durante tormentas el agua de mar se revuelve y al ser recogida por la toma abierta queda turbida. Además, frente a otras formas de captar el agua, en el caso de usar esta el agua necesitará un pretratamiento más complejo. Una ventaja es la sencilla instalación de un sistema como este.

Laguna artificial

Este sistema consiste en construir una laguna artificial en la costa en la que entra el agua de mar que será entonces recogida dentro de la laguna. Este sistema es muy efectivo, ya que suministra agua de buena calidad. En esta agua incrementa el número de bacterias, pero esto no suele suponer un problema a la hora de realizar el proceso de desalinización. Este tipo de toma de agua suele ser interesante cuando el relieve obliga la construcción de una toma de gran longitud para alcanzar la profundidad deseada. Esta forma de captación de agua en este caso se descarta por la gran obra civil que supondría para una planta desaladora relativamente pequeña.



Figura 15. Laguna artificial.

Toma mediante torre

Este es el método de captación más usado, pero presenta el riesgo de que la torre puede volcarse con la presencia de fuertes mareas si se sitúa sobre arena y no está adecuadamente. *Estudio de un sistema de desalación y de producción de hidrógeno alimentado mediante energías renovables*

protegida. Las torres han de colocarse a una profundidad mínima de 10 m y a ellas se conecta una tubería enterrada o que lleva un contrapeso para que esta no flote. Este sistema se descarta por la presencia de fuertes mareas en las costas de las islas Canarias.



Figura 16. Toma mediante torre.

Toma mediante pozo

Este tipo de toma de agua de mar cerrada se realiza cavando un pozo cercano al mar en el que se filtra el agua que entonces será captada. Una gran ventaja de este sistema es que al filtrarse el agua por el suelo esta no contiene sólidos en suspensión que puedan obstruir el sistema de bombas y tuberías. Una desventaja es que al filtrarse el agua por el suelo, esta puede absorber con elementos contenidos en el suelo.

Comparando estos dos sistemas se ha optado por la toma cerrada para así disminuir las probabilidades de que se obstruya la entrada de agua además de ser una opción relativamente económica al requerir una obra civil pequeña.

Pretratamiento

El pretratamiento del agua de mar es esencial para garantizar el buen funcionamiento de las membranas, evitando así que estas se obstruyan por partículas contenidas en el agua o que se produzcan precipitaciones de algunos elementos.

Pretratamiento físico

Dentro del pretratamiento físico destacan los filtros tanto de arena como de cartucho, empleados para eliminar partículas de diferentes tamaños.

En vez de usar filtros de arena también pueden usarse membranas de ultrafiltración. El problema que suelen dar estas membranas es que provocan un ensuciamiento más rápido de los filtros de cartucho y de las membranas de ósmosis inversa que cuando se usan filtros de arena.

Además se puede utilizar el sistema de flotación DAF, con el que se pueden eliminar sólidos de baja densidad como aceites, grasas o algas. Estos sólidos pueden aparecer en el agua si esta es captada cerca de puertos o zonas industriales.

Pretratamiento químico

En el pretratamiento químico destaca la modificación del pH. En este caso se ha optado por reducir su valor hasta 5 mediante la adición de H_2SO_4 .

Selección de las membranas

Para seleccionar las membranas que se usarán en el sistema de ósmosis inversa se ha hecho uso del programa ROSA9 ofrecido por el fabricante DOW. Este fabricante ofrece membranas de los siguientes tipos: “brackish water” (agua salobre), “fouling resistant” (resistentes al ensuciamiento), “low energy” (de baja energía), “industrial grade brackish water” (agua salobre de grado industrial), “nanofiltration” (nanofiltración), “sanitary/full fit (medical/food)” (agua de uso sanitario o alimentario), “seawater” (agua de mar), “semiconductor” (agua ultrapura), “tap water (home drinking)” (agua de uso doméstico) y “other products” (otros productos).

En este caso, como el agua a desalar es de mar se utilizará una de las membranas del tipo “sea water”. Dentro de este grupo de membranas se encuentran las siguientes:

Seawater

8.0" x 40"	4.0" x 40"	2.5" x 40"	Other
SW30XHR-440i	SW30-4040	SW30-2540	SW30-4021
SW30ULE-440i	SW30HRLE-4040		SW30-2521
SW30XLE-440i			SW30-2514
SW30HRLE-440i			SW30-6040
SW30XHR-400i			
SW30ULE-400i			
SW30XLE-400i			
SW30HRLE-400i			
SW30HRLE-400			
SW30HRLE-370/34i			
SW30HR-380			
SW30-8040			

Figura 17. Listado de membranas que ofrece DOW para la desalación de agua de mar. Fuente: DOW

De entre estas membranas se ha seleccionado la del tipo SW30HRLE-440i, ya que permite tanto un elevado caudal de permeado como una buena conversión. Sobre esta membrana el proveedor indica en su página web que está indicado para su uso en desalación de agua marina, agua potable municipal y desalación industrial.

Dentro de una instalación de ósmosis inversa se pueden colocar una o varias etapas, en el segundo caso se hace pasar al rechazo de la primera etapa por otra etapa más para aumentar la cantidad de permeado que se obtiene por el caudal de alimentación del sistema. Este método puede resultar útil en el caso de que el fluido con que se alimenta el sistema de ósmosis es escaso o costoso de producir, pero en el caso de esta planta desaladora ubicada al lado del mar el fluido de alimentación es abundante y conviene no usar varias etapas sino aumentar el caudal de alimentación para no elevar el consumo energético que provoca que se haga pasar el fluido por varias etapas. Otra desventaja del uso de varias etapas es que aumenta el contenido en sales del permeado, lo que empeoraría la calidad del agua.

Selección del sistema de recuperación de energía

Para no desperdiciar la energía en forma de presión que lleva el rechazo de salmuera al abandonar el sistema de ósmosis inversa esta presión se transmitirá al agua de alimentación del sistema. Con la recuperación de esta energía se puede reducir considerablemente el consumo energético de la planta.

Turbocharger

En los turbocharger el fluido de alta presión hace girar el eje transfiriendo así su presión al fluido de baja presión, permitiendo de esta forma un importante ahorro de energía al aprovecharse la presión que lleva el rechazo de salmuera.

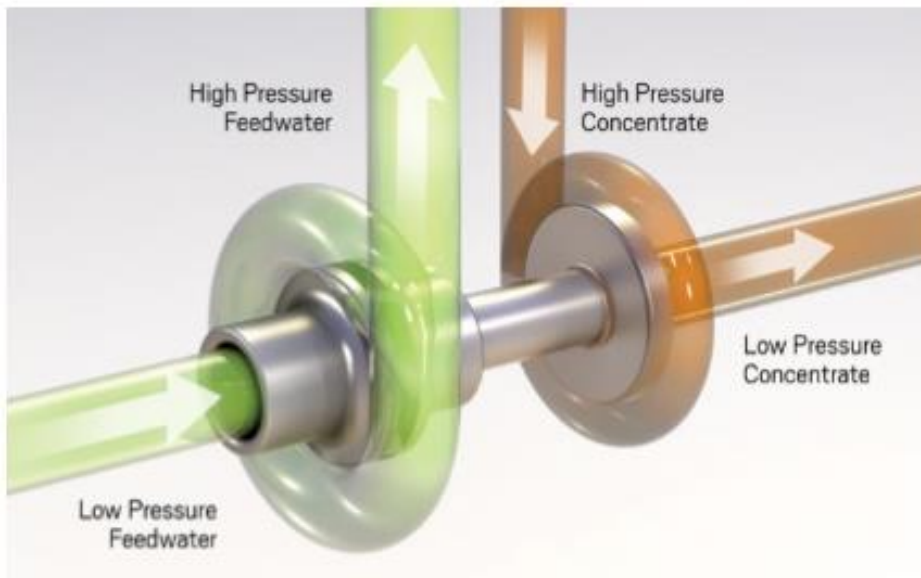


Figura 18. Intercambio de presión en un turbocharger. Fuente: Energy Recovery

Intercambiador de presión

En los intercambiadores de presión esta se transfiere de forma directa desde un fluido a otro mediante tubos de válvulas. Con este método se reducen considerablemente las pérdidas de energía, aumentando así la eficiencia del dispositivo e incrementando el ahorro energético.

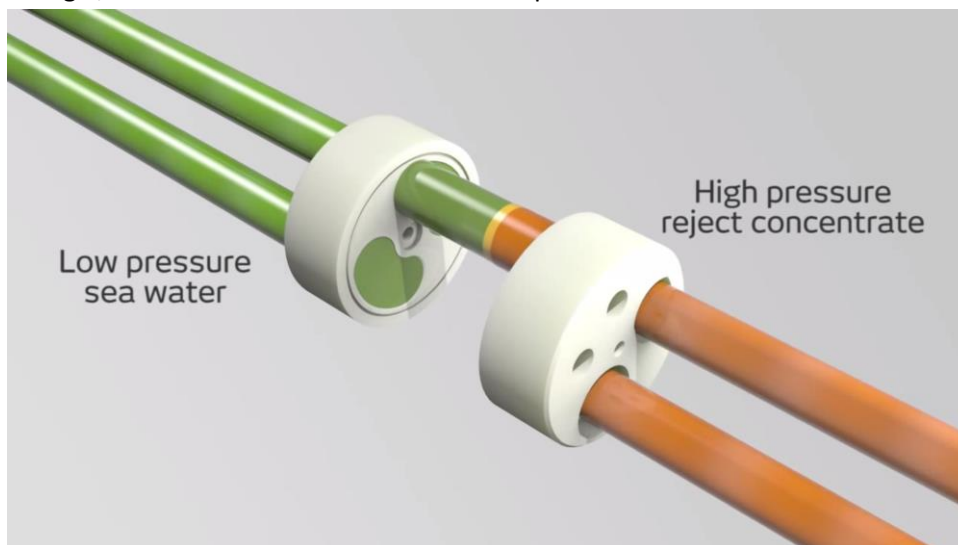


Figura 19. Transferencia de presión mediante un intercambiador de presión. Fuente: Energy Recovery

Según las especificaciones del fabricante Energy Recovery, sus intercambiadores de presión constan de una eficiencia de hasta el 98% y su turbocharger más eficiente alcanza el 80%.

Sabiendo que con el intercambiador de presión se podrá recuperar una mayor parte de la presión, y por lo tanto se reducirá más el consumo energético, se decide usar a este para el sistema de recuperación de energía.

Mediante un Excel ofrecido por el fabricante Energy Recovery se obtiene que para el caso de la planta desaladora estudiada en este proyecto lo más apropiado es utilizar 6 intercambiadores del tipo PX-Q300.

Selección de las bombas

Para seleccionar las bombas que se utilizarán en la planta desaladora se ha hecho uso de las herramientas online ofrecidas por los fabricantes Sulzer, KSB y Lowara. Los criterios para seleccionar las bombas más apropiadas serán que tengan un elevado rendimiento y un bajo consumo energético.

Bomba de captación

Para seleccionar las bombas de captación se ha indicado que han de proporcionar una altura manométrica de 60m y que llevarán un caudal de 250 m³/h.

Los resultados obtenidos por las herramientas online son los siguientes:

Fabricante	Modelo	Rendimiento [%]	Potencia [kW]
Lowara	TVS10.3-2 VV L8W5502D	81,2	50,7
KSB	Amarex KRT K	64,3	63,79
Sulzer	SJT-20DLC	82,81	49,38

Tabla 6. Posibles bombas de captación.

La bomba con mayor rendimiento y menor consumo energético es la que da el fabricante Sulzer, por lo que es esta la que se selecciona como la más apropiada para extraer el agua marina del pozo.

Bomba de alta presión

Esta bomba ha de proporcionar una altura de 518,23 m a un caudal de 200 m³/h de agua de mar. Para estos datos se han encontrado las siguientes bombas:

Fabricante	Modelo	Rendimiento [%]	Potencia [kW]
KSB	Multitec CA	76,1	381,67
Sulzer	MBN100-300	76,87	367

Tabla 7. Posibles bombas de alta presión.

Para estos requisitos el fabricante Lowara no ofrece ninguna bomba. De entre las bombas que ofrecen KSB y Sulzer la que ofrece el segundo tiene un menor consumo energético y mayor rendimiento por lo que se decide utilizar esta para el proyecto.

Bomba booster

La bomba booster empleada en el sistema de recuperación de energía ha de proporcionar una altura manométrica de 15,37 m a un caudal de 300 m³/h de agua de mar.

Fabricante	Modelo	Rendimiento [%]	Potencia [kW]
Lowara	ICP 200-150-315	81,29	17,4
KSB	Mega CPK	84,7	15,25
Sulzer	ZE 200-250	81,71	15,64

Tabla 8. Posibles bombas booster.

De entre estas tres bombas de agua se decide que la más apropiada es la que ofrece el fabricante KSB, ya que su rendimiento es mayor que el de las demás y su consumo es menor.

Bomba de distribución

La bomba de distribución ha de aportar a los 200 m³/h de agua producida una altura manométrica de 209,19 m.

Fabricante	Modelo	Rendimiento [%]	Potencia [kW]
Lowara	MP 125.1/3D-C-16002	74,32	157,7
KSB	Multitec GA	78,5	144,90
Sulzer	ZE 200-250	79,07	144

Tabla 9. Posibles bombas de distribución.

De las tres bombas que ofrecen los fabricantes se selecciona la de Sulzer porque su rendimiento es el mayor y su consumo el menor.

Post tratamiento

Una vez el agua queda desalada es necesario realizar un postratamiento para volver a aumentar el pH hasta un valor entre 6,5 y 9,5 para que el agua sea apta para el consumo humano. Esta modificación del pH se consigue añadiendo ciertos productos químicos al agua. No se especifica el proceso exacto porque no es ámbito de este proyecto.

Rechazo salmuera

La salmuera puede guardarse en un depósito o llevarse directamente a otro lugar para deshacerse de ella. La opción de guardarla en un depósito para luego llevarla a otro lugar y deshacerse de ella en este caso se descarta, ya que llevar la salmuera directamente al agua es mucho más sencillo y económico porque únicamente requiere de la colocación de una tubería hasta el mar. Esta tubería debe llevar la salmuera hasta una cierta distancia en la que no se queda estancada en el mar. En cambio si se guardase en un depósito tendría que construirse el mismo y luego será necesario gastar energía para volver a desplazar la salmuera posteriormente.

Selección del aerogenerador

Para seleccionar el aerogenerador que se utilizará para alimentar la planta desaladora se ha hecho uso de la herramienta online ofrecida por el ITC, la cual permite calcular la potencia

media anual producida por diferentes aerogeneradores, indicando el lugar en el que se desee que sea colocado.

Para aerogeneradores colocados en la ubicación en la que se propone que se construya la planta desaladora se han obtenido las siguientes potencias medias anuales:

Fabricante	Modelo (altura)	Energía anual estimada [kWh]	Potencia nominal [kW]	Factor de carga [%]	Nº de aerogeneradores	Energía total anual estimada [kWh]
Enercon	E-101 (99m)	15.462.196,9	3050	57,87	1	15.462.196,9
Enercon	E-44 (55m)	3.448.655,9	900	43,74	2	6.897.311,8
Enercon	E-48 (50m)	3.503.778,4	800	50,00	2	7.007.556,8
Enercon	E-82 (78m)	10.093.396,9	2000	57,61	1	10.093.396,9
Enercon	E-82 E2 (59m)	10.260.550,2	2350	49,84	1	10.260.550,2
Enercon	E-70 (57m)	9.031.031,3	2300	44,82	1	9.031.031,3
Dewind	D4 (46m)	2.358.456,9	600	44,87	3	7.075.370,7
Dewind	D6 (60m)	4.489.318,8	1250	41,00	2	8.978.637,6
Dewind	D6 (60m)	4.657.917,6	1250	42,54	2	9.315.835,2
Dewind	D8 (80m)	8.657.440,5	2000	49,41	1	8.657.440,5
Vensys	Vensys 70 (65m)	7.037.993,4	1500	53,56	1	7.037.993,4
Vensys	Vensys 77 (61,5m)	7.152.589,7	1500	54,43	1	7.152.589,7
Fuhrländer	FL 1500-77m rotor (65m)	6.652.827,2	1500	50,63	1	6.652.827,2
Fuhrländer	FL 2500-100m rotor (85m)	12.770.963,2	2500	58,31	1	12.770.963,2
Gamesa	G80 (60m)	8703806,9	2000	49,68	1	8.703.806,9
Gamesa	G 87 (78m)	9839376,9	2000	56,16	1	9.839.376,9
Nordex	N90/2500 (65m)	11150198,8	2500	50,91	1	11.150.198,8
Vestas	V90/3000 (65m)	12459499,5	3000	47,41	1	12.459.499,5
Vestas	V90/1800 (80m)	9484565,5	1800	60,15	1	9.484.565,5

Tabla 10. Energía anual estimada producida por aerogeneradores ubicados en el lugar en que se colocará la EDAM.

De esta tabla se puede concluir que el aerogenerador más apropiado para alimentar la planta es el FL 1500-77 m rotor de Fuhrländer, ya que su potencia anual generada de 6652827,2 kWh es la que más se acerca a la potencia de 5466240 kWh que consume la planta desaladora durante un año.

Estudio de un sistema de desalación y de producción de hidrógeno alimentado mediante energías renovables

Uso de la electricidad sobrante

A continuación se exponen diferentes posibilidades de uso que se pueden dar a la energía producida por el aerogenerador, pero que no será utilizada por la planta desaladora.

Producción de hidrógeno

Una opción para dar uso a la energía producida por el aerogenerador que no es consumida por la planta desaladora es que se emplee para producir hidrógeno a través de un electrolizador.

Mediante el electrolizador EV 50/59 del fabricante Wasserelektrolyse Hydrotechnik GMBH se podrían producir una media de 25,57 m³N H₂ en una hora.

Para dar uso al hidrógeno producido una vez queda almacenado se ofrecen otras dos opciones:

Pila de combustión

Con el hidrógeno puede volver a producirse electricidad mediante una pila de combustión para los momentos en los que no haya suficiente viento como para alimentar la planta mediante energía eólica.

Una desventaja de esta opción es que la pila de combustión más grande que se ha encontrado disponible en el mercado es de 50 kW, pero la planta desaladora consume 624kWh, por lo que habría que emplear 13 pilas de combustión para alcanzar la potencia requerida. Esto supondría un coste de adquisición excesivo para el efecto/el ahorro que tiene esta opción de aprovechamiento de la energía sobre el sistema.

Venta del hidrógeno

Otra opción sería vender el hidrógeno. Posibles clientes podrían ser propietarios de vehículos que funcionan con hidrógeno, pero según los datos ofrecidos por el ISTAC en la isla de Gran Canaria ni hay matriculado ninguno de estos vehículos. También se podría vender para el uso científico, aunque este no requiere una gran cantidad de hidrógeno.

Además, durante la producción de hidrógeno también se produce oxígeno, el cual podría almacenarse y venderse por ejemplo a hospitales.

Conectar la planta a la red eléctrica

Otra posibilidad sería conectar la planta a la red eléctrica para realizar un intercambio de electricidad, es decir, cuando el aerogenerador produce más energía de la que la planta consume este exceso es transferido a la red eléctrica, y cuando la energía producida por el aerogenerador es demasiado poca o nula se toma la electricidad para hacer funcionar a la planta desde la red.

La conexión de un parque eólico queda regulada por el artículo 27 del Decreto 6/2015, de 30 de enero del Boletín Oficial de Canarias.

Esta opción se contempla tanto desde el punto de vista económico como ecológico como la mejor, ya que no supondría un gasto excesivo en instalaciones y además se podría aprovechar toda la energía producida por el aerogenerador.

Dar electricidad a otras empresas

La electricidad sobrante se puede vender a otra empresa que pueda necesitar energía de bajo coste sin importarle el momento concreto en el que esta energía le será suministrada.

Emplear la electricidad para elevar agua

La electricidad sobrante se puede emplear para elevar agua que se encuentra en un depósito a poca altura hasta uno que se encuentra a más altura, ya que la elevación de agua no se requiere ser realizada en un momento concreto.

Perder la electricidad

La última opción consiste en simplemente perder la energía que no se consume, y cuando el aerogenerador no produzca suficiente electricidad como para hacer funcionar la planta desaladora esta permanecerá parada y no habrá producción de agua.

Por lo general, para plantas de pequeño y mediano tamaño, como lo es la que se estudia en este proyecto, se recomienda un almacenamiento de agua y/o energía para superar la variabilidad del recurso energético.

Se contempla a esta como una posible opción, ya que el agua será llevada hasta un depósito, para que en el caso de que la planta se detenga por falta de energía eólica o para realizar algún tipo de mantenimiento o reparación siga habiendo disponibilidad de agua para abastecer el consumo de la población.

Resultados

A continuación se explicará la solución final a la que se ha llegado para la planta desaladora alimentada por energía eólica, cuya producción de agua potable será de 4800 m³/día.

Sistema de ósmosis inversa

Ubicación y finalidad de la planta

La planta desaladora alimentada por energía eólica será de pequeño tamaño y producirá 4800 m³/día de agua potable.

Esta planta se ubicará en el municipio de Santa Lucía de Tirajana, en el sureste de la isla de Gran Canaria. El agua producida será empleada para abastecer parte del consumo de la población de Vecindario, ciudad que se encuentra en continuo crecimiento.

Sistema de captación

Como sistema de captación se han seleccionado la captación cerrada mediante dos pozos de 10m de profundidad en los que se filtrará el agua de mar. En cada uno de estos pozos se encontrará una bomba sumergible de Sulzer.

Bombas de captación

Para elevar el agua desde los pozos de captación se usará en cada pozo una bomba SJT-20DLC del fabricante Sulzer.

Estudio de un sistema de desalación y de producción de hidrógeno alimentado mediante energías renovables

Pretratamiento

Aunque en este proyecto no se haya tocado en profundidad el pretratamiento del agua, a continuación se expone una solución general.

Pretratamiento físico

Dentro del pretratamiento físico del agua se han de incluir filtros de arena y de cartucho para para retener elementos físicos contaminantes del agua, que pueden llevar a la obstrucción de las membranas.

Pretratamiento químico

Dentro del pretratamiento químico cabe destacar que es necesario reducir el pH del agua, mediante la adición de H_2SO_4 , a 5 y que además es necesario añadir anti incrustante para evitar la precipitación de ciertos elementos.

Núcleo de la desalación

En este apartado se exponen los resultados obtenidos para el núcleo del sistema de desalación de la EDAM.

Membranas para ósmosis inversa

Para la realización de la ósmosis inversa se ha seleccionado la membrana SW30HRLE-440i del fabricante DOW. En total se colocarán 80 recipientes de presión con 6 membranas dentro de cada uno.

Sistema de recuperación de energía

Para recuperar la energía del rechazo de salmuera se emplearán 6 intercambiadores de presión PX-Q300 del fabricante Energy Recovery.

Bombas

Las bombas seleccionadas para la EDAM son las siguientes.

Bomba de alta presión

Para elevar la presión del agua de mar para que pueda atravesar las membranas y se realice la ósmosis inversa se usará una bomba MBN100-300 del fabricante Sulzer.

Bomba booster

Como bomba booster, para elevar la presión del agua que ha pasado por el intercambiador de presión, se usará una bomba Mega CPK del fabricante KSB.

Postratamiento

Una vez se hayan eliminado las sales del agua, esta tendrá que ser sometida a un postratamiento para volver a elevar su pH hasta un valor entre 6,5 y 9,5.

Distribución del agua

El agua lista para el consumo humano se llevará a un depósito que se encuentra a aproximadamente 7,25 km mediante una bomba ZE 200-250 de Sulzer.

Rechazo de salmuera

La salmuera se llevara con una tubería de 1,80 km directamente al mar hasta una profundidad de 25 m. La salmuera se desplazará sola hasta el mar por la fuerza de la gravedad.

Aerogenerador

Para abastecer el consumo energético de la planta desaladora se colocará junto a ella un aerogenerador FL 1500 – 77 m rotor de Fuhrländer, que tendrá una producción anual de 6.652.827,2 kWh.

Conclusiones

Con la realización de este proyecto se ha podido reflejar lo aprendido en el Grado de Ingeniería Mecánica, más concretamente en la asignatura de Ingeniería Fluidomecánica, en la que se ha aprendido a calcular entre otras cosas las pérdidas de carga en tuberías y accesorios, la asignatura de Instalaciones y Máquinas hidráulicas, en la que se han estudiado tanto las bombas de agua, como la ósmosis inversa y la energía eólica, y la asignatura de Oficina Técnica y Proyectos, en la que se ha estudiado la estructura de un proyecto técnico y las componentes que ha de llevar, además de las normas que ha de cumplir.

Además con la redacción de este proyecto se ha podido experimentar de forma más cercana a que equivale la realización de un proyecto técnico real a nivel profesional, ya que durante la redacción se ha tenido que investigar sobre diferentes técnicas de desalación, captación de agua, se han buscado posibles emplazamientos, se ha manejado la legislatura correspondiente, etc.

Concretamente con la realización de este proyecto se han estudiado la importancia tanto de la generación de agua como del uso de energías renovables para ello, ya que a medida que aumenta la población también aumenta la demanda de agua, y esta no podrá ser abastecida únicamente con aguas superficiales y subterráneas. Además es importante que la sociedad comience a aprovechar los recursos energéticos no contaminantes que ofrece la naturaleza no solo para reducir su contaminación sino también para reducir los costes que supone la dependencia de recursos cada vez más escasos como el petróleo.

En conclusión, mediante proyectos como este se puede producir un recurso tan esencial como lo es el agua sin contaminar el medio ambiente como ocurre cuando se recurre al uso de energías producidas mediante combustibles fósiles, algo que sigue siendo demasiado frecuente hoy en día.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

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

Autor: Leona Grimm

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Índice

DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA	9
Cálculos relativos a la elección de membranas.....	11
Software	11
Datos a introducir.....	11
Composición del agua de mar y pH.....	11
Temperatura.....	12
Introducción de los datos.....	12
Elección y dimensionado del intercambiador de presión	19
Elección y dimensionado de las tuberías	20
Elección del diámetro.....	21
Elección de la longitud	22
Cálculo de las pérdidas de carga	25
En las tuberías	25
Desde el pozo hasta la bomba de alta presión	27
Desde la planta desaladora hasta el mar	29
En los accesorios	29
Desde el pozo hasta la bomba de alta presión	30
Desde la planta desaladora hasta el depósito de agua.....	30
Desde la planta desaladora hasta el mar	30
Todas las pérdidas.....	30
Elección de bombas.....	31
Bomba de captación.....	31
Bomba de alta presión	35
Bomba booster	38
Bomba de distribución	42
Bomba rechazo.....	46
Bombas seleccionadas	46
Pretratamiento.....	46
Pretratamiento físico.....	47
Pretratamiento químico	47
Postratamiento	47
Distribución de los componentes.....	48
Consumo energético de la planta desaladora.....	48

DIMENSIONADO DEL AEROGENERADOR	50
Elección del aerogenerador	52
Orientación del aerogenerador.....	52
Elección del aerogenerador	54
Balance energético.....	58
USO DE LA ENERGÍA PRODUCIDA SOBRANTE	60
Producción de hidrógeno	62
Electrolizador	62
Pila de combustión.....	63

Índice de figuras

Figura 1. Primera página del software ROSA9.	12
Figura 2. Segunda página del software ROSA9.	13
Figura 3. Tercera página del software ROSA9.	14
Figura 4. Cuarta página del software ROSA9.	15
Figura 5. Ventana emergente para el cálculo del flujo.	16
Figura 6. Detalles del sistema obtenidos por ROSA9.	17
Figura 7. Detalles de las corrientes obtenidos por ROSA9.	17
Figura 8. Advertencias y detalles de las etapas obtenidos por ROSA9.	18
Figura 9. Cálculos de las precipitaciones obtenidos por ROSA9.	18
Figura 10. Excel para el cálculo del intercambiador de presión con datos sustituidos.	19
Figura 11. Resultados dados por el Excel.	20
Figura 12. Intercambiador de presión PX de Energy Recovery. Fuente: Energy Recovery.	20
Figura 13. Distancia desde la EDAM hasta el mar. Fuente: GoolZoom.	22
Figura 14. Ubicación aproximada de la EDAM y los pozos (no está a escala).	23
Figura 15. Mapa de abastecimiento del plan hidrológico de la demarcación hidrográfica de Gran Canaria. Fuente: Gobierno de Canarias.	24
Figura 16. Distancia entre EDAM y depósito. Fuente: Goolzoom.	24
Figura 17. Distancia entre EDAM e isóbata (-25m). Fuente: Arcgis.	25
Figura 18. Bomba SJT de Sulzer. Fuente: Sulzer.	32
Figura 19. Curvas características bomba de captación de Lowara.	33
Figura 20. Curvas características de bomba de captación de KSB.	34
Figura 21. Curvas características de bomba de captación de Sulzer.	35
Figura 22. Bomba MBN de Sulzer. Fuente: Sulzer.	36
Figura 23. Curvas características de bomba de alta presión de Lowara.	37
Figura 24. Curvas características de bomba de alta presión de Sulzer.	38
Figura 25. Bomba Mega CPK de KSB. Fuente: KSB.	39
Figura 26. Curvas características de bomba booster de Lowara.	40
Figura 27. Curvas características de bomba booster de KSB.	41
Figura 28. Curvas características de bomba booster de Sulzer.	42
Figura 29. Bomba ZE de Sulzer. Fuente: Sulzer.	43
Figura 30. Curvas características de la bomba de distribución de Lowara.	44
Figura 31. Curvas características de la bomba de distribución de KSB.	45
Figura 32. Curvas características de la bomba de distribución de Sulzer.	46
Figura 33. Distribución de las componentes del sistema de desalación.	48
Figura 34. Punto de medición de viento más cercano a la EDAM. Fuente: IDAE.	52
Figura 35. Rosa de los vientos de frecuencias.	53
Figura 36. Rosa de los vientos de velocidades.	54
Figura 37. Gráfica de la probabilidad de velocidad de viento frente a la velocidad de viento.	56
Figura 38. Coordenadas del emplazamiento de la EDAM. Fuente: Pixelis Maps.	56
Figura 39. Aerogenerador 1500 de Fuhrländer. Fuente: Fuhrländer.	58
Figura 40. Electrolizador EV 50/59 de Wasserelektrolyse Hydrotechnik. Fuente: Wasserelektrolyse Hydrotechnik.	62

Índice de tablas

Tabla 1. Composición del agua de mar en las Islas Canarias.	11
Tabla 2. Temperaturas medias mensuales del agua de mar en Las Palmas de Gran Canaria. ...	12
Tabla 3. SDI y factor de flujo para diferentes tipos de agua y pretratamientos. Fuente: DOW .	13
Tabla 4. Datos necesarios para el cálculo del intercambiador de presión.....	19
Tabla 5. Diámetros nominales tuberías lisas PVC presión de Adequa.	21
Tabla 6. Caudales para cada tramo de tubería.	21
Tabla 7. Diámetros seleccionados.....	22
Tabla 8. Estadísticas de bajamares y pleamares observadas y astronómicas. Fuente: REDMAR (RED de MAREógrafos de Puertos del Estado).....	22
Tabla 9. Dimensiones de las tuberías.....	25
Tabla 10. Datos para cálculos.....	26
Tabla 11. Propiedades del tramo de tubería desde un pozo hasta la unión.	27
Tabla 12. Factores de fricción del tramo de tubería desde un pozo hasta la unión.....	27
Tabla 13. Propiedades del tramo de tubería desde la unión hasta la EDAM.....	27
Tabla 14. Factores de fricción del tramo de tubería desde la unión hasta la EDAM.	28
Tabla 15. Propiedades del tramo de tubería desde la EDAM hasta el depósito de agua.	28
Tabla 16. Factores de fricción del tramo de tubería desde la EDAM hasta el depósito de agua.	28
Tabla 17. Propiedades del tramo de tubería desde la EDAM hasta el mar.	29
Tabla 18. Factores de fricción del tramo de tubería desde la EDAM hasta el mar.....	29
Tabla 19. Propiedades en los codos.....	30
Tabla 20. Propiedades en los empalmes en T.	30
Tabla 21. Pérdidas de carga.	30
Tabla 22. Datos constantes.	31
Tabla 23. Datos para cálculo de la bomba de captación.....	31
Tabla 24. Posibles bombas de captación.	32
Tabla 25. Datos para cálculo de la bomba de alta presión.	35
Tabla 26. Posibles bombas de alta presión.	36
Tabla 27. Datos para cálculo de la bomba booster.....	38
Tabla 28. Posibles bombas booster.	39
Tabla 29. Datos para cálculo de la bomba de distribución.	42
Tabla 30. Posibles bombas de distribución.....	42
Tabla 31. Datos para cálculo de la bomba de rechazo.....	46
Tabla 32. Bombas seleccionadas.....	46
Tabla 33. Consumo energético de las bombas y de la planta completa.....	48
Tabla 34. Propiedades del viento en el punto de medición más cercano a la EDAM.....	53
Tabla 35. Valores medios del factor de forma y del factor de escala.	54
Tabla 36. Probabilidad de velocidad de viento para diversos intervalos.....	55
Tabla 37. Energía anual estimada producida por aerogeneradores ubicados en el lugar en que se colocará la EDAM.....	57
Tabla 38. Energía generada, consumida y sobrante para una hora, un día y un año.....	58
Tabla 39. Electrolizadores ofrecidos por Wasserelektrolyse Hydrotechnik.....	62
Tabla 40. Datos del electrolizador EV 50/59.	63

Tabla 41. Producción de hidrógeno. 63

ANEXO I

DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA

En este anexo se explicarán los cálculos realizados para el dimensionado del sistema de desalinización. Incluyendo los cálculos relativos a la selección de las membranas para la ósmosis inversa así como el dimensionado de las tuberías y bombas de agua más importantes y del sistema de recuperación de energía.

Cálculos relativos a la elección de membranas

En este apartado se realizarán los cálculos referentes a la elección de las membranas mediante las que se realizará la desalinización del agua de mar.

Software

Para elegir las membranas más apropiadas se emplea el software ROSA9 ofertado por la empresa DOW que entre otros productos también produce membranas para la ósmosis inversa. Con el software se calculan las presiones de entrada y salida necesarias para el caudal deseado, y se obtiene la composición que tendrá el agua desalada.

Datos a introducir

Los datos que el programa ROSA9 necesita para sus cálculos se indican a continuación.

Composición del agua de mar y pH

A continuación se indica la composición de una muestra de agua de mar tomada en Santa Cruz de Tenerife y analizada por el laboratorio Labqua. Esta composición es la que se ha utilizado para los cálculos aunque la planta desaladora vaya a estar ubicada en la isla de Gran Canaria, porque se ha supuesto que la composición no varía mucho entre las diferentes islas.

Potasio (K)	450,52 mg/l
Sodio (Na)	11.857,36 mg/l
Magnesio (Mg)	1.468,43 mg/l
Calcio (Ca)	430,54 mg/l
Estroncio (Sr)	9,99 mg/l
Bario (Ba)	0,02 mg/l
Carbonato (CO ₃)	26,03 mg/l
Bicarbonato (HCO ₃)	141,65 mg/l
Nitrato (NO ₃)	0,70 mg/l
Cloruro (Cl)	21.302,91 mg/l
Fluoruro (F)	0,86 mg/l
Sulfato (SO ₄)	3.151,39 mg/l
Sílice (SiO ₂)	1,10 mg/l
Boro (B)	4,42 mg/l
Dióxido de carbon (CO ₂)	0,48 mg/l
STD (Sólidos Totales Disueltos)	38.866,59 mg/l
pH	8,20

Tabla 1. Composición del agua de mar en las Islas Canarias.

Temperatura

Para los cálculos se ha empleado la temperatura media anual del agua de mar de 20,6 °C en Gran Canaria. Este valor se ha calculado con las temperaturas medias mensuales tomadas desde el año 2009 hasta el 2016.

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Media
Temperatura [°C]	19	19	18	19	20	21	21	22	23	23	22	20	20,6

Tabla 2. Temperaturas medias mensuales del agua de mar en Las Palmas de Gran Canaria.

Introducción de los datos

A continuación se explicará brevemente la introducción de los datos en el software ROSA9.

En la primera página del software se introduce información general sobre el proyecto, sobre el autor y las unidades en las que se trabajará.

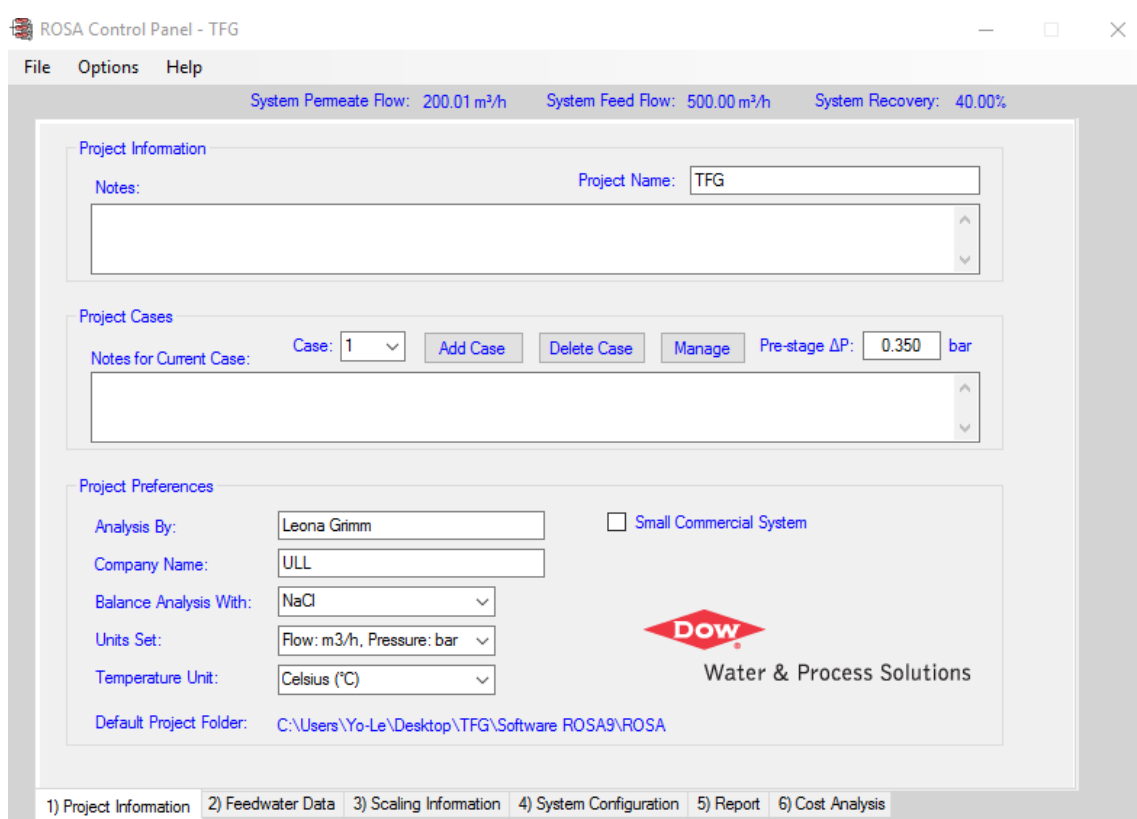


Figura 1. Primera página del software ROSA9.

En la siguiente página se indican el tipo de agua, que en este caso es marina con un índice de densidad de sedimentos (SDI) inferior a 3, y su composición. También se indican la temperatura, la cual es de 20,6 °C, y el pH del agua, que es de 8,2. También se puede indicar el caudal de alimentación, pero este se recalculará más adelante.

El valor del SDI se toma como inferior a tres, ya que es lo habitual para agua de mar captada en pozos, y también es el valor que indica el fabricante DOW en la tabla que se muestra a continuación.

Tipo de Agua de alimentación	Pretratamiento	SDI	Factor de Flujo
Permeado de OI	-		0.80
Salobre de superficie	Pretratamiento convencional	<5	0.65
	Pretratamiento de MF/UF	<3	0.70
Salobre de pozo	-	<3	0.75
Marina capturada mediante toma abierta en el mar	Pretratamiento convencional	<5	0.65
	Pretratamiento MF/UF	<3	0.70
Marina capturada mediante pozo en la playa	-	<3	0.70
Residual reutilizada	Pretratamiento convencional	<5	0.55
	Pretratamiento MF	<3	0.60
	Pretratamiento UF	<3	0.65

Tabla 3. SDI y factor de flujo para diferentes tipos de agua y pretratamientos. Fuente: DOW

ROSA Control Panel - TFG

System Permeate Flow: 200.01 m³/h System Feed Flow: 500.00 m³/h System Recovery: 40.00%

Water Type: Seawater with Generic membrane filtration, SDI < 3

Feed Percentage: 100.0 (%) Feed Number: 1 Feed Streams: 1

Ions	mg/l	ppm CaCO3	meq/l	Total Conc.(mg/l)
Ammonium (NH4+ + NH3)	0	0.000	0.000	0.00
Potassium (K)	450.516	576.077	11.522	450.52
Sodium (Na)	11857.25	25787.840	515.757	11857.25
Magnesium (Mg)	1468.421	6039.901	120.798	1468.42
Calcium (Ca)	430.537	1074.194	21.484	430.54
Strontium (Sr)	9.989	11.401	0.228	9.99
Barium (Ba)	0.02	0.015	0.000	0.020
Carbonate (CO3)	26.029	43.375	0.868	26.03
Bicarbonate (HCO3)	141.652	116.099	2.322	141.65
Nitrate (NO3)	0.701	0.565	0.011	0.70
Chloride (Cl)	21302.91	30043.880	600.878	21302.91
Fluoride (F)	0.861	2.266	0.045	0.86
Sulfate (SO4)	3151.389	3282.697	65.654	3151.39
Silica (SiO2)	1.099	n.a.	n.a.	1.10
Boron (B)	4.405	n.a.	n.a.	n.a.

System Temp: 20.6 °C System pH: 8.20

Charge Balance: Cations: 669.79, Anions: 669.84, Balance: -0.06

Note: Any changes in raw feedwater composition will affect scaling calculations. Please review scaling calculations.

1) Project Information 2) Feedwater Data 3) Scaling Information 4) System Configuration 5) Report 6) Cost Analysis

Figura 2. Segunda página del software ROSA9.

En la tercera página se indica que, añadiendo H₂SO₄, se modifica el pH del agua, dejándolo en 5. El programa también permite modificar la temperatura y la recuperación, pero estos se modificarán en la siguiente página.

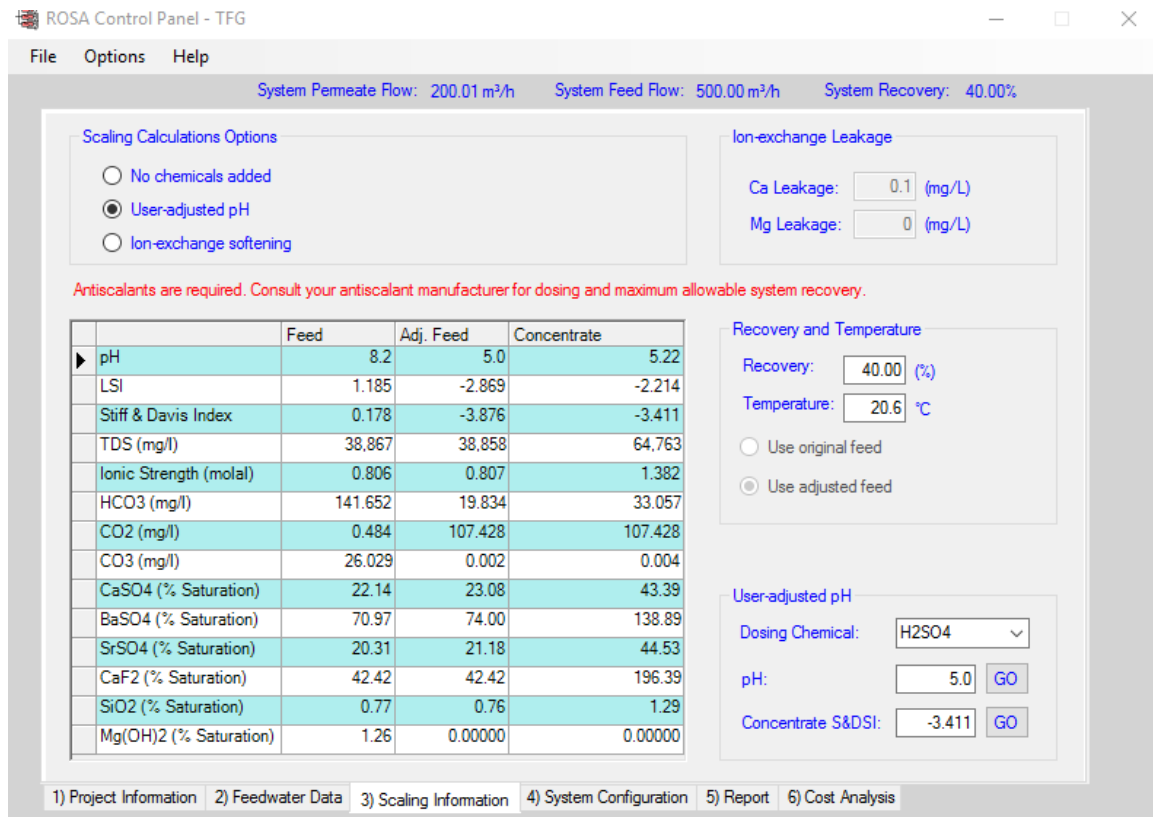


Figura 3. Tercera página del software ROSA9.

En la cuarta página del software se indica que el factor de flujo es 0,70, que la temperatura es 20,6 °C, que se supone una eficiencia de la bomba del 80,0 %, que se colocarán 80 recipientes de presión y 6 membranas dentro de cada recipiente de presión y que la membrana que se selecciona es la SW30HRLE-440i.

La selección de la membrana se ha estudiado en el apartado análisis de soluciones. El valor del factor de flujo de 0,70 se ha seleccionado a partir de la tabla 3 que da el fabricante DOW especialmente para el diseño de membranas.

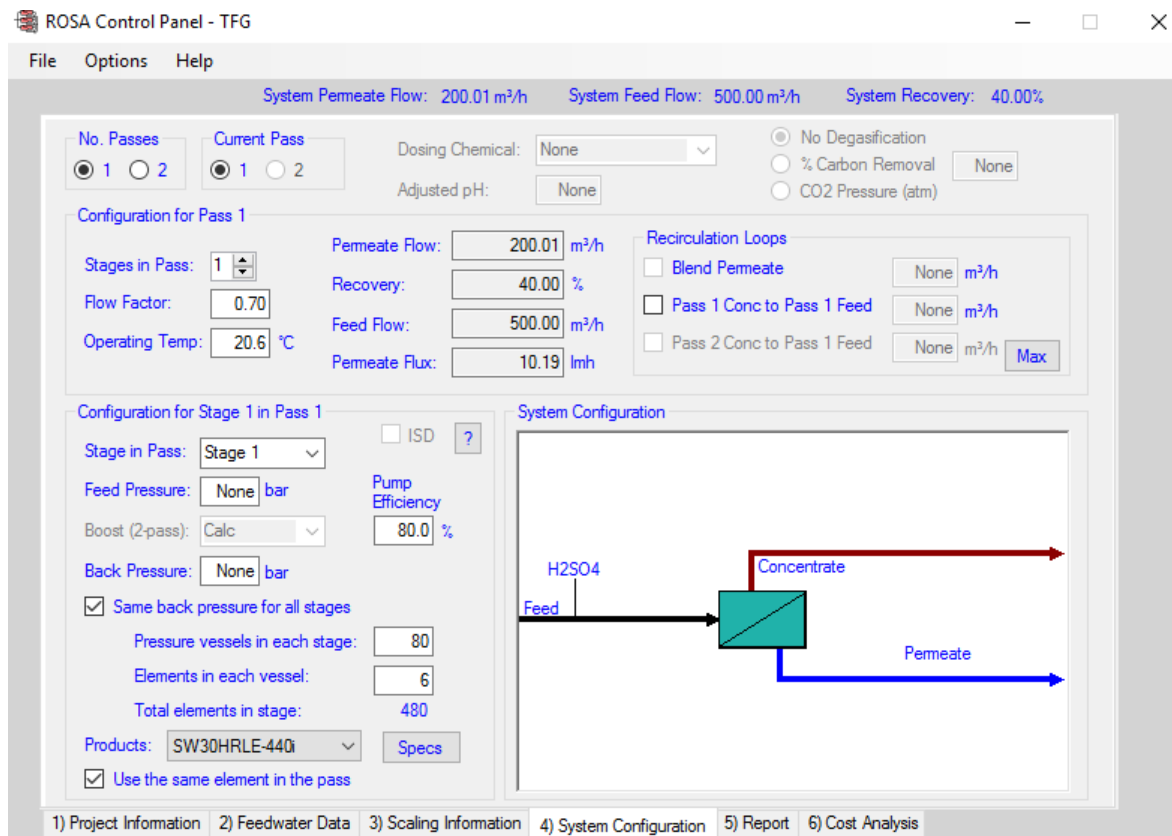


Figura 4. Cuarta página del software ROSA9.

En esta misma página, si se intenta modificar alguno de los caudales, se abre una ventana nueva en la que, fijando dos de los tres parámetros principales, que en este caso son un caudal de permeado de 200 m³/h y una conversión del 40,00 %, el programa calcula el tercer parámetro principal, que en este caso es el caudal de alimentación de 500 m³/h, y también el caudal de permeado que en este caso vale 10,19 l/m²h.

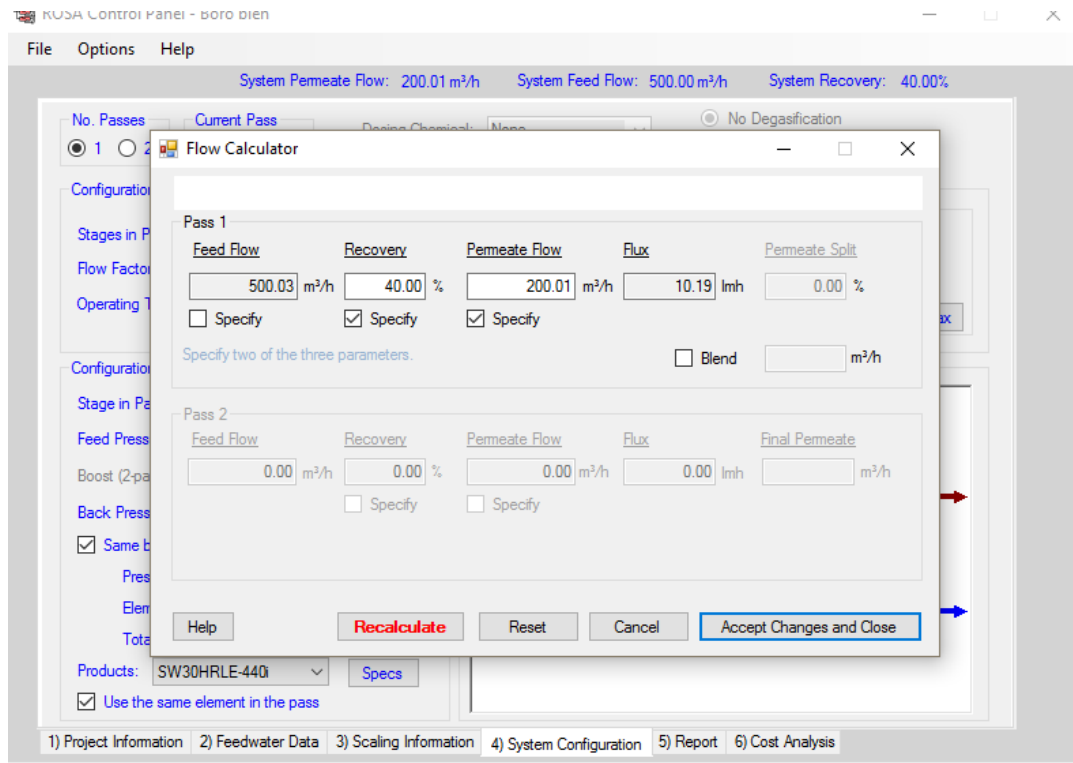


Figura 5. Ventana emergente para el cálculo del flujo.

A continuación se obtienen tanto los resultados en una ventana dentro del propio programa como en un PDF aparte. El contenido de este PDF se muestra a continuación ya que en él los datos están organizados de forma más clara que en la propia página del programa.

Reverse Osmosis System Analysis para Membranas FILMTEC™				ROSA 9.1 ConfigDB u399339_282			
Proyecto:TFG				Caso:1			
Leona Grimm, ULL				1/25/2017			
Información del Proyecto:							
Detalles del Sistema							
Caudal de Alimentación a la 1ª Etapa	500.00 m³/h	Caudal de Permeado Paso 1	200.01 m³/h	Presión Osmótica:			
Caudal de Agua Bruta al Sistema	500.00 m³/h	Conversión Paso 1	40.00 %	Alimentación	26.95 bar		
Presión de Alimentación	54.25 bar	Temperatura de Alimentación	20.6 C	Concentrado	45.99 bar		
Factor de flujo	0.70	STD Alimentación	38860.02 mg/l	Media	36.47 bar		
Dosificación Química (100%H2SO4)	140.92 mg/l	Número de Elementos	480	NDP media	17.23 bar		
Área Activa Total	19620.48 m²	Flujo específico medio Paso 1	10.19 l/mh	Potencia	942.02 kW		
Clasificación del Agua:Seawater with Generic membrane filtration, SDI < 3				Energía Específica	4.71 kWh/m³		

Etapa	Elemento	Nº Cajas de Elementos presión	Nº Elementos	Caudal de Alimentación (m³/h)	Presión de Alimentación (bar)	Caudal de Recirculación (m³/h)	Caudal de concentrado (m³/h)	Presión del concentrado (bar)	Caudal de Permeado (m³/h)	Flujo específico medio (l/mh)	Presión de Permeado (bar)	Presión de Booster (bar)	STD Permeado (mg/l)
1	SW30HRLE-440i	80	6	500.00	53.90	0.00	299.99	53.18	200.01	10.19	0.00	0.00	201.18

Figura 6. Detalles del sistema obtenidos por ROSA9.

Corrientes Paso (mg/l como ión)						
Nombre	Alimentación	Alimentación ajustada	Concentrado		Permeado	
			Etapa 1	Etapa 1	Permeado Total	
NH4+ + NH3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
K	450.52	450.52	748.82	3.07	3.07	
Na	11857.25	11858.54	19717.73	70.26	70.26	
Mg	1468.42	1468.42	2446.14	1.90	1.90	
Ca	430.54	430.54	717.21	0.55	0.55	
Sr	9.99	9.99	16.64	0.01	0.01	
Ba	0.02	0.02	0.03	0.00	0.00	
CO3	26.03	0.00	0.01	0.00	0.00	
HCO3	141.65	19.83	32.60	1.90	1.90	
NO3	0.70	0.70	1.14	0.04	0.04	
Cl	21302.91	21304.88	35431.24	116.26	116.26	
F	0.86	0.86	1.43	0.01	0.01	
SO4	3151.39	3289.43	5481.31	1.76	1.76	
SiO2	1.10	1.10	1.82	0.01	0.01	
Boro	4.42	4.41	6.71	0.95	0.95	
CO2	0.48	107.41	107.62	106.22	106.20	
STD	38866.59	38860.02	64634.51	201.18	201.18	
pH	8.20	5.00	5.27	4.43	4.43	

Figura 7. Detalles de las corrientes obtenidos por ROSA9.

Advertencias de Diseño								
-Ninguno-								
Advertencias de Solubilidad								
BaSO4(% Saturación) > 100%								
CaF2(% Saturación) > 100%								
Se puede requerir anti-incrustantes. Consulte con su fabricante para la dosificación y máxima conversión permitida.								
Detalles Etapa								
Etapa	Elemento	Conversión	Caudal de Permeado (m³/h)	STD Permeado (mg/l)	Caudal de Alimentación (m³/h)	STD Alimentación (mg/l)	Presión de Alimentación (bar)	
1		0.11	0.68	102.51	6.25	38860.02	53.90	
2		0.10	0.56	135.46	5.57	43590.09	53.74	
3		0.09	0.45	182.70	5.01	48466.99	53.60	
4		0.08	0.35	250.80	4.56	53232.39	53.47	
5		0.06	0.26	348.75	4.21	57625.78	53.36	
6		0.05	0.20	487.89	3.95	61454.29	53.27	

Figura 8. Advertencias y detalles de las etapas obtenidos por ROSA9.

Cálculo de Precipitaciones			
	Agua Bruta	Alimentación ajustada	Concentrado
pH	8.20	5.00	5.27
Índice de Saturación Langelier	1.19	-2.87	-2.17
Índice de estabilidad Stiff & Davis	0.18	-3.88	-3.37
Fuerza Iónica (Molal)	0.81	0.81	1.38
STD (mg/l)	38866.59	38860.02	64634.51
HCO3	141.65	19.83	32.60
CO2	0.48	107.40	107.60
CO3	26.03	0.00	0.01
CaSO4 (% Saturación)	22.14	23.08	43.42
BaSO4 (% Saturación)	70.97	74.00	138.95
SrSO4 (% Saturación)	20.31	21.18	44.52
CaF2 (% Saturación)	42.42	42.42	195.10
SiO2 (% Saturación)	0.77	0.76	1.29
Mg(OH)2 (% Saturación)	1.26	0.00	0.00

Para hacer el balance: 1.29 mg/l Naañadido a la alimentación

Figura 9. Cálculos de las precipitaciones obtenidos por ROSA9.

Se obtiene que la presión de alimentación ha de ser de 54,25 bar, y que la de salida del concentrado será de 53,18 bar. Con estos datos a continuación se elegirá el intercambiador de presión.

Elección y dimensionado del intercambiador de presión

Para elegir el intercambiador de presión que se utilizará en esta planta desaladora se ha hecho uso de un Excel cedido por la empresa Energy Recovery.

El caudal de agua de mar que pasa por el intercambiador de presión es igual al caudal del rechazo, es decir 300 m³/h.

Los datos a introducir en el Excel son los siguientes.

HPP feed (entrada bomba alta presión)	TDS	38866,59
	Presión	2,0 bar
LP in (entrada baja presión)	Presión	2,0 bar
Salida bomba alta presión	Temperatura	21 °C
	Nº trains	1
	Unidades	Métrico
Membran feed (alimentación membrana)	Presión	54,25 bar
Permeate (permeado)	TDS	201,18
	Presión	0 bar
	Caudal	200,0 m ³ /h
HP in (entrada alta presión)	Presión	53,18
Intercambiador de presión	Lead flow	0%
	Nº elementos	6

Tabla 4. Datos necesarios para el cálculo del intercambiador de presión.

Estos datos se introducen en los cuadros en rojo que se encuentran en el esquema que se muestra a continuación. En los cuadros en amarillo se muestran los datos que calcula el excel que se obtienen para el caso que se esta estudiando.

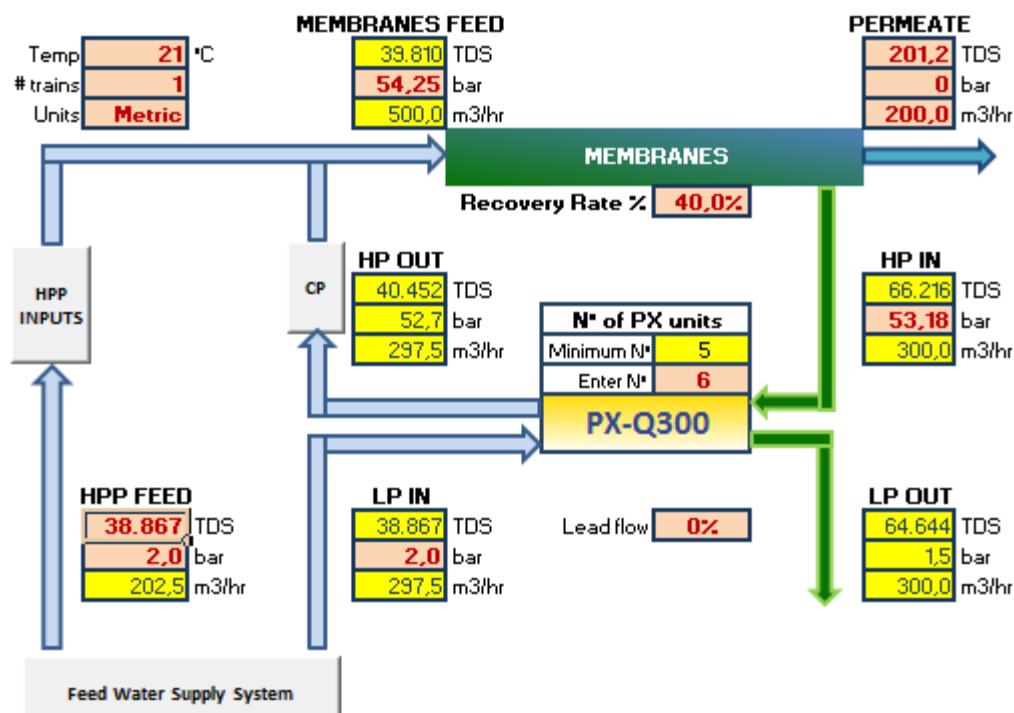


Figura 10. Excel para el cálculo del intercambiador de presión con datos sustituidos.

Bajo este esquema el Excel muestra un cuadro con los resultados.

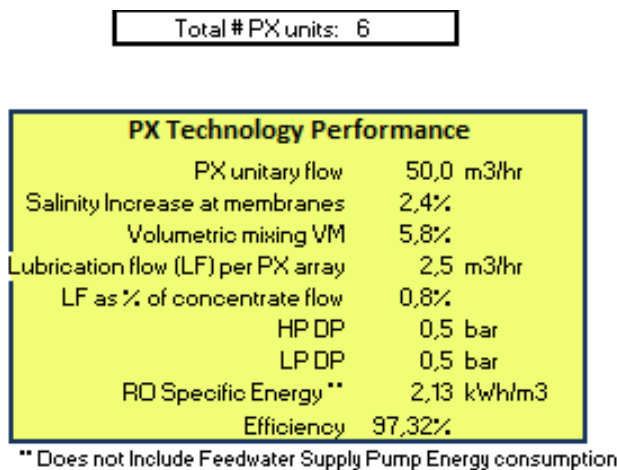


Figura 11. Resultados dados por el Excel.

Del Excel se obtiene que el número mínimo de intercambiadores de presión es 5, y que recomienda el modelo PX-Q300, pero se aumenta el número a 6, ya que así aumenta la eficiencia, y aunque la compra de un intercambiador más implique un coste inicial mayor, con el paso del tiempo se recuperará esta inversión por el ahorro energético en la bomba booster.



Figura 12. Intercambiador de presión PX de Energy Recovery. Fuente: Energy Recovery

Elección y dimensionado de las tuberías

Para la elección de las tuberías se ha hecho uso de la herramienta de búsqueda ofrecida por el Grupo sectorial de Tuberías Plásticas Ase TUB y se ha llegado a la conclusión de que las tuberías más apropiadas para esta instalación son las tuberías lisas PVC presión ofrecidas por Adequa. El fabricante indica que estas tuberías son aptas para aplicaciones en industria, saneamiento con presión, conducción y distribución de agua, que presentan estanqueidad absoluta en presión y depresión y que la superficie interna totalmente lisa evita incrustaciones

y reduce las pérdidas de carga, por lo que se decidirse que son apropiadas para su uso en este proyecto. Las tuberías que se han dimensionado son las de los tramos de tubería más significantes, es decir, entre los pozos y la bomba de alta presión, entre la planta desaladora y el depósito al que será llevado el agua, y entre la planta y el punto en el mar al que se llevará la salmuera.

Elección del diámetro

Las dimensiones de las tuberías de PVC de Adequa se muestran en la siguiente tabla:

LONG. TOT. (m)	PN6		PN10		PN16	
	DN (mm)	Espesor (mm)	DN (mm)	Espesor (mm)	DN (mm)	Espesor (mm)
6	63	2,0	63	3,0	63	4,7
6	75	2,3	75	3,6	75	5,6
6	90	2,8	90	4,3	90	6,7
6	110	2,7	110	4,2	110	6,6
6	125	3,1	125	4,8	125	7,4
6	140	3,5	140	5,4	140	8,3
6	160	4,0	160	6,2	160	9,5
6	180	4,4	180	6,9	180	10,7
6	200	4,9	200	7,7	200	11,9
6	250	6,2	250	9,6	250	14,8
6	315	7,7	315	12,1	315	18,7
6	400	9,8	400	15,3	400	23,7
6	500	12,3	500	19,1	500	29,7
6	630	15,4	630	24,1		

Tabla 5. Diámetros nominales tuberías lisas PVC presión de Adequa.

Para elegir el diámetro apropiado para cada tramo de tubería se hace uso del criterio de Bonet, que indica el diámetro mínimo para las tuberías en función del caudal que han de transportar.

$$D = 0,85 \cdot Q^{\frac{2}{5}}$$

Ecuación 1. Criterio de Bonet.

Los caudales que se han de transportar en las tuberías se indican en la siguiente tabla.

Tramo	Caudal (Q) [m ³ /h]
Pozo – Unión (cada tubería)	250
Unión - EDAM	500
EDAM - Depósito	200
EDAM – Isóbata (-25m)	300

Tabla 6. Caudales para cada tramo de tubería.

Mediante el criterio de Bonet se obtienen los siguientes diámetros mínimos y por lo tanto se usan las tuberías de los siguientes diámetros nominales.

Tramo	Pozo – Unión (cada tubería)	Unión - EDAM	EDAM - Depósito	EDAM – Isóbata (-25m)
Diámetro mínimo [mm]	287,3	379	262,8	309
Diámetro comercial seleccionado [mm]	315	400	315	315

Tabla 7. Diámetros seleccionados.

Elección de la longitud

Para conocer la longitud de las tuberías en la captación del agua se ha de conocer la profundidad de los pozos. Para elegir la profundidad que han de tener los pozos se han tenido en cuenta los siguientes parámetros:

- La altura máxima del terreno es de 0,1m.

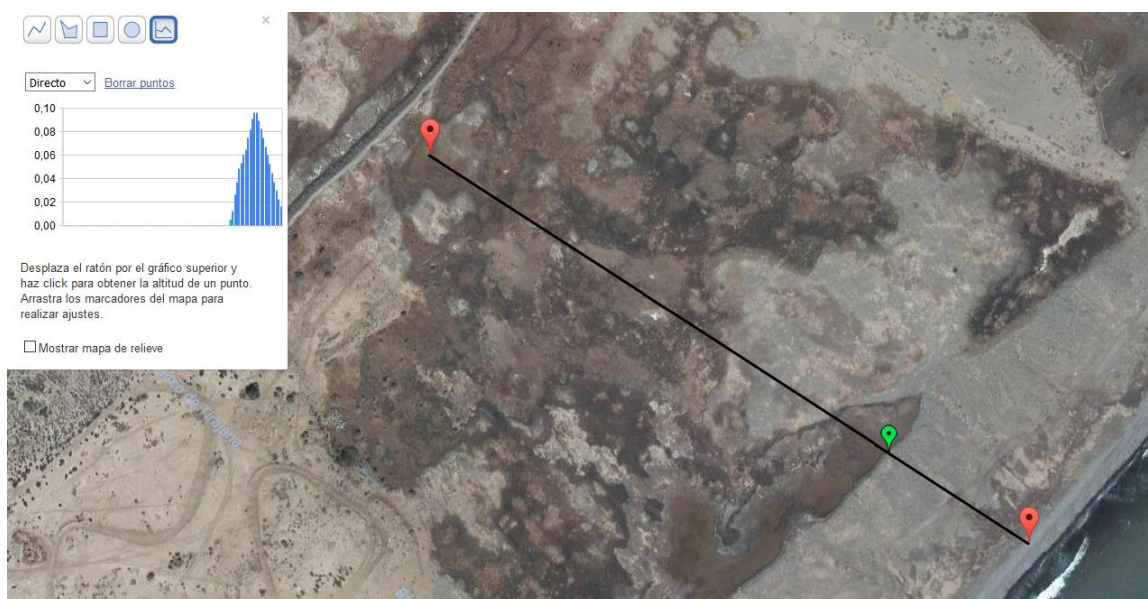


Figura 13. Distancia desde la EDAM hasta el mar. Fuente: GoolZoom

- La bajamar máxima es de 1,46 m.

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

Tabla 8. Estadísticas de bajamares y pleamares observadas y astronómicas. Fuente: REDMAR (RED de MAREógrafos de Puertos del Estado)

- Las pérdidas de altura por filtración se suponen en 1 m.
- La disminución de altura por el cono de succión se supone en 1 m.

Sumando todas estas pérdidas se obtiene una profundidad de 3,56 m. Para la profundidad de los pozos se redondea este valor hasta 10 m.

La distancia desde cada uno de los pozos y desde la planta al punto de unión es de 10m. Además los pozos tendrán una profundidad de 10 m, por lo que la longitud de cada tubería desde el pozo hasta el punto de unión será de 20 m.

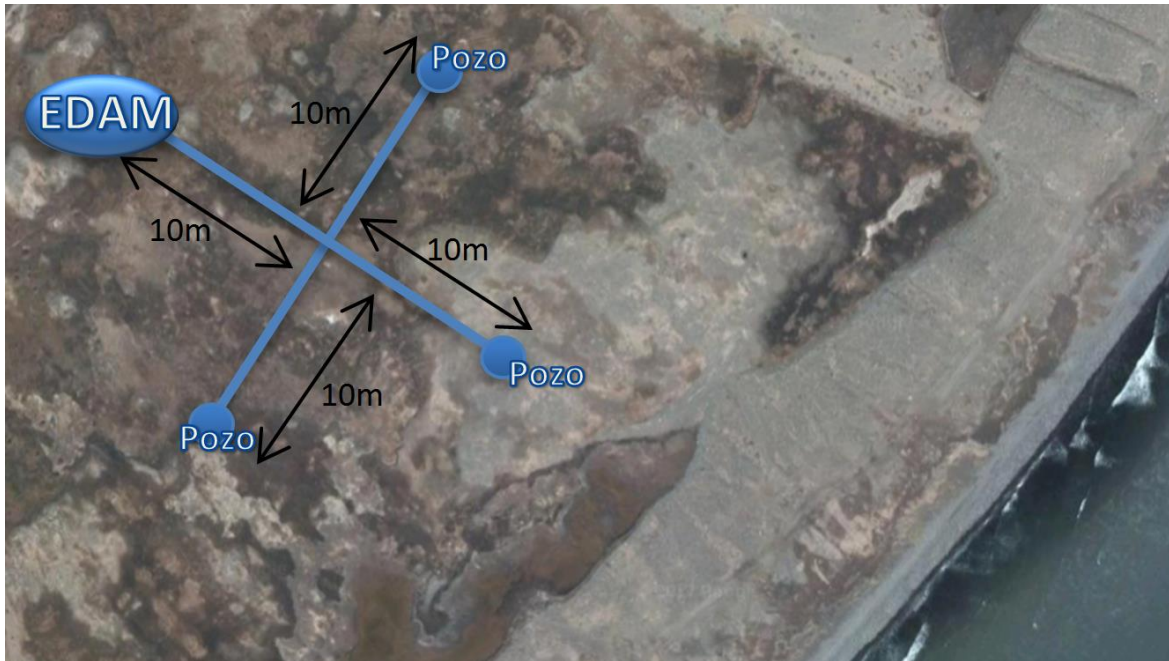


Figura 14. Ubicación aproximada de la EDAM y los pozos (no está a escala).

En el siguiente mapa se observa la ubicación de los depósitos de agua más cercanos y se ha marcado el depósito al que se ha decidido que se llevará el agua, ya que se encuentra cerca de la población y es el más cercano a la EDAM dentro del municipio de Santa Lucía.

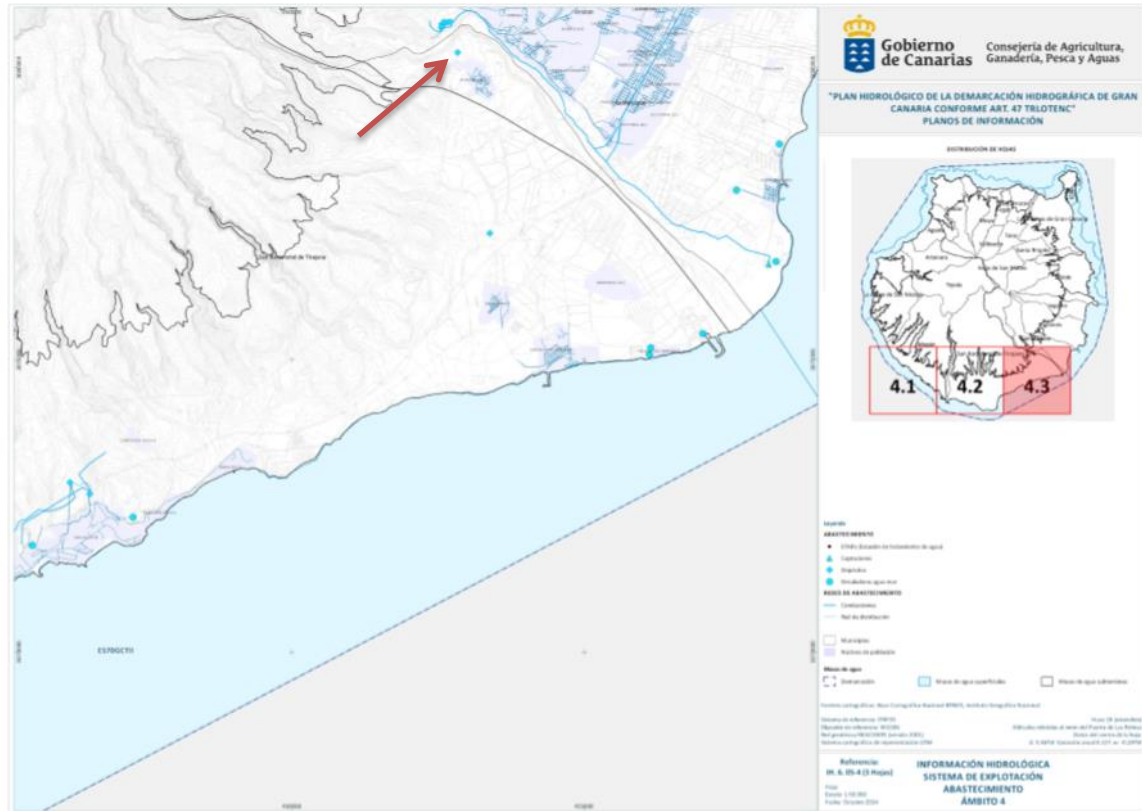


Figura 15. Mapa de abastecimiento del plan hidrológico de la demarcación hidrográfica de Gran Canaria. Fuente: Gobierno de Canarias.

Con ayuda de la herramienta online Goolzoom se ha determinado que la distancia entre la EDAM y el depósito es de aproximadamente 7,25 km. Se supondrá que la longitud de la tubería es igual a esta distancia para el cálculo de las pérdidas de carga.



Figura 16. Distancia entre EDAM y depósito. Fuente: Goolzoom

Para decidir que longitud tendrá que tener la tubería con que se llevará la salmuera hasta el mar se ha hecho uso de un mapa en el que se indican las isóbatas, y se ha medido la distancia desde la ubicación aproximada de la EDAM hasta la isóbata que indica que existe una profundidad de unos 25 m. Se supone que con esta profundidad la salmuera se disolverá fácilmente en el agua.

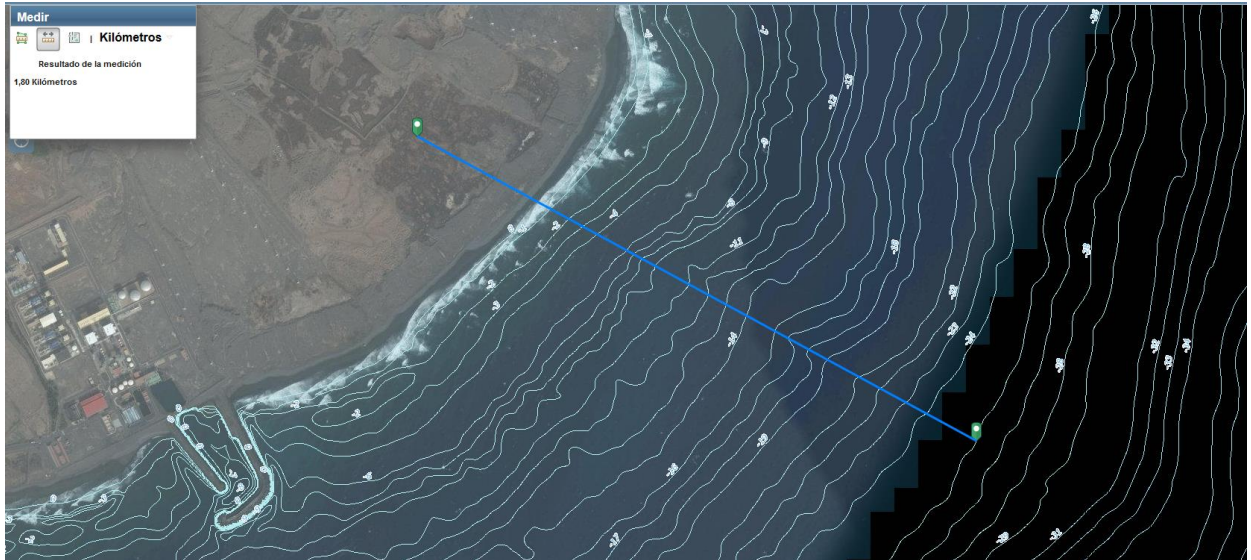


Figura 17. Distancia entre EDAM e isóbata (-25m). Fuente: Arcgis

Según la medida tomada la longitud de la tubería para el rechazo debe ser de 1,80 km.

Las dimensiones de las tuberías serán las siguientes:

Tramo	Diámetro	Longitud
Pozo - Unión	315mm	20m
Unión - EDAM	400mm	10m
EDAM - Depósito	315mm	7.250m
EDAM – Isóbata (-25m)	315mm	1.800m

Tabla 9. Dimensiones de las tuberías.

Cálculo de las pérdidas de carga

En las tuberías

Los cálculos de pérdidas de carga se han realizado para los tramos de tubería más significantes, es decir, entre los pozos y la bomba de alta presión, entre la planta desaladora y el depósito al que será llevado el agua, y entre la desaladora y el punto en el mar al que será llevado el rechazo. También se han calculado las pérdidas de carga en algunos accesorios.

Para calcular las pérdidas de carga por conducción en las tuberías se ha hecho uso de la ecuación de Darcy-Weissbach:

$$H_r = f \cdot \frac{8 \cdot L \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5}$$

Ecuación 2. Ecuación de Darcy-Weissbach .

Para poder calcular las pérdidas de carga mediante esta ecuación se han de conocer los siguientes parámetros:

- El factor de fricción (f).
- La longitud de la tubería (L).
- El caudal que circula por la tubería (Q).
- La aceleración de la gravedad (g).
- El diámetro de la tubería (D).

Para conocer el valor del factor de fricción se hará uso de la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{k/D}{3,71} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f_0}} \right)$$

Ecuación 3. Factor de fricción.

Para utilizar esta ecuación se han de conocer los siguientes parámetros:

- El valor de la rugosidad del material por el que está compuesta la tubería (k).
- El diámetro de la tubería (D).
- El número de Reynolds de la tubería (Re).
- El valor inicial en el que se supone el factor de fricción para comenzar las iteraciones (f_0).

El número de Reynolds se calcula con la siguiente ecuación:

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

Ecuación 4. Reynolds.

Para ello se han de sustituir los siguientes parámetros:

- El caudal que circula por la tubería (Q).
- El diámetro de la tubería (D).
- La viscosidad cinemática del fluido que circula por la tubería (ν).

Datos que se repiten para todos los cálculos de pérdidas de carga:

- La aceleración de la gravedad para los cálculos será siempre de 9,81 m/s².
- Las tuberías estarán todas formadas por PVC por lo que la rugosidad de todas ellas será de 0,007 mm.
- El valor inicial del factor de fricción para las iteraciones será 0,015.
- Como viscosidad del fluido se tomará la del agua a 20 °C, que es de 1,003·10⁻⁶ m²/s.

Gravedad (g) [m/s ²]	Rugosidad (k) [mm]	Factor de fricción inicial (f_0)	Viscosidad del fluido (ν) [m ² /s]
9,81	0,007	0,015	1,003·10 ⁻⁶

Tabla 10. Datos para cálculos.

Desde el pozo hasta la bomba de alta presión

Este tramo de tubería será dividido en dos partes para los cálculos, una primera parte que va desde cada uno de los pozos hasta el punto en que se unen las tuberías, y otra parte que va desde esta unión hasta la bomba de alta presión.

Desde el pozo hasta la unión

Datos del tramo de tubería desde el pozo hasta la unión de las tuberías:

Caudal (Q) [m ³ /s]	Diámetro (D) [mm]	Longitud (L) [m]
0,069	315	20

Tabla 11. Propiedades del tramo de tubería desde un pozo hasta la unión.

Para este tramo de tubería se ha obtenido que el número de Reynolds es igual a $2,8 \cdot 10^5$. Con este valor se realiza diez veces la iteración para obtener el factor de fricción de la tubería.

Nº de la iteración	f inicial	f final
1	0,015	0,01490403
2	0,01490403	0,01491329
3	0,01491329	0,0149124
4	0,0149124	0,01491248
5	0,01491248	0,01491248
6	0,01491248	0,01491248
7	0,01491248	0,01491248
8	0,01491248	0,01491248
9	0,01491248	0,01491248
10	0,01491248	0,01491248

Tabla 12. Factores de fricción del tramo de tubería desde un pozo hasta la unión.

Con el factor de fricción de 0,01491248 se obtiene que las pérdidas de carga en cada una de las tuberías que van desde un pozo hasta el punto en que las tuberías se unen son de 0,038 m.

Desde la unión a la EDAM

Datos del tramo de tubería desde la unión de las tuberías anteriores hasta la EDAM:

Caudal (Q) [m ³ /s]	Diámetro (D) [mm]	Longitud (L) [m]
0,139	400	10

Tabla 13. Propiedades del tramo de tubería desde la unión hasta la EDAM.

En este tramo de tubería el número de Reynolds vale $4,4 \cdot 10^5$. Los valores obtenidos para el factor de fricción para diez iteraciones han sido los siguientes:

Nº de la iteración	f inicial	f final
1	0,015	0,01362288
2	0,01362288	0,01374285
3	0,01374285	0,01373184
4	0,01373184	0,01373284
5	0,01373284	0,01373275
6	0,01373275	0,01373276
7	0,01373276	0,01373276
8	0,01373276	0,01373276
9	0,01373276	0,01373276
10	0,01373276	0,01373276

Tabla 14. Factores de fricción del tramo de tubería desde la unión hasta la EDAM.

Para un factor de fricción de 0,01373276 se obtiene que las pérdidas de carga son de 0,021 m.

Desde la planta desaladora hasta el depósito de agua

Datos del tramo de tubería desde la planta desaladora hasta el depósito de agua:

Caudal (Q) [m ³ /s]	Diámetro (D) [mm]	Longitud (L) [m]
0,056	315	7250

Tabla 15. Propiedades del tramo de tubería desde la EDAM hasta el depósito de agua.

Para este tramo de tubería se obtiene que el número de Reynolds es de $2,2 \cdot 10^5$. Los diferentes factores de fricción obtenidos para diez iteraciones son los siguientes:

Nº de la iteración	f inicial	f final
1	0,015	0,0155755
2	0,0155755	0,01551666
3	0,01551666	0,01552256
4	0,01552256	0,01552197
5	0,01552197	0,01552203
6	0,01552203	0,01552202
7	0,01552202	0,01552202
8	0,01552202	0,01552202
9	0,01552202	0,01552202
10	0,01552202	0,01552202

Tabla 16. Factores de fricción del tramo de tubería desde la EDAM hasta el depósito de agua.

Con el valor de 0,01552202 para el factor de fricción se obtiene que las pérdidas de carga en ese tramo de tubería son de 9,254 m.

Desde la planta desaladora hasta el mar

Datos del tramo de tubería:

Caudal (Q) [m ³ /s]	Diámetro (D) [mm]	Longitud (L) [m]
0,083	315	1800

Tabla 17. Propiedades del tramo de tubería desde la EDAM hasta el mar.

Para este tramo de tubería se obtiene que el número de Reynolds es de $3,3 \cdot 10^5$. Los diferentes factores de fricción obtenidos para diez iteraciones son los siguientes:

Nº de la iteración	f inicial	f final
1	0,015	0,01439587
2	0,01439587	0,01496356
3	0,01496356	0,01490754
4	0,01490754	0,01491295
5	0,01491295	0,01491243
6	0,01491243	0,01491248
7	0,01491248	0,01491248
8	0,01491248	0,01491248
9	0,01491248	0,01491248
10	0,01491248	0,01491248

Tabla 18. Factores de fricción del tramo de tubería desde la EDAM hasta el mar.

Con el valor de 0,01491248 para el factor de fricción se obtiene que las pérdidas de carga en ese tramo de tubería son de 4,966 m.

En los accesorios

Para calcular las pérdidas de carga en los accesorios se utiliza la siguiente ecuación:

$$H_r = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Ecuación 5. Pérdidas de carga en accesorios.

donde

- k es el coeficiente de pérdida del accesorio.
- v es la velocidad del fluido que circula por el accesorio.
- g es la aceleración de la gravedad, la cual es de $9,81 \text{ m/s}^2$.

La velocidad del fluido se calcula con la siguiente ecuación:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot D^2}$$

Ecuación 6. Velocidad del fluido.

donde

- El caudal que circula por el accesorio (Q).
- El diámetro del accesorio (D).

Desde el pozo hasta la bomba de alta presión

En este tramo se considera que en la salida de cada pozo hay un codo de 90°. Los datos para cada uno de estos codos serán los siguientes:

Coefficiente de pérdida (k)	Velocidad del fluido (v) [m ² /s]
0,9	0,891

Tabla 19. Propiedades en los codos.

De esto se obtiene que las pérdidas de carga en un codo son de 0,036 m.

Además se considera que la unión de las tuberías estará constituida por dos empalmes en T para los que se tienen los datos siguientes:

Coefficiente de pérdida (k)	Velocidad del fluido (v) [m ² /s]
0,1,8	1,105

Tabla 20. Propiedades en los empalmes en T.

Con estos datos se obtiene que las pérdidas de carga en cada empalme en T son de 0,112m.

Desde la planta desaladora hasta el depósito de agua

Como en el recorrido que hace la tubería desde la planta desaladora hasta el depósito es difícil saber que accesorios serán necesarios se suponen unas pérdidas de 1 m.

Desde la planta desaladora hasta el mar

En este tramo de tubería se desprecian las pérdidas de carga por accesorios.

Todas las pérdidas

Elemento		Pérdidas [m]	Nº de elementos	Pérdidas totales
Tuberías	Pozo - Unión	0,038	2	0,077
	Unión - EDAM	0,021	1	0,021
	EDAM - Depósito	8,187	1	8,187
	EDAM - mar	4,966	1	4,966
Accesorios	Codo de 90°	0,036	2	0,073
	Empalme en T	0,112	2	0,224

Tabla 21. Pérdidas de carga.

Elección de bombas

En este apartado se elegirán las bombas principales en función de su rendimiento. Las bombas de menor tamaño, como son las de pre y post tratamientos y para la limpieza de las membranas no se tendrán en cuenta ya que su consumo es mínimo.

Se han empleado programas online para la elección de las bombas de los fabricantes KSB, Sulzer y Lowara.

Para elegir las bombas primero se calcula la altura manométrica que ha de proporcionar cada una de ellas. Para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$H = \frac{P_s - P_e}{\rho \cdot g} + \frac{v_s^2 - v_e^2}{2 \cdot g} + z_B - z_A + H_{r,tuberías} + H_{r,accesorios}$$

Ecuación 7. Altura manométrica.

Los datos a sustituir en esta ecuación son:

- La presión del fluido a la salida de la tubería (P_s).
- La presión del fluido a la entrada de la bomba (P_e).
- La densidad del agua que circula por la bomba (ρ).
- La aceleración de la gravedad (g).
- La velocidad del fluido a la salida de la tubería (v_s).
- La velocidad del fluido a la entrada de la bomba (v_e).
- La cota a la salida de la tubería (z_B).
- La cota a la entrada de la bomba (z_A).
- Las pérdidas de carga en las tuberías ($H_{r,tuberías}$).
- Las pérdidas de carga en los accesorios ($H_{r,accesorios}$).

Datos que no varían para los cálculos:

Densidad del agua (ρ) [kg/m^3]	Gravedad (g) [m/s^2]
1.027,762	9,81

Tabla 22. Datos constantes.

Las velocidades de fluido se han eliminado en el cálculo, ya que v_s siempre será igual a v_e , por lo que la resta siempre dará 0.

Bomba de captación

Los datos necesarios para calcular la altura de esta bomba son los siguientes:

P_s [Pa]	P_e [Pa]	z_B [m]	z_A [m]	$H_{r,tuberías}$ [m]	$H_{r,accesorios}$ [m]
500.000	100.000	0	-10	0,060	0,261

Tabla 23. Datos para cálculo de la bomba de captación.

La presión P_s se obtiene de que a la entrada de la bomba de alta presión la presión ha de ser de 2bar y para el pretratamiento del agua, que se encuentra antes de la bomba de alta presión, se

suponen unas pérdidas de carga de 3bar. Sumando estas pérdidas y pasándolas a pascales se obtiene que $P_s=500.000$ Pa.

Como cota a la entrada se toman -10 m, porque las bombas sumergibles se encontrarán a una profundidad de 10 m bajo el suelo.

La altura obtenida para las bombas de captación es de 60,00 m.

Para la captación del agua desde pozos se usarán bombas sumergibles y se colocará una en cada pozo, teniendo en cuenta que una de ellas se utilizará únicamente en el caso de que una de las otras falle.

A continuación se han buscado las bombas más apropiadas de los fabricantes KSB, Sulzer y Lowara teniendo en cuenta que estas sean resistentes al agua salada y que puedan dar 60 m a un caudal de $250 \text{ m}^3/\text{h}$.

Fabricante	Modelo	Rendimiento [%]	Potencia [kW]	NPSH _r [m]
Lowara	TVS10.3-2 VV L8W5502D	81,2	50,7	7,33
KSB	Amarex KRT K	64,3	63,79	5,03
Sulzer	SJT-20DLC	82,81	49,38	1,16

Tabla 24. Posibles bombas de captación.

Se puede concluir que la bomba de mejor rendimiento y de menor consumo es la del fabricante Sulzer, por lo que se seleccionará esta bomba para la extracción de agua desde el pozo. Además se observa que la altura mínima de aspiración (NPSH_r) de ninguna de las bombas supera la altura a la entrada de las bombas la cual se estima en 10 m.

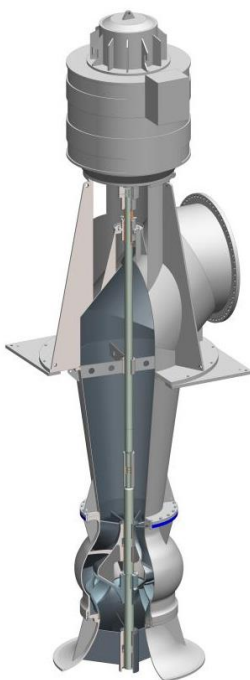


Figura 18. Bomba SJT de Sulzer. Fuente: Sulzer

A continuación se muestran las curvas características de las bombas.

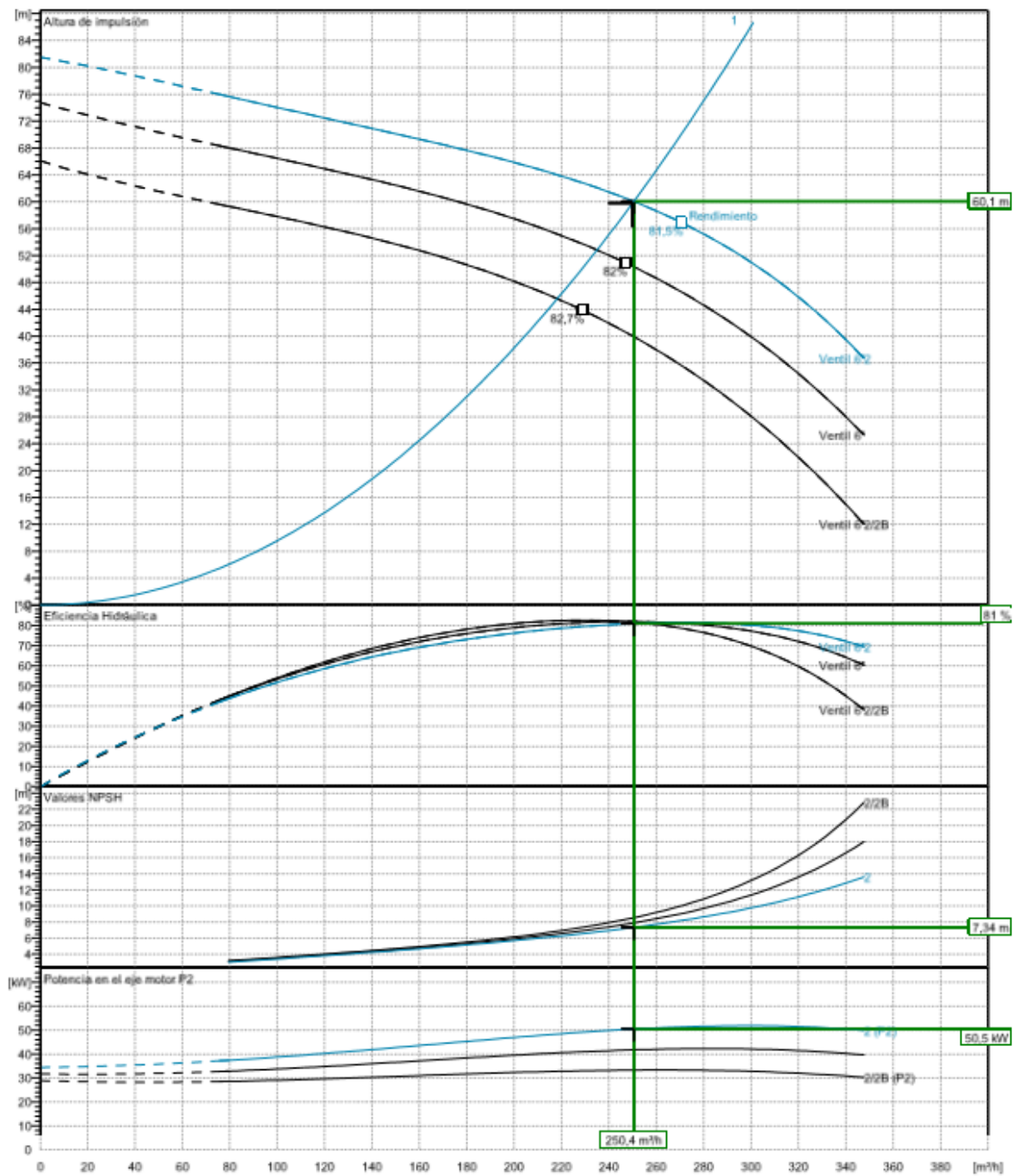


Figura 19. Curvas características bomba de captación de Lowara.

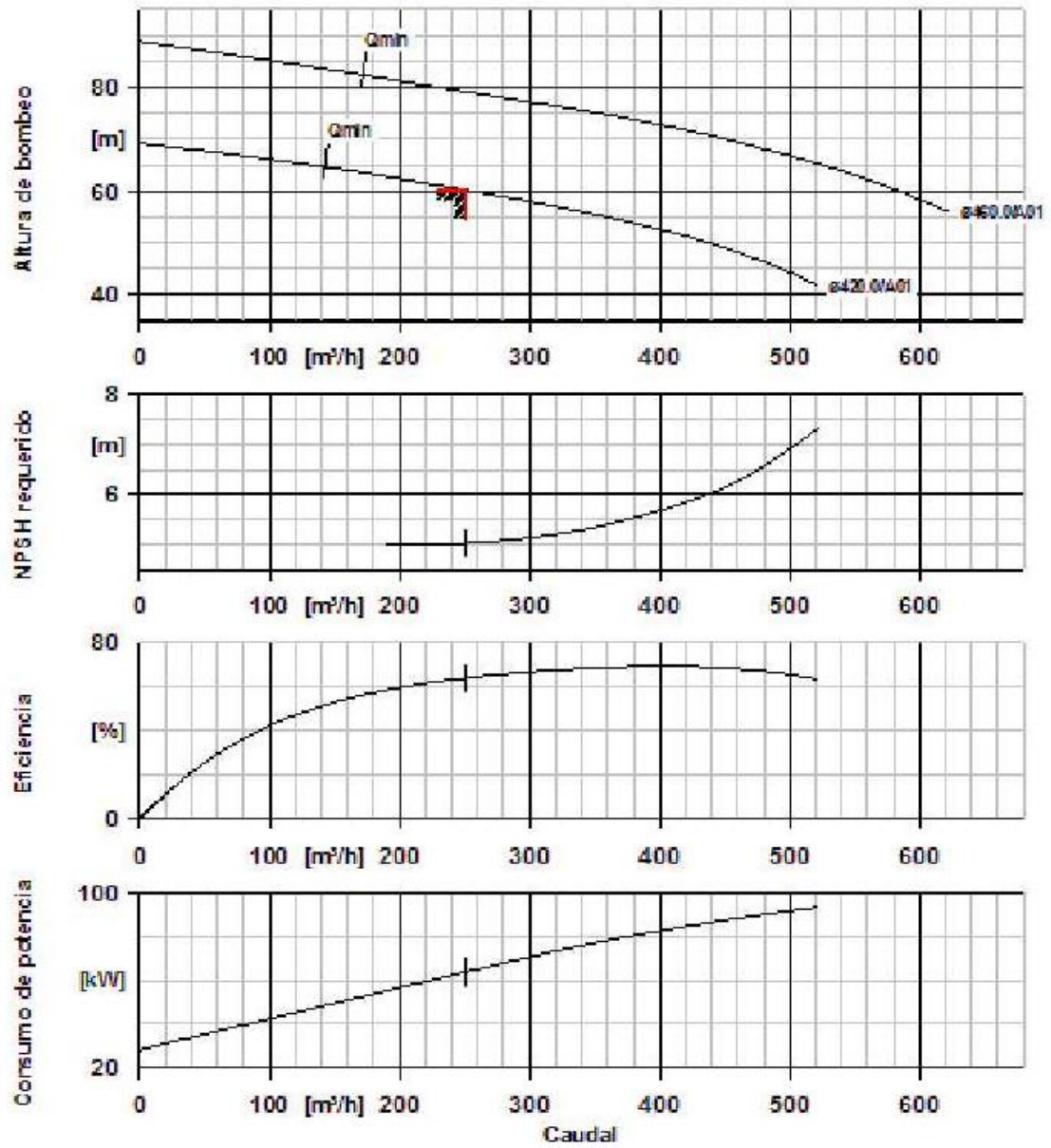


Figura 20. Curvas características de bomba de captación de KSB.

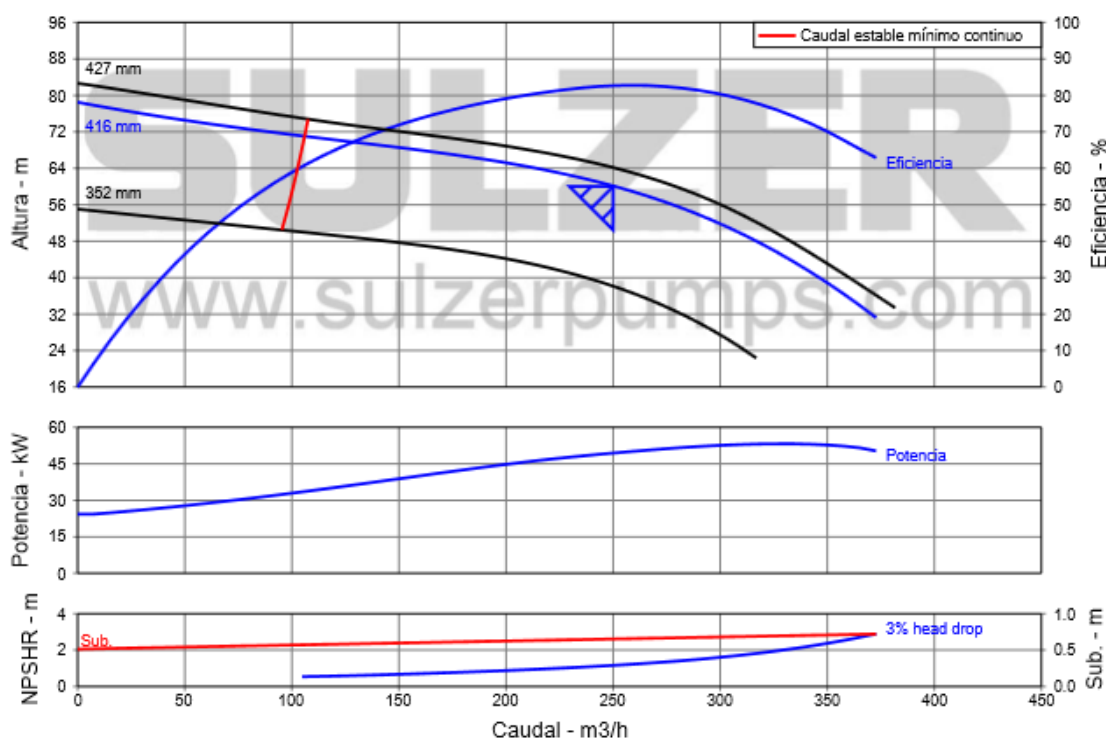


Figura 21. Curvas características de bomba de captación de Sulzer.

Bomba de alta presión

Los datos necesarios para calcular la altura de esta bomba son los siguientes:

P_s [Pa]	P_e [Pa]
5.425.000	200.000

Tabla 25. Datos para cálculo de la bomba de alta presión.

El valor de la presión a la salida de la bomba es el que ha calculado el software Rosa9 para la alimentación de las membranas. El valor de entrada de la presión es la salida de las bombas anteriores menos los 3bar que se supone que se pierden en el pretratamiento.

En este caso además no se tienen en cuenta la diferencia de cota ni las pérdidas por accesorios o tuberías.

Con estos datos se obtiene que la altura manométrica a que se debe elevar el agua en la bomba de alta presión es de 518,23 m.

Para la elevación de presión del agua se utilizará una bomba multietapa resistente al agua salada.

Buscando entre los fabricantes KSB, Sulzer y Lowara las bombas más apropiadas para trabajar con un caudal de 200 m³/h y elevar su altura manométrica a 518,23 m se han obtenido las tres siguientes:

Fabricante	Modelo	Rendimiento [%]	Potencia [kW]	NPSH _r [m]
KSB	Multitec CA	76,1	381,67	6,95
Sulzer	MBN100-300	76,87	367	4,73

Tabla 26. Posibles bombas de alta presión.

El fabricante Lowara indica que no ofrece ninguna bomba que cumpla los requisitos indicados. De las bombas que ofrecen los otros dos fabricantes se selecciona la MBN100-300 de Sulzer, ya que su rendimiento es ligeramente superior y su consumo energético es inferior al de la bomba ofrecida por KSB. Además se puede destacar que como a la entrada de la bomba hay 2 bar, equivalentes a unos 20 m, en ambas bombas se garantiza que no habrá cavitación.

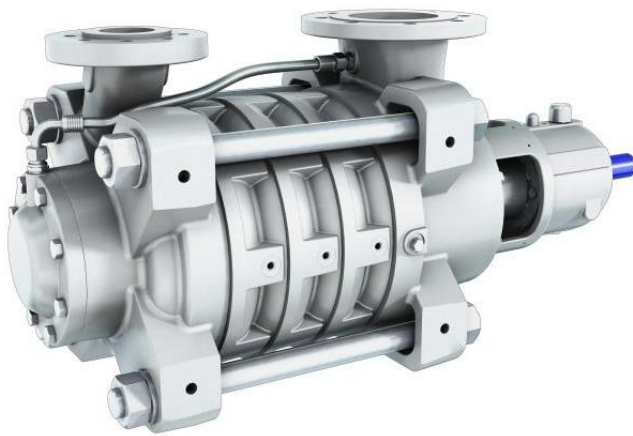


Figura 22. Bomba MBN de Sulzer. Fuente: Sulzer

A continuación se muestran las curvas de operación de las bombas.

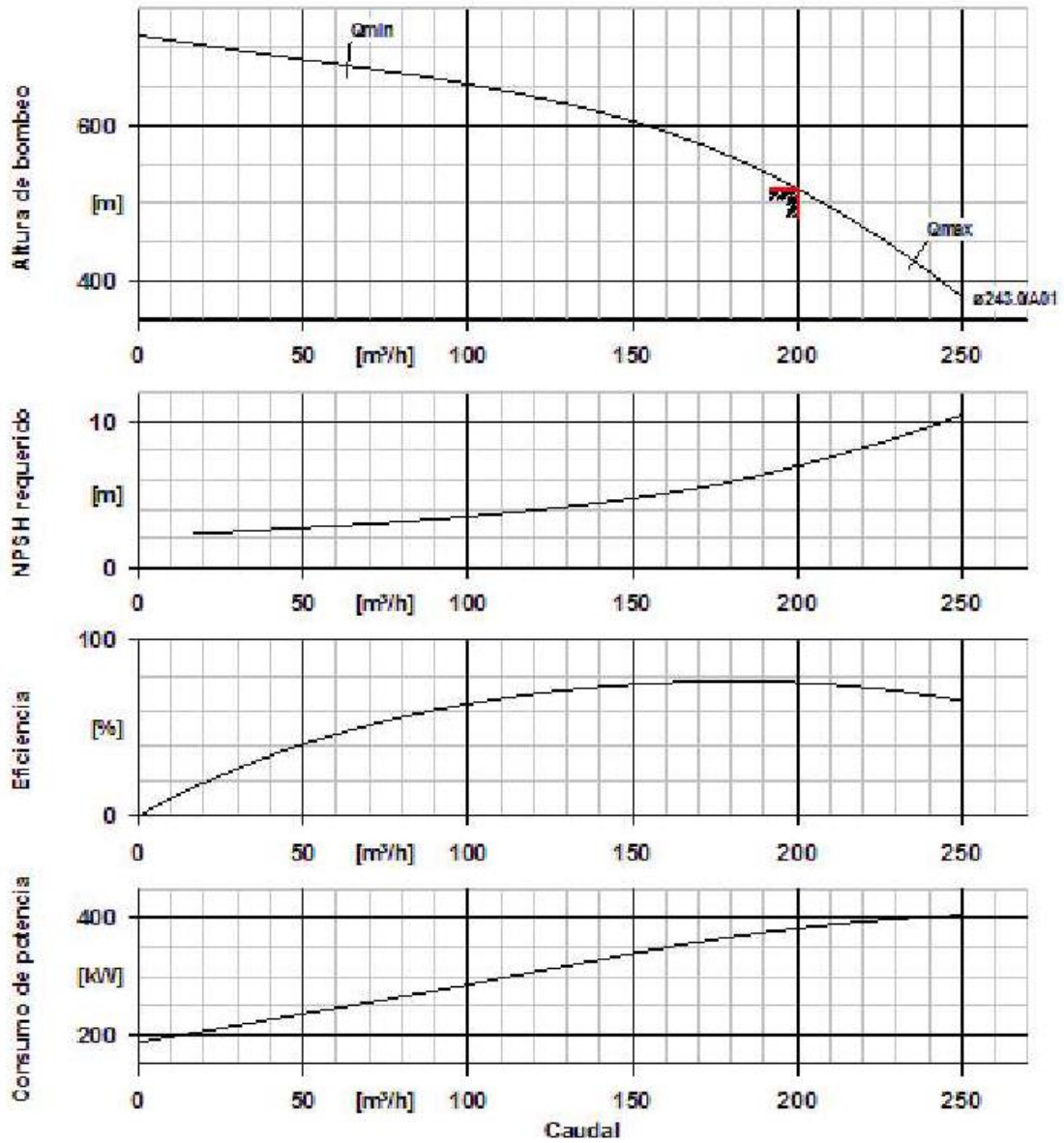


Figura 23. Curvas características de bomba de alta presión de Lowara.

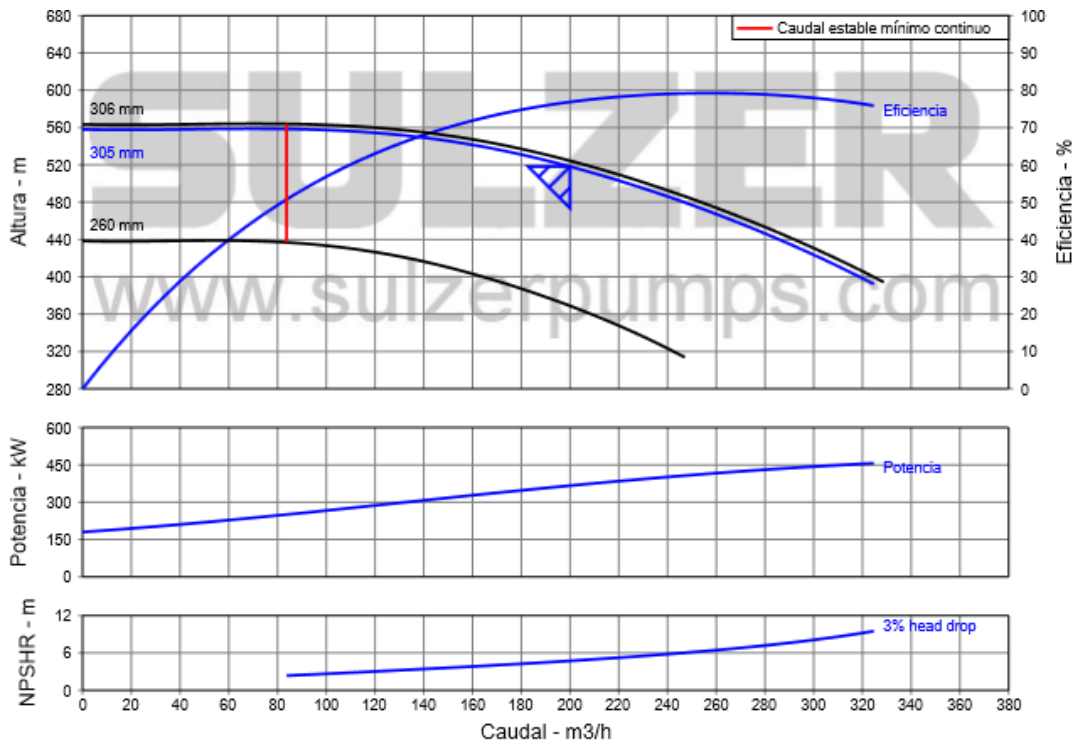


Figura 24. Curvas características de bomba de alta presión de Sulzer.

Bomba booster

Para conocer la altura manométrica que ha de dar esta bomba al agua se necesitan conocer los siguientes datos:

P_s [Pa]	P_e [Pa]
5.425.000	5.270.000

Tabla 27. Datos para cálculo de la bomba booster.

La presión a la salida de esta bomba es igual a la de la salida de la bomba de alta presión ya que al salir de estas dos bombas sus caudales se mezclan para ser llevados a las membranas.

La presión de entrada se obtiene del Excel del recuperador de energía, y es igual a la presión de salida del intercambiador de energía.

Para esta bomba no se tienen en cuenta la diferencia de cota ni las pérdidas de carga debidas a tuberías y accesorios.

Con los datos anteriores se obtiene que la altura manométrica requerida por esta bomba es de 15,37 m.

Indicando en los programas online de KSB, Sulzer y Loara que la altura requerida es de 15,37 m y que el caudal es de 300 m³/h, se han obtenido las siguientes tres bombas:

Fabricante	Modelo	Rendimiento [%]	Potencia [kW]	NPSH [m]
Lowara	ICP 200-150-315	81,29	17,4	2,9
KSB	Mega CPK	84,7	15,25	3,09
Sulzer	ZE 200-250	81,71	15,64	2,01

Tabla 28. Posibles bombas booster.

Se escoge la bomba del fabricante KSB porque su bomba es la de mayor rendimiento y menor potencia. Además en ninguna de las bombas habría cavitación ya que la presión de salida de la bomba es de 54,25 bar, lo que equivale a unos 542,5 m.



Figura 25. Bomba Mega CPK de KSB. Fuente: KSB

Las gráficas de operación de las bombas se muestran a continuación.

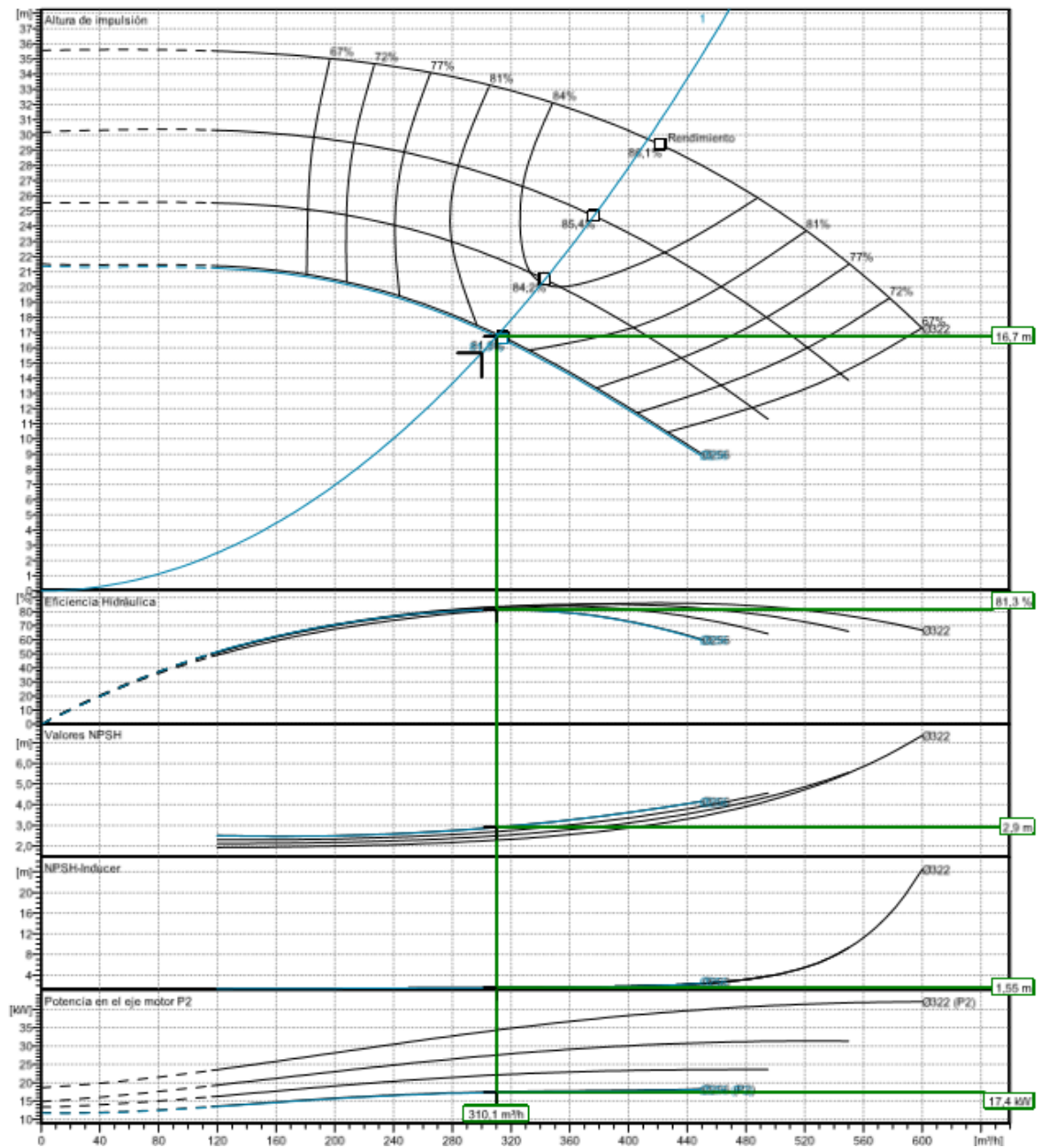


Figura 26. Curvas características de bomba booster de Lowara.

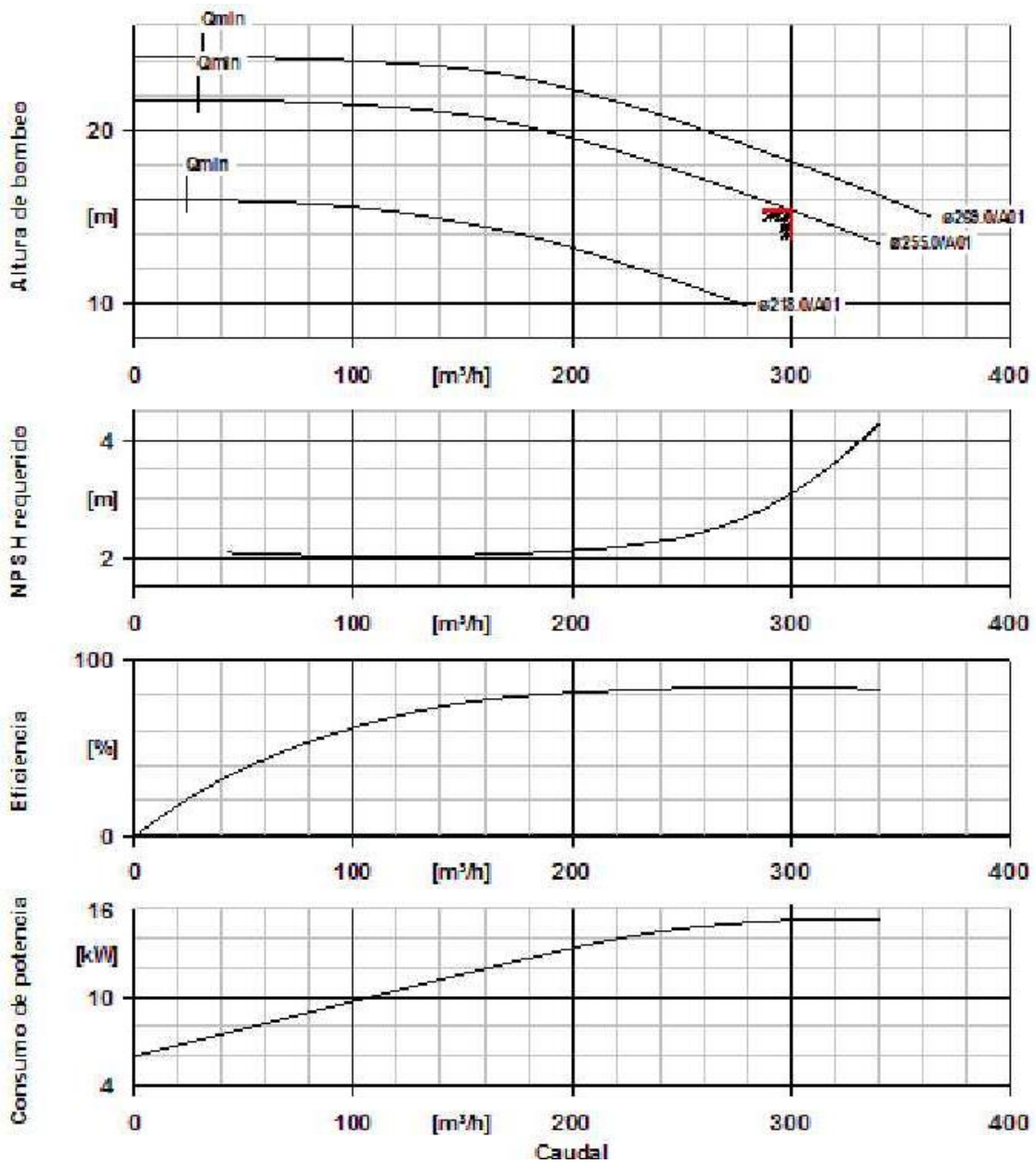


Figura 27. Curvas características de bomba booster de KSB.

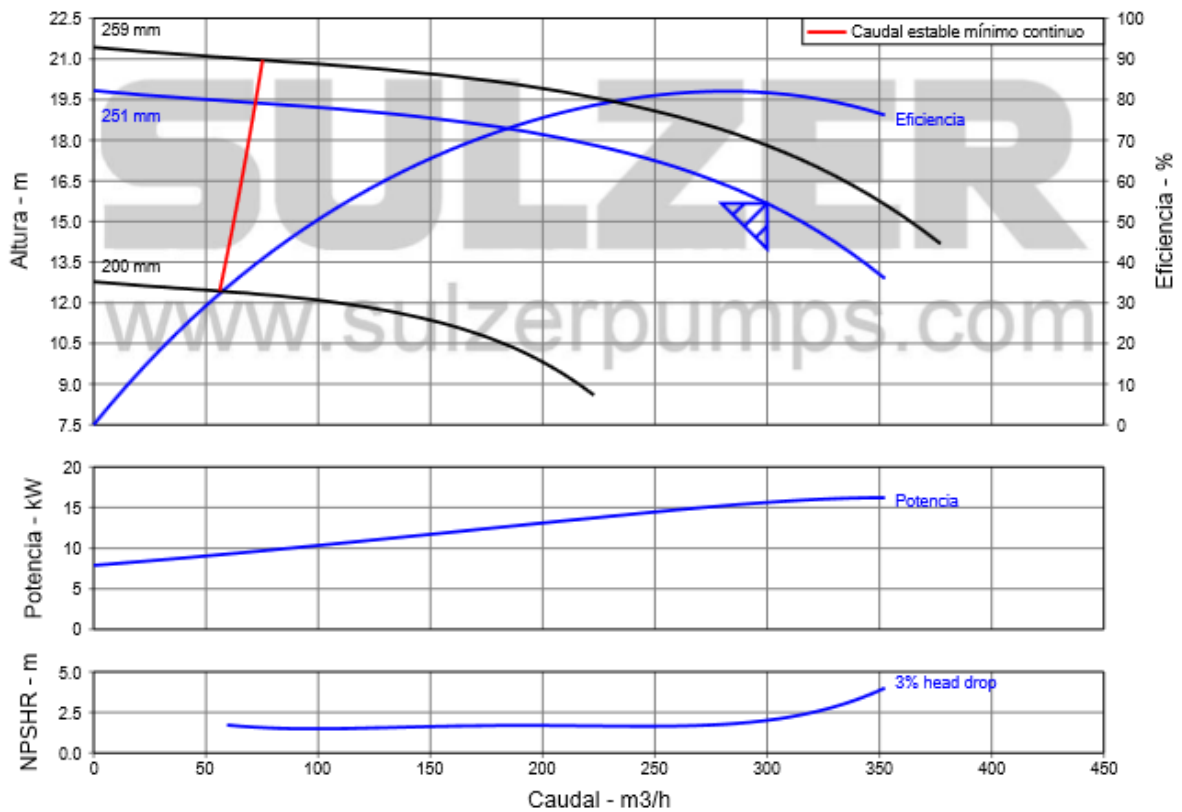


Figura 28. Curvas características de bomba booster de Sulzer.

Bomba de distribución

Para el cálculo de la altura de esta bomba se requieren los siguientes datos:

z_B [m]	z_A [m]	$H_{r,tuberías}$ [m]	$H_{r,accesorios}$ [m]
200	0	9,253578861	1

Tabla 29. Datos para cálculo de la bomba de distribución.

En este caso se desprecia la diferencia de presión a la entrada y la salida porque ambas han de ser de 1 bar. El valor de z_B se obtiene de que el depósito se encuentra a unos 200 m sobre el nivel del mar.

Con estos datos se obtiene que la altura manométrica requerida es de 210,25m.

Con esta altura y teniendo en cuenta que el caudal a transportar es de 200 m³/h se han obtenido las siguientes bombas:

Fabricante	Modelo	Rendimiento [%]	Potencia [kW]	NPSH [m]
Lowara	MP 125.1/3D-C-16002	74,32	157,7	5,56
KSB	Multitec GA	78,5	144,90	7,94
Sulzer	ZE 200-250	79,07	144	3,90

Tabla 30. Posibles bombas de distribución.

De entre estas tres bombas se escoge la del fabricante Sulzer porque tiene mayor rendimiento y menor consumo.



Figura 29. Bomba ZE de Sulzer. Fuente: Sulzer

Las gráficas de operación de estas bombas son las siguientes.

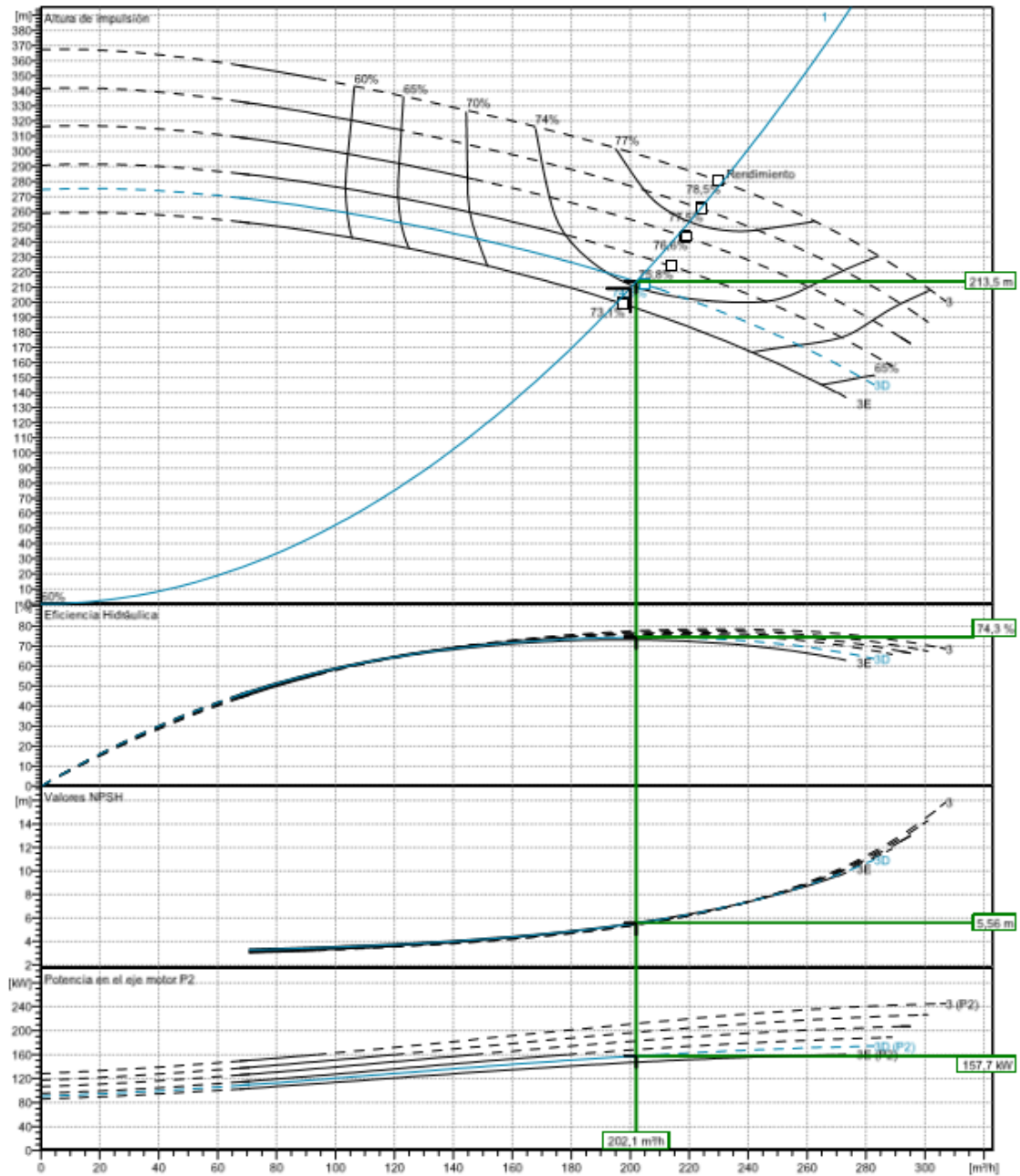


Figura 30. Curvas características de la bomba de distribución de Lowara.

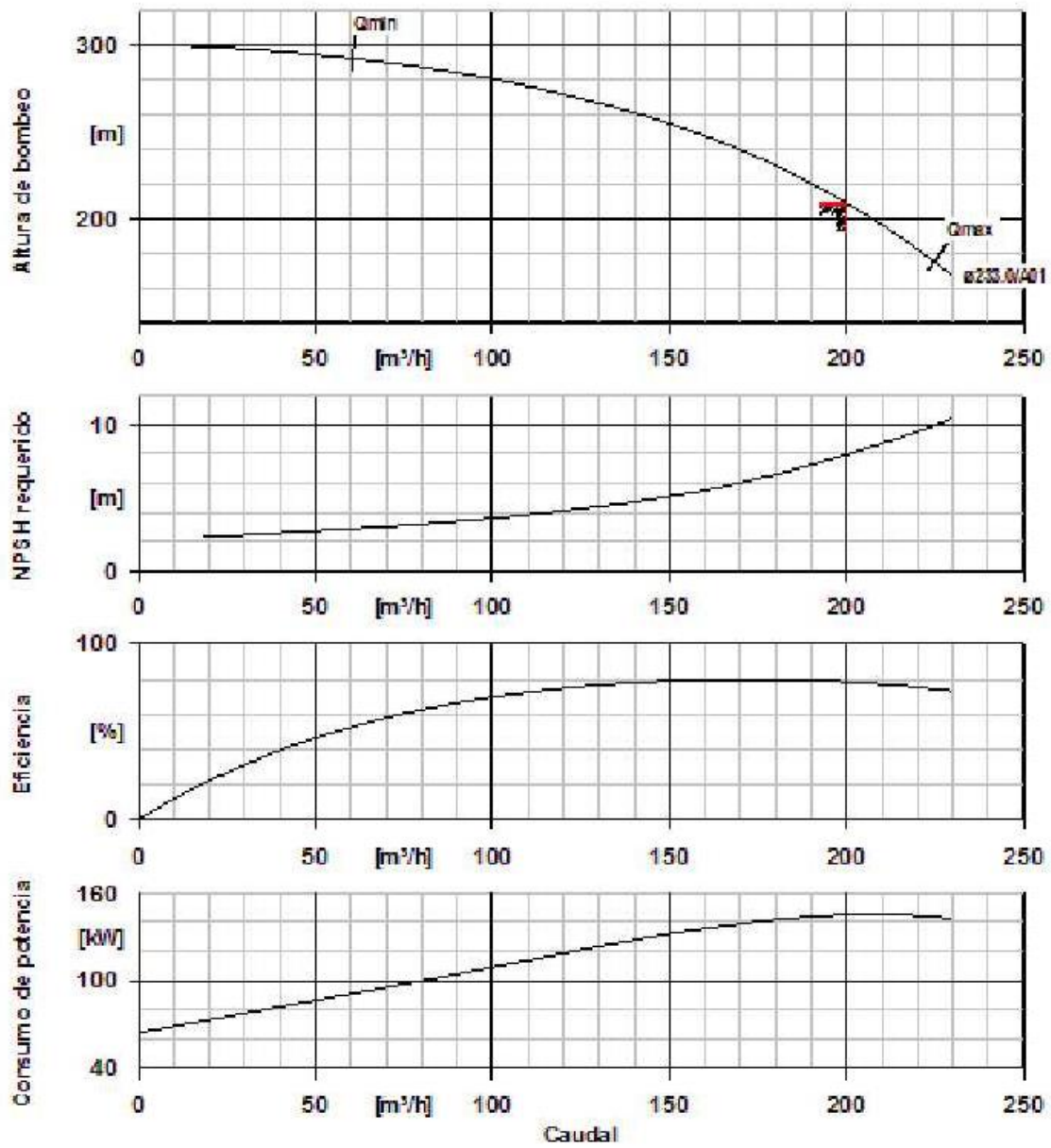


Figura 31. Curvas características de la bomba de distribución de KSB.

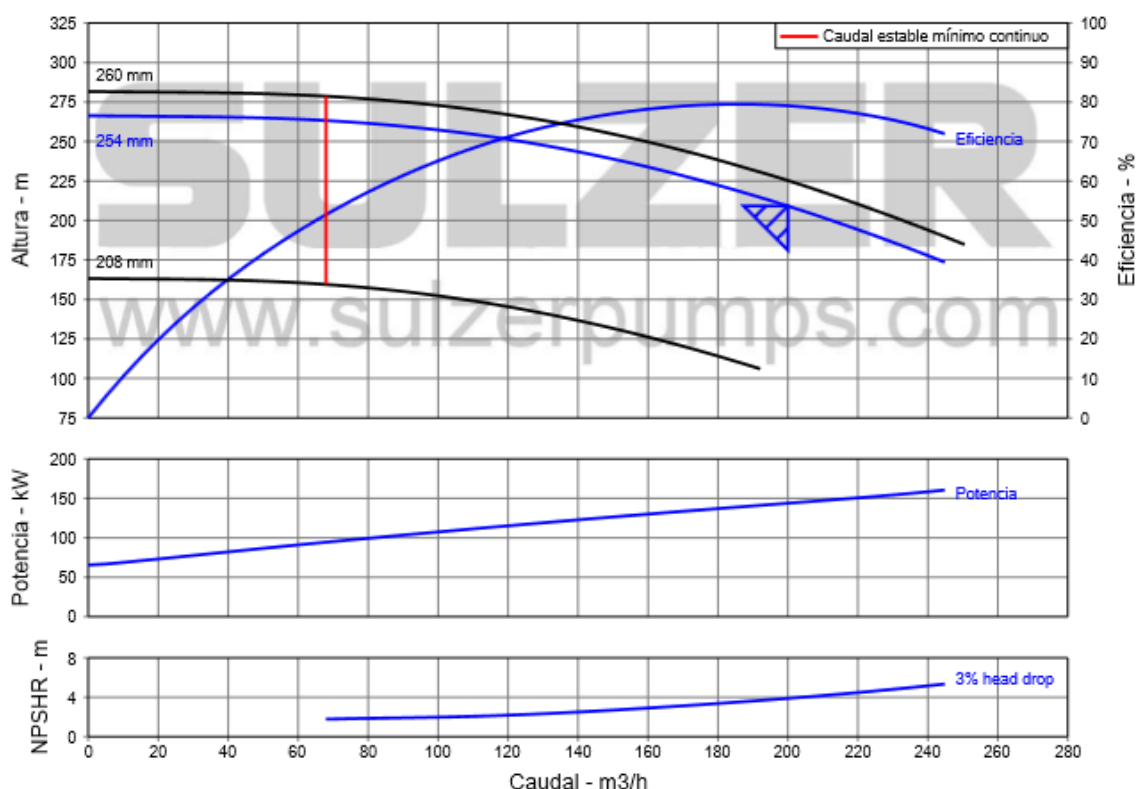


Figura 32. Curvas características de la bomba de distribución de Sulzer.

Bomba rechazo

Suponiendo que hace falta una bomba para desplazar la salmuera hasta el mar, los datos necesarios para el cálculo de la altura de esta bomba son los siguientes:

z_B [m]	z_A [m]	$H_{r,tuberías}$ [m]
-25	0	4,97

Tabla 31. Datos para cálculo de la bomba de rechazo.

Con estos datos se obtiene que la altura manométrica que ha de dar la bomba al agua es de -21 m, lo que significa que no existe necesidad de colocar una bomba para que se traslade la salmuera hasta el mar, ya que con la fuerza de la gravedad será suficiente.

Bombas seleccionadas

Bomba	Fabricante	Modelo	Rendimiento [%]	Potencia [kW]
De captación	Sulzer	SJT-20DLC	82,81	49,38
De alta presión	Sulzer	MBN100-300	76,87	367
Booster	KSB	Mega CPK	84,7	15,25
De distribución	Sulzer	ZE 200-250	79,07	144

Tabla 32. Bombas seleccionadas.

Pretratamiento

Para que se pueda garantizar un funcionamiento óptimo de las membranas y para aumentar su vida útil, además de para evitar precipitaciones durante el proceso de ósmosis inversa, se han de realizar tanto pretratamientos físicos como químicos antes de que el agua pueda ser llevado a las membranas.

Estudio de un sistema de desalación y de producción de hidrógeno alimentado mediante energías renovables

Pretratamiento físico

Como el agua será captada por pozos la filtración del agua a través de la tierra realizará un primer pretratamiento físico en el que serán retenidos grandes cuerpos que se pueden encontrar en el agua de mar.

Después de extraerse el agua de los pozos esta se hará pasar por un filtro de arena y posteriormente por un filtro de cartucho para eliminar así partículas que se encuentran en el agua.

Para realizar este pretratamiento físico se han buscado fabricantes que oferten los filtros necesarios para ello y se han encontrado los siguientes: Pure Aqua, Lenntech, Dow, Nordic Water y Sati.

Pretratamiento químico

Como se ha indicado en el software ROSA9, en el pretratamiento químico del agua de mar se añade H_2SO_4 para disminuir su pH hasta 5,0. Además se han de añadir anti-incrustantes para evitar la precipitación de algunos elementos contenidos en el agua. Algunos fabricantes que ofrecen estos productos y sistemas para su dosificación son: Dow, Lenntech y Pure Aqua.

Postratamiento

Una vez se ha desalado el agua de mar, se le ha de aplicar un postratamiento, aumentando su pH, que tras la desalación es de solo 4,43, hasta alcanzar un valor entre 6,5 y 9,5 para que sea apto para el consumo humano. El aumento del pH se puede realizar añadiendo productos químicos o realizando una mezcla con otras aguas. Los fabricantes que se han encontrado que ofertan estos productos químicos y sistemas para dosificarlos son: Dow, Lenntech y Pure Aqua.

Distribución de los componentes

La distribución de los componentes del sistema de desalación será la siguiente.

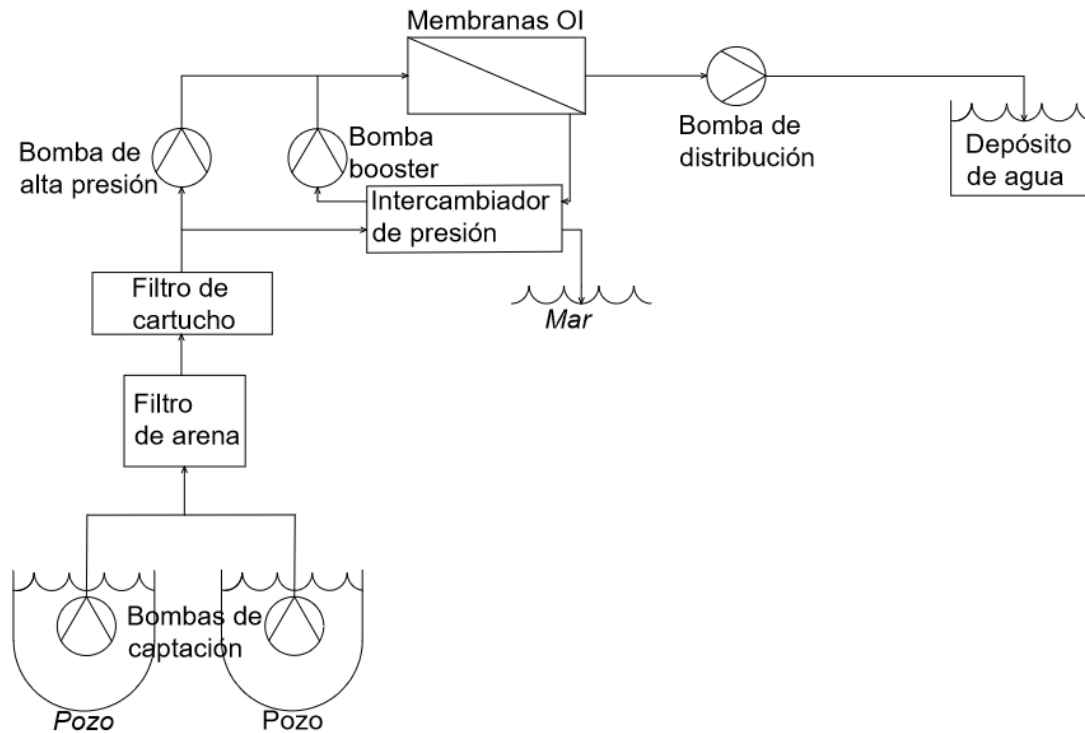


Figura 33. Distribución de las componentes del sistema de desalación.

Consumo energético de la planta desaladora

Para calcular el consumo energético de la planta se tienen en cuenta las bombas de mayor consumo, como son las de captación, la de alta presión, la booster y la de distribución, y se desprecian las de consumo más bajo, como son las que se utilizan para los lavados de filtros y membranas y para el suministro de productos químicos tanto en el pre como en el postratamiento y en la limpieza de las membranas.

Bomba	Potencia [kW]	Nº de bombas	Potencia total [kW]	Potencia/día [kWh/día]	Potencia/año [kWh/año]
De captación	49,38	2	98,76	2.370,24	865.137,6
De alta presión	367	1	367	8.808	3.214.920
Booster	15,25	1	15,25	366	133.590
De distribución	144	1	144	3.456	1.261.440
Total	575,63	5	625,01	15.000,24	5.475.087,6

Tabla 33. Consumo energético de las bombas y de la planta completa.

ANEXO II

DIMENSIONADO DEL AEROGENERADOR

Elección del aerogenerador

Para abastecer el consumo energético de la planta desaladora se empleará la energía producida por un aerogenerador que se colocará cerca de la planta.

Orientación del aerogenerador

Para conocer la orientación del aerogenerador se proyectarán rosas de viento a partir de datos obtenidos del IDAE para el punto de medición más cercano a la ubicación de la planta desaladora.

La ubicación del punto más cercano de medición del viento a la desaladora es el siguiente:

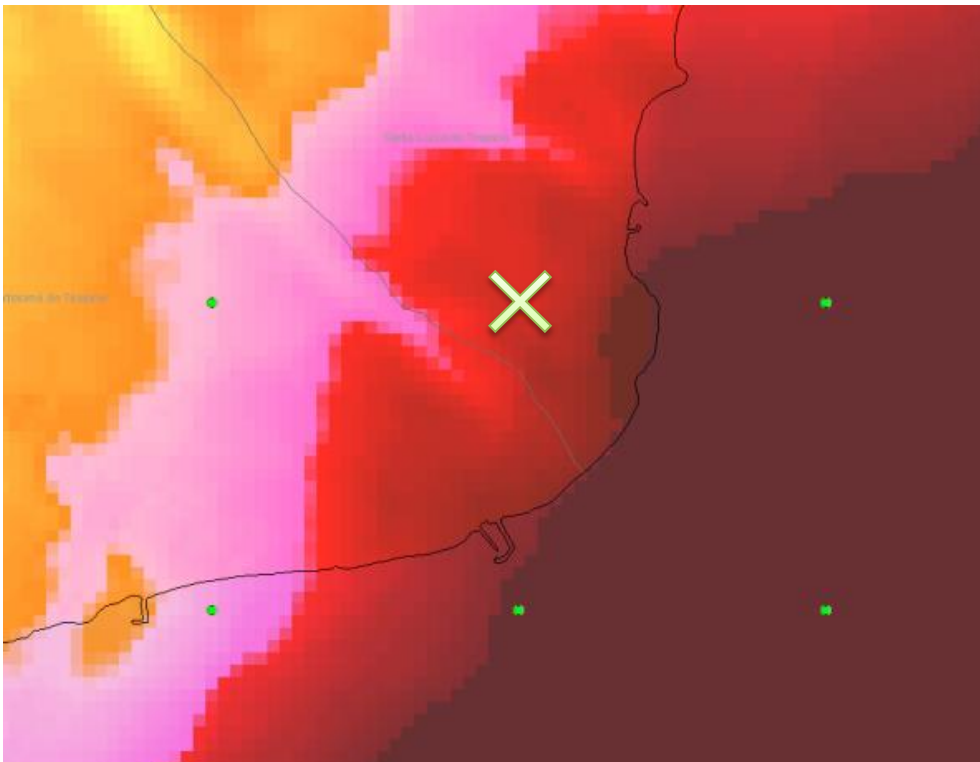


Figura 34. Punto de medición de viento más cercano a la EDAM. Fuente: IDAE

Los datos sobre el viento obtenidos para este punto son los siguientes:

Dirección	Frecuencia (%)	Velocidad (m/s)	Potencia (%)	Weibull C (m/s)	Weibull K
N	12,42	11,075	21,78	12,521	2,131
NNE	48,65	11,093	62,31	11,953	2,72
NE	17,73	8,752	12,33	9,441	2,334
ENE	4,46	5,029	0,58	5,389	2,329
E	2,12	4,04	0,2	4,376	1,725
ESE	1,58	2,976	0,05	3,211	2,163
SE	1,45	3,303	0,07	3,667	1,856
SSE	1,53	3,163	0,07	3,434	1,827
S	1,15	3,182	0,04	3,343	2,078
SSW	1,18	3,9	0,1	4,477	2,123
SW	1,41	6,27	0,44	6,696	1,836
WSW	2,78	6,792	1,09	7,233	1,858
W	1,7	6,176	0,47	6,625	2
WNW	0,34	3,368	0,02	3,495	1,564
NW	0,37	2,454	0,01	2,634	1,827
NNW	1,11	6,204	0,45	6,696	1,542

Tabla 34. Propiedades del viento en el punto de medición más cercano a la EDAM.

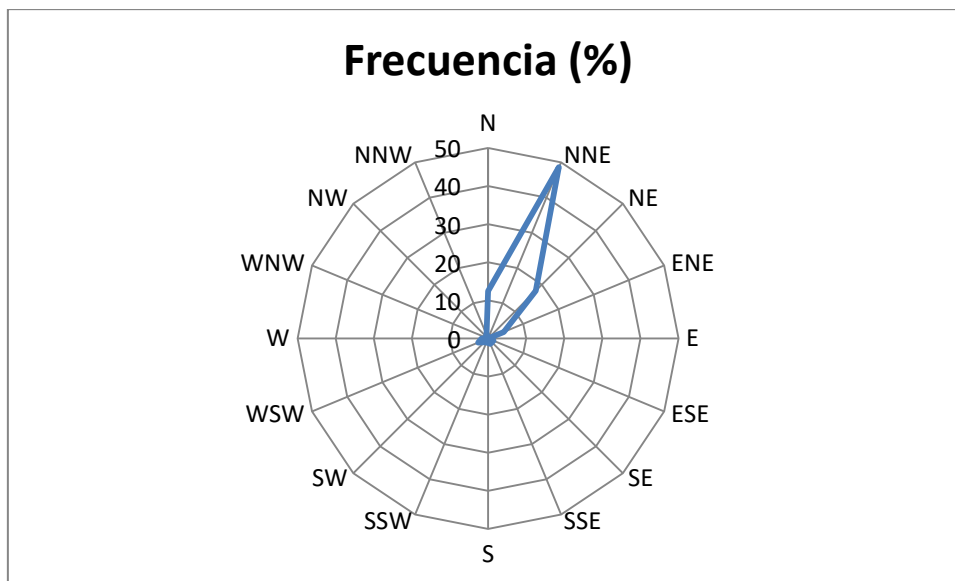


Figura 35. Rosa de los vientos de frecuencias.

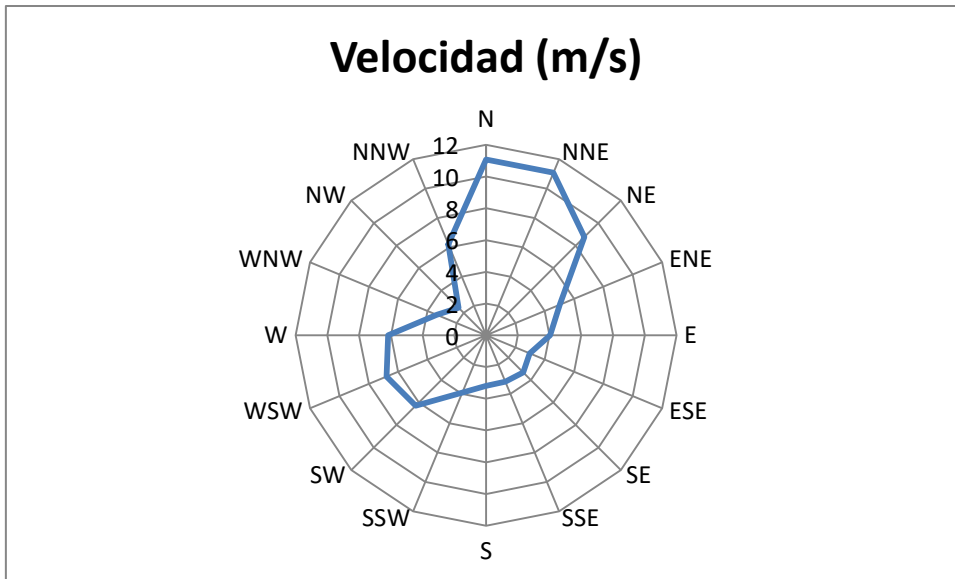


Figura 36. Rosa de los vientos de velocidades.

A partir de estas rosas de los vientos se puede deducir que la orientación más apropiada para el aerogenerador será hacia el nornordeste (NNE).

Elección del aerogenerador

Para conocer la potencia media anual que puede producir un aerogenerador en un determinado emplazamiento se necesita conocer la distribución de probabilidad de velocidades del viento. Esta distribución indica la probabilidad de que la velocidad del viento se encuentre en un cierto intervalo. Para conocer esta distribución se empleará la distribución de Weibull.

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

Ecuación 8. Distribución de Weibull.

Para calcular la probabilidad de velocidad de viento en el intervalo v se necesitan conocer los siguientes parámetros:

- El factor de forma de Weibull (k).
- El factor de escala de Weibull (c).
- La velocidad del viento (v).

En este caso se calculan los valores medios del factor de forma (K) y del factor de escala (C) de la tabla34. Estos valores medios se indican en la siguiente tabla:

Weibull C (m/s)	Weibull K
5,95	1,99

Tabla 35. Valores medios del factor de forma y del factor de escala.

Para calcular la probabilidad de velocidad de viento para intervalos de 1m/s desde 0m/s hasta 25 m/s se ha hecho uso de la ecuación *Distribución de Weibull* proporcionada por Excel. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada intervalo. Además se han

calculado los porcentajes de la probabilidad de cada velocidad y las horas anuales de probabilidad de velocidad de cada intervalo.

Velocidad (m/s)	f(v)	f(v) (%)	horas/año
0	0	0	0
1	0,05529907	5,52990711	48.441,99
2	0,10118818	10,1188177	88.640,84
3	0,13146046	13,1460458	115.159,36
4	0,14360004	14,3600037	125.793,63
5	0,13907364	13,9073636	121.828,51
6	0,12227557	12,2275571	107.113,4
7	0,09883891	9,88389071	86.582,88
8	0,07401023	7,40102332	64.832,96
9	0,05158849	5,15884919	45.191,52
10	0,03358638	3,35863838	29.421,67
11	0,02047206	2,04720614	17.933,53
12	0,01170353	1,17035322	10.252,29
13	0,0062837	0,62836995	5.504,52
14	0,00317186	0,31718605	2.778,55
15	0,00150653	0,15065265	1.319,72
16	0,00067375	0,06737488	590,20
17	0,00028387	0,02838701	248,67
18	0,00011273	0,0112731	98,75
19	4,2212E-05	0,00422122	36,98
20	1,4909E-05	0,0014909	13,06
21	4,9682E-06	0,00049682	4,35
22	1,5624E-06	0,00015624	1,37
23	4,638E-07	0	0
24	1,2998E-07	0	0
25	3,4398E-08	0	0

Tabla 36. Probabilidad de velocidad de viento para diversos intervalos.

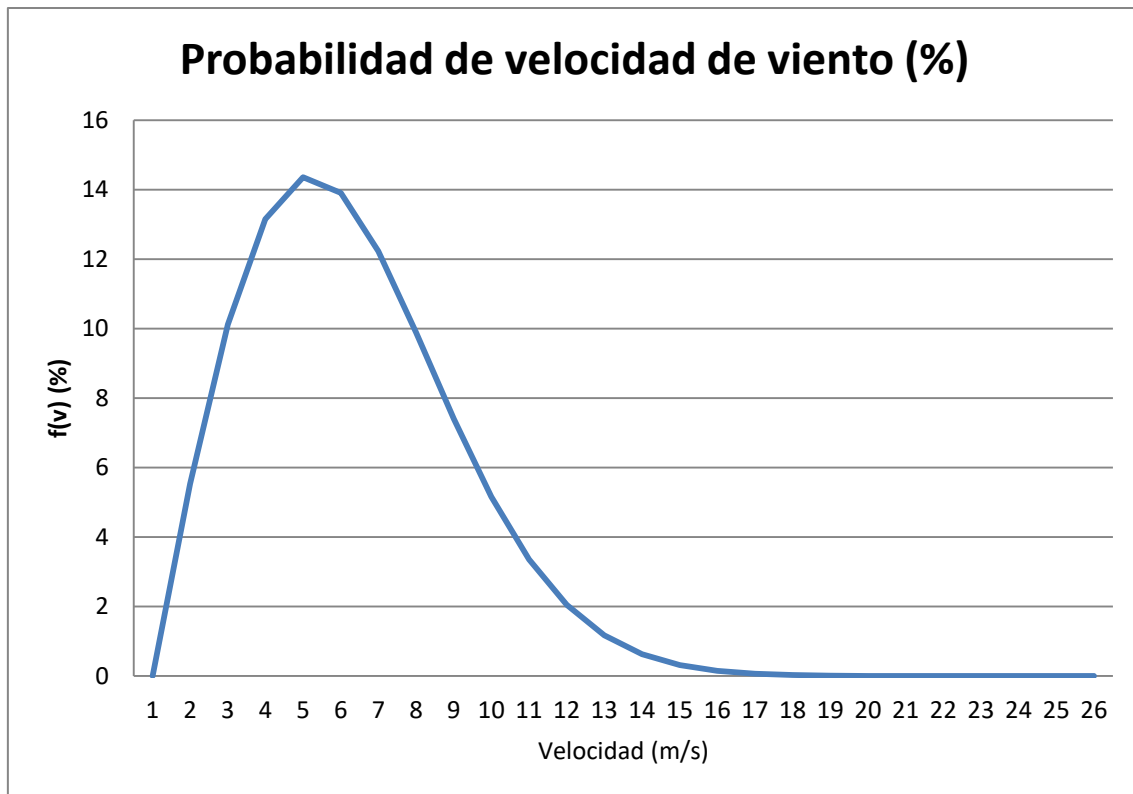


Figura 37. Gráfica de la probabilidad de velocidad de viento frente a la velocidad de viento.

Para seleccionar el aerogenerador más apropiado se ha hecho uso de la herramienta ofrecida por el ITC que permite calcular la potencia anual producida para diferentes aerogeneradores para cualquier lugar de Canarias.

Para ello se introducen las coordenadas del emplazamiento, que en este caso son las siguientes:

UTM (Este, Norte, Huso, Hemisferio)	458009.88787118386 m , 3075925.925529714 m , 28 , Norte
-------------------------------------	---

Figura 38. Coordenadas del emplazamiento de la EDAM. Fuente: Pixelis Maps

Además se han de introducir el modelo del aerogenerador y su altura. Para indicar la altura correcta de cada aerogenerador se han buscado los diferentes modelos en las páginas web de los proveedores para conocer las distintas alturas disponibles.

Tras introducir los datos que pide el programa se pulsa el botón *Calcular* y el programa devuelve información sobre la ubicación, el aerogenerador seleccionado, el viento en la ubicación, y la energía que el aerogenerador produce en dicha ubicación.

En la siguiente tabla se recogen los resultados obtenidos para diferentes modelos de aerogeneradores ubicándolos en el mismo lugar en el que se ha indicado que se colocará la EDAM.

Fabricante	Modelo (altura)	Energía anual estimada [kWh]	Potencia nominal [kW]	Factor de carga [%]	Nº de aerogeneradores	Energía total anual estimada [kWh]
Enercon	E-101 (99m)	15.462.196,9	3050	57,87	1	15.462.196,9
Enercon	E-44 (55m)	3.448.655,9	900	43,74	2	6.897.311,8
Enercon	E-48 (50m)	3.503.778,4	800	50,00	2	7.007.556,8
Enercon	E-82 (78m)	10.093.396,9	2000	57,61	1	10.093.396,9
Enercon	E-82 E2 (59m)	10.260.550,2	2350	49,84	1	10.260.550,2
Enercon	E-70 (57m)	9.031.031,3	2300	44,82	1	9.031.031,3
Dewind	D4 (46m)	2.358.456,9	600	44,87	3	7.075.370,7
Dewind	D6 (60m)	4.489.318,8	1250	41,00	2	8.978.637,6
Dewind	D6 (60m)	4.657.917,6	1250	42,54	2	9.315.835,2
Dewind	D8 (80m)	8.657.440,5	2000	49,41	1	8.657.440,5
Vensys	Vensys 70 (65m)	7.037.993,4	1500	53,56	1	7.037.993,4
Vensys	Vensys 77 (61,5m)	7.152.589,7	1500	54,43	1	7.152.589,7
Fuhrländer	FL 1500-77m rotor (65m)	6.652.827,2	1500	50,63	1	6.652.827,2
Fuhrländer	FL 2500-100m rotor (85m)	12.770.963,2	2500	58,31	1	12.770.963,2
Gamesa	G80 (60m)	8703806,9	2000	49,68	1	8.703.806,9
Gamesa	G 87 (78m)	9839376,9	2000	56,16	1	9.839.376,9
Nordex	N90/2500 (65m)	11150198,8	2500	50,91	1	11.150.198,8
Vestas	V90/3000 (65m)	12459499,5	3000	47,41	1	12.459.499,5
Vestas	V90/1800 (80m)	9484565,5	1800	60,15	1	9.484.565,5

Tabla 37. Energía anual estimada producida por aerogeneradores ubicados en el lugar en que se colocará la EDAM.

Si se compara la energía total anual estimada de estos aerogeneradores con la energía anual consumida por la planta de 5.475.087,6 kWh, se observa que el aerogenerador que más se acerca a esta valor es el FL 1500-77 m rotor con una altura de 65m del fabricante Fuhrländer, cuya producción de energía anual estimada es de 6.652.827,2 kWh.



Figura 39. Aerogenerador 1500 de Fuhrländer. Fuente: Fuhrländer

Balance energético

A continuación se muestran el consumo de la planta, la energía producida por el aerogenerador y la energía sobrante para una hora, un día y un año.

	Energía producida por el aerogenerador [kWh]	Energía consumida por la planta [kWh]	Energía sobrante [kWh]
Por año	6.652.827,2	5.466.240	1.186.587,2
Por día	18.226,9	14.976	3.250,9
Por hora	759,5	624	135,5

Tabla 38. Energía generada, consumida y sobrante para una hora, un día y un año.

ANEXO III

USO DE LA ENERGÍA PRODUCIDA SOBRANTE

A continuación se explican los cálculos realizados para el supuesto caso de que se fuera a emplear la producción de hidrógeno para almacenar la energía que produce el aerogenerador pero que la EDAM no consumirá. También se han hecho cálculos para el caso de que el hidrógeno fuese a ser empleado para volver a producir electricidad.

Producción de hidrógeno

Para almacenar la energía sobrante de la producida por el aerogenerador esta se puede emplear para producir hidrógeno. Este hidrógeno entonces será almacenado y se volverá a transformar en agua para producir electricidad cuando el aerogenerador genere demasiado poca o ninguna energía.

Electrolizador

Del balance energético se puede deducir que la aportación media de energía al electrolizador será de 135 kWh.

El fabricante Wasserelektrolyse Hydrotechnik ofrece electrolizadores de tres diferentes tamaños:

Modelo	EV 50/59	EV 100/61	EV 150/56
Potencia [kW]	350	792	1110

Tabla 39. Electrolizadores ofrecidos por Wasserelektrolyse Hydrotechnik.

Como la potencia media que se podrá aportar al electrolizador es de 135 kWh se selecciona el electrolizador más pequeño cuya potencia es de 350 kW.

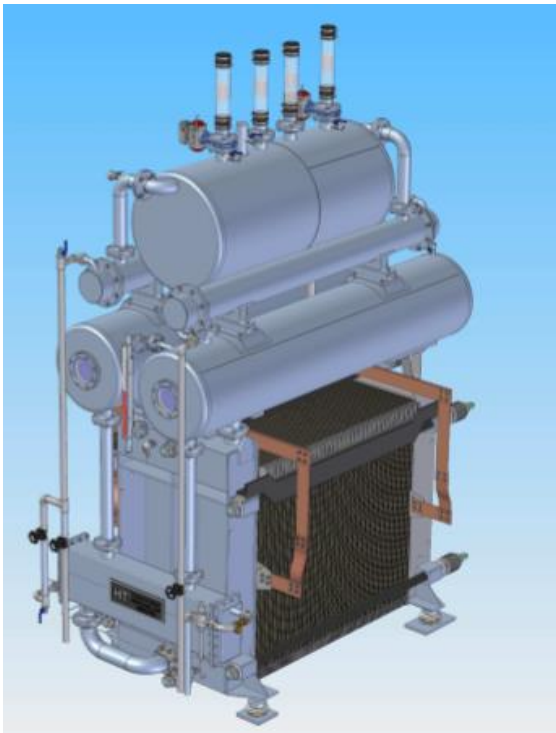


Figura 40. Electrolizador EV 50/59 de Wasserelektrolyse Hydrotechnik. Fuente: Wasserelektrolyse Hydrotechnik
Estudio de un sistema de desalación y de producción de hidrógeno alimentado mediante energías renovables

Algunos de los datos dados por el fabricante para este electrolizador son los siguientes:

Pureza H ₂	99,90%
Pureza O ₂	99,60%
Consumo energético específico	5,28 kWh/m _N ³ H ₂
Capacidad H ₂ /O ₂	74 m _N ³ /h / 37 m _N ³ /h
Potencia	350 kW
Agua de refrigeración	4 m ³ /h
Consumo de KOH (hidróxido de potasio)	23 mg/m _N ³ H ₂
Consumo de nitrógeno	12m _N ³ /h
Aire a presión	2 l/h
Agua de alimentación	aprox. 74 l/h
Volumen del electrolito	2,8 m ³

Tabla 40. Datos del electrolizador EV 50/59.

Como el consumo específico del electrolizador es de 5,28kWh/Nm³ H₂ y la energía sobrante media que produce el aerogenerador al día, y por lo tanto podrá consumir el electrolizador, es de 135kWh, la cantidad de hidrógeno que puede producir es la siguiente:

Producción por hora	25,7 Nm ³ H ₂
Producción por día	615,7 Nm ³ H ₂

Tabla 41. Producción de hidrógeno.

Pila de combustión

La pila de combustión debe producir tanta energía como la que consume la EDAM, es decir 624 kWh.

El fabricante Quintech ofrece la pila de combustible Jupiter cuya potencia máxima es de 50 kW y cuyo consumo es de 11 slpm/kW.

Para cubrir el consumo de la planta desaladora con estas pilas de combustible se tendrían que usar 13 de ellas a la vez, lo que se considera que supondría una inversión excesiva.

Si se podría emplear el hidrógeno para alimentar parcialmente a la EDAM cuando la electricidad producida por el aerogenerador sea insuficiente. Para ello se puede disponer de una pila de combustión de 50 kW.

En un día se pueden producir 615,7 m_N³ de hidrógeno, lo que equivale a 615.700 litros. Por lo tanto con el hidrógeno producido se puede tener a la pila de combustión funcionando en su máxima potencia de 50 kW durante 7 días, 18 horas y 34 minutos.

Aunque la inversión en un electrolizador, una pila de combustión y las bombonas necesarias para almacenar el hidrógeno sigue considerándose excesiva, ya que en el lugar que se ha seleccionado para la construcción de la planta desaladora y el aerogenerador se supone que el viento es relativamente constante.