



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

Grado en Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DE UNA ESTACIÓN DESALADORA DE AGUA DE MAR
ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA CON APOYO EN RED PARA
EL ABASTECIMIENTO PARCIAL DE LA POBLACIÓN DEL VALLE DE
GÜÍMAR EN TENERIFE

La Laguna, septiembre de 2018

Autor: Alberto Antonio Francisco Rodríguez

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Universidad de La Laguna
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
Grado en Ingeniería Mecánica

ÍNDICE GENERAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DE UNA ESTACIÓN DESALADORA DE AGUA DE MAR
ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA CON APOYO EN RED PARA
EL ABASTECIMIENTO PARCIAL DE LA POBLACIÓN DEL VALLE DE
GÜÍMAR EN TENERIFE

Autor: Alberto Antonio Francisco Rodríguez

Tutor: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE GENERAL RESUMIDO

- I. Memoria
- II. Anexos
 - 1. Dimensionado del bastidor de membranas
 - 2. Dimensionado del sistema de recuperación de energía y selección de las bombas del núcleo de desalación
 - 3. Dimensionado de los sistemas de captación, distribución y evacuación de la salmuera
 - 4. Cálculos energéticos y dimensionado del sistema eólico
 - 5. Estimación del presupuesto y del periodo de recuperación de la inversión inicial
 - 6. Documentación técnica
- III. Planos

MEMORIA

0.	Hoja de identificación	3
1.	Objeto	12
1.1	Abstract.....	12
2.	Alcance	13
3.	Justificación del estudio	14
4.	Antecedentes	16
4.1.	Situación global de los recursos hídricos	16
4.2.	Situación hidrológica en Canarias	17
4.3.	Situación hidrológica en Tenerife	19
5.	Generalidades.....	20
5.1.	Desalación de agua	20
5.1.1.	Comparación de tecnologías	20
5.1.2.	Desalación por ósmosis inversa	22
5.2.	Elementos básicos de una planta de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.....	23
5.2.1.	Captación de agua de mar	23
5.2.1.1.	Toma abierta	24
5.2.1.2.	Toma cerrada	25
5.2.2.	Pretratamiento del agua de mar	26
5.2.3.	Núcleo de desalación	32
5.2.3.1.	Membranas.....	32
5.2.3.2.	Bomba de alta presión.....	37
5.2.3.3.	Recuperador de energía.....	41
5.2.3.4.	Bomba booster	45
5.2.4.	Postratamiento del permeado.....	46
5.2.5.	Distribución del agua producida	48
5.2.6.	Evacuación de la salmuera y aspectos medioambientales de la desalación	49
5.3.	Energía eólica.....	50
5.3.1.	El viento.....	50
5.3.2.	Aerogeneradores.....	51
5.3.3.	Utilización de la energía eólica en la desalación de aguas ...	55

5.3.4. Aspectos ambientales	57
6. Normas y referencias	58
6.1. Disposiciones legales y normas aplicadas	58
6.2. Bibliografía	59
6.3. Otras referencias	59
6.4. Programas de cálculos	60
7. Definiciones y abreviaturas	61
7.1. Definiciones	61
7.2. Abreviaturas	62
8. Requisitos de diseño	62
8.1. Situación y emplazamiento	62
8.2. Producción de la planta	65
8.3. Temperatura del agua de alimentación	67
8.4. Composición del agua de alimentación	69
8.5. Calidad del agua producida	70
9. Análisis de soluciones	71
9.1. Sistema de captación	71
9.2. Membranas	72
9.3. Recuperador de energía	73
9.4. Bombas	74
9.4.1. Bomba de captación	75
9.4.2. Bomba de alta presión	75
9.4.3. Bomba booster	75
9.4.4. Bomba de distribución	76
9.5. Tuberías	76
9.6. Aerogeneradores	76
10. Resultados finales	78
10.1. Sistema de captación	79
10.2. Núcleo de desalación	79
10.2.1. Membranas de ósmosis inversa	79
10.2.2. Bomba de alta presión	79
10.2.3. Sistema de recuperación de energía	80
10.2.4. Bomba booster	80
10.3. Sistema de distribución	81

10.4. Sistema de evacuación de la salmuera	81
10.5. Material y longitud de las tuberías	81
10.6. Consumo energético de la estación desaladora.....	82
10.7. Parque eólico	82
10.8. Estimación del presupuesto y del periodo de recuperación de la inversión inicial	82
11. Conclusiones.....	83
11.1. Conclusion.....	83
12. Orden de prioridad de los documentos básicos	84

ANEXOS

1.	Dimensionado del bastidor de membranas	12
1.1.	Programa de dimensionado	12
1.2.	Análisis del agua de alimentación	13
1.3.	Producción de agua desalada	15
1.4.	Elección de las membranas	16
1.5.	Resumen de la configuración del bastidor de membranas.....	22
2.	Dimensionado del sistema de recuperación de energía y selección de las bombas del núcleo de desalación	27
2.1.	Sistema de recuperación de energía.....	27
2.1.1.	Comparación de recuperadores de energía	27
2.1.2.	Selección del intercambiador de presión	28
2.1.3.	Dimensionado del sistema de intercambio de presión y comprobación de la calidad del permeado	31
2.2.	Selección de la bomba de alta presión.....	33
2.3.	Selección de la bomba booster	42
2.4.	Recálculo del consumo específico del núcleo de desalación	46
3.	Dimensionado de los sistemas de captación, distribución y evacuación de la salmuera.....	50
3.1.	Sistema de captación	50
3.1.1.	Pozos de captación	51
3.1.2.	Tuberías	54
3.1.2.1.	Longitudes y diámetros.....	55
3.1.2.2.	Pérdidas de carga	57
3.1.3.	Selección de la bomba de captación	62
3.2.	Sistema de distribución	66
3.2.1.	Longitud y diámetro de la tubería de distribución	66
3.2.2.	Pérdidas de carga	67
3.2.3.	Selección de la bomba de distribución	68
3.3.	Sistema de evacuación de la salmuera	72
3.3.1.	Longitud y diámetro de la tubería de evacuación	73
3.3.2.	Pérdidas de carga	74
3.3.3.	Selección de la bomba de evacuación	74

4.	Cálculos energéticos y dimensionado del sistema eólico	78
4.1.	Consumo específico de la desaladora.....	78
4.2.	Dimensionado del sistema eólico	79
4.2.1.	Determinación del recurso eólico	80
4.2.2.	Cálculo de la energía producida por un aerogenerador	84
4.2.3.	Selección del aerogenerador.....	87
4.2.4.	Análisis de la producción energética anual	89
5.	Estimación del presupuesto y del periodo de recuperación de la inversión inicial	93
6.	Documentación técnica.....	98
6.1.	Resultados del software de diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa winflows	98
6.2.	Ficha técnica del modelo de membrana seleccionado	98
6.3.	Ficha técnica del intercambiador de presión	98
6.4.	Ficha técnica de la bomba de alta presión	98
6.5.	Ficha técnica de la bomba booster.....	98
6.6.	Ficha técnica de las tuberías de PRFV	98
6.7.	Ficha técnica de la bomba de captación	98
6.8.	Ficha técnica de la bomba de distribución.....	98
6.9.	Ficha técnica del aerogenerador	98

PLANOS

1. Planos	5
1.1. Plano 1: Situación	6
1.2. Plano 2: Emplazamiento	7

Universidad de La Laguna
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
Grado en Ingeniería Mecánica

MEMORIA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DE UNA ESTACIÓN DESALADORA DE AGUA DE MAR
ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA CON APOYO EN RED PARA
EL ABASTECIMIENTO PARCIAL DE LA POBLACIÓN DEL VALLE DE
GÜÍMAR EN TENERIFE

Autor: Alberto Antonio Francisco Rodríguez

Tutor: Vicente José Romero Ternero

0. HOJA DE IDENTIFICACIÓN

PROYECTO	
TÍTULO:	ESTUDIO DE UNA ESTACIÓN DESALADORA DE AGUA DE MAR ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA CON APOYO EN RED PARA EL ABASTECIMIENTO PARCIAL DE LA POBLACIÓN DEL VALLE DE GÜÍMAR EN TENERIFE.
PETICIONARIO	
NOMBRE:	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA.
DIRECCIÓN:	CAMINO SAN FRANCISCO DE PAULA, S/N. CAMPUS ANCHIETA. CÓDIGO POSTAL 38200, SAN CRISTÓBAL DE LA LAGUNA, TENERIFE, ESPAÑA.
TELÉFONO:	(+34) 922 31 83 09
AUTOR	
NOMBRE:	ALBERTO ANTONIO FRANCISCO RODRÍGUEZ
DNI:	79094053-C
TUTOR	
NOMBRE:	VICENTE JOSÉ ROMERO TERNERO
FECHA	
SEPTIEMBRE DE 2018	

ÍNDICE

0. Hoja de identificación	3
1. Objeto	12
1.1. Abstract.....	12
2. Alcance	13
3. Justificación del estudio	14
4. Antecedentes	16
4.1. Situación global de los recursos hídricos	16
4.2. Situación hidrológica en Canarias.....	17
4.3. Situación hidrológica en Tenerife	19
5. Generalidades.....	20
5.1. Desalación de agua.....	20
5.1.1. Comparación de tecnologías.....	20
5.1.2. Desalación por ósmosis inversa.....	22
5.2. Elementos básicos de una planta de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.....	23
5.2.1. Captación de agua de mar	23
5.2.1.1. Toma abierta.....	24
5.2.1.2. Toma cerrada	25
5.2.2. Pretratamiento del agua de mar	26
5.2.3. Núcleo de desalación	32
5.2.3.1. Membranas.....	32
5.2.3.2. Bomba de alta presión	37
5.2.3.3. Recuperador de energía	41
5.2.3.4. Bomba booster.....	45
5.2.4. Postratamiento del permeado	46
5.2.5. Distribución del agua producida	48

5.2.6. Evacuación de la salmuera y aspectos medioambientales de la desalación	49
5.3. Energía eólica	50
5.3.1. El viento.....	50
5.3.2. Aerogeneradores.....	51
5.3.3. Utilización de la energía eólica en la desalación de aguas	55
5.3.4. Aspectos ambientales	57
6. Normas y referencias	58
6.1. Disposiciones legales y normas aplicadas	58
6.2. Bibliografía	59
6.3. Otras referencias.....	60
6.4. Programas de cálculos.....	61
7. Definiciones y abreviaturas	61
7.1. Definiciones.....	62
7.2. Abreviaturas	62
8. Requisitos de diseño	63
8.1. Situación y emplazamiento	63
8.2. Producción de la planta.....	65
8.3. Temperatura del agua de alimentación	68
8.4. Composición del agua de alimentación.....	69
8.5. Calidad del agua producida.....	70
9. Análisis de soluciones.....	71
9.1. Sistema de captación.....	71
9.2. Membranas	72
9.3. Recuperador de energía	73
9.4. Bombas	74
9.4.1. Bomba de captación.....	75
9.4.2. Bomba de alta presión.....	75

9.4.3.	Bomba booster	75
9.4.4.	Bomba de distribución	76
9.5.	Tuberías	76
9.6.	Aerogeneradores	76
10.	Resultados finales	78
10.1.	Sistema de captación.....	79
10.2.	Núcleo de desalación.....	79
10.2.1.	Membranas de ósmosis inversa.....	79
10.2.2.	Bomba de alta presión.....	80
10.2.3.	Sistema de recuperación de energía.....	80
10.2.4.	Bomba booster	80
10.3.	Sistema de distribución	81
10.4.	Sistema de evacuación de la salmuera.....	81
10.5.	Material y longitud de las tuberías	81
10.6.	Consumo energético de la estación desaladora	82
10.7.	Parque eólico	82
10.8.	Estimación del presupuesto y del periodo de recuperación de la inversión inicial	82
11.	Conclusiones	83
11.1.	Conclusion	83
12.	Orden de prioridad de los documentos básicos.....	84

Índice de figuras

Figura 1. Tipos de agua y su distribución en el planeta (Abengoa, 2015)	16
Figura 2. Origen del agua consumida en Canarias en el año 2013 (Informe de Coyuntura en materia de aguas del SIMAC, 2014)	18
Figura 3. Ósmosis y ósmosis inversa (Documentación técnica de Grundfos sobre bombas para el tratamiento de aguas, 2002)	22
Figura 4. Sistema de desalación por ósmosis inversa de simple etapa (Documentación técnica de Grundfos sobre bombas para el tratamiento de aguas, 2002)	23
Figura 5. Esquema de una EDAM con toma abierta (Sydney Water)	25
Figura 6. Toma cerrada mediante pozos aislados (Missimer y Wright, 1997) ..	26
Figura 7. Depósito con filtración de arena horizontal (Dimasa Grupo)	30
Figura 8. Filtro de cartuchos (Dimasa Grupo)	30
Figura 9. Esquema de una membrana de configuración plana (Documentación técnica de Grundfos sobre bombas para el tratamiento de aguas, 2002)	33
Figura 10. Esquema de una membrana de configuración tubular (Documentación técnica de Grundfos sobre bombas para el tratamiento de aguas, 2002)	34
Figura 11. Esquema de una membrana de fibra hueca (Guía de desalación del Ministerio de Salud y Política Social, 2009)	35
Figura 12. Esquema de una membrana de enrollamiento en espiral (Documentación técnica de Grundfos sobre bombas para el tratamiento de aguas, 2002)	36
Figura 13. Tubos de presión para membranas de enrollamiento en espiral (Documentación técnica de Grundfos sobre bombas para el tratamiento de aguas, 2002)	36
Figura 14. Bombal de tornillo excéntrico (Netzsch)	38
Figura 15. Bomba de pistones (COHA-SAS).....	38
Figura 16. Esquema de una bomba centrífuga (Agüera Soriano, 1996)	39
Figura 17. Bomba multietapa de segmentos (Lowara).....	40
Figura 18. Bomba multietapa de cámara partida (Sulzer)	40
Figura 19. Ilustración de una turbina Francis (Flovel)	41
Figura 20. Turbina Pelton (Zeco Turbines).....	42

Figura 21. Sistema de ósmosis inversa con Turbocharger (Energy Recovery Inc.)	43
Figura 22. CIP de desplazamiento positivo DWEER (Flowserve)	44
Figura 23. CIP de desplazamiento rotativo (Energy Recovery, Inc.)	45
Figura 24. Esquema de un aerogenerador de eje horizontal (Agencia TSS) ...	52
Figura 25. Evolución del coste de los aerogeneradores entre los años 2004 y 2012 (Bloomberg NEF)	55
Figura 26. Mapa eólico de las Islas Canarias (IDAE)	64
Figura 27. Situación de la parcela donde se sitúa la EDAM del Valle de Güímar	64
Figura 28. Consulta descriptiva y gráfica de datos catastrales de la parcela donde se sitúa la EDAM del Valle de Güímar (Sede Electrónica del Catastro).....	65
Figura 29. Consumos hídricos en Tenerife en 2010 (Memoria de Información del Plan Hidrológico de Tenerife, 2015	66
Figura 30. Temperatura superficial mínima, máxima y media mensual del agua registrada por la boya de Santa Cruz de Tenerife entre los años 2009 y 2017 (Puertos del Estado).....	69
Figura 31. Datos cualitativos obtenidos de la recaudación de información durante las entrevistas a operarios y jefes de varias plantas desaladoras de Canarias (iAgua).....	74
Figura 32. Distribución de Weibull de la frecuencia de la velocidad del viento en la zona donde se sitúa el sistema eólico	77
Figura 33. Esquema general de la estación desaladora y del parque eólico para su autoabastecimiento	79

Índice de tablas

Tabla 1. Evolución de los consumos hídricos en Tenerife (Memoria de Información del Plan Hidrológico de Tenerife, 2015).....	19
Tabla 2. Evolución de los recursos hídricos en Tenerife (Memoria de Información del Plan Hidrológico de Tenerife, 2015)	19
Tabla 3. Comparación de las características de los principales procesos de desalación (Medina San Juan, 2000)	21
Tabla 4. Clases de aerogeneradores en función del régimen de viento según lo establecido en la norma IEC-61400-1	54
Tabla 5. Evolución de la población de los municipios de Candelaria, Arafo y Güímar y su tasa de crecimiento anual (INE).....	67
Tabla 6. Estimación de la población futura, consumos y porcentaje de dichos consumos que cubre la EDAM del Valle de Güímar	68
Tabla 7. Composición química del agua de alimentación de la EDAM del Valle de Güímar (EMMASA)	70
Tabla 8. Valores exigidos relativos a parámetros no deseables en las aguas potables (Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social)	71
Tabla 9. Ventajas y desventajas de los métodos de captación de agua de mar	72
Tabla 10. Comparativa de consumos específicos al incorporar a la EDAM recuperadores de energía	73
Tabla 11. Rendimientos de las bombas sumergibles seleccionadas	75
Tabla 12. Rendimientos de las bombas de alta presión seleccionadas	75
Tabla 13. Rendimientos de las bombas booster seleccionadas.....	75
Tabla 14. Rendimientos de las bombas de distribución seleccionadas.....	76
Tabla 15. Energía anual producida y factor de carga para cada modelo de aerogenerador.....	78
Tabla 16. Longitudes de tuberías en función de su diámetro nominal	81
Tabla 17. Potencias eléctricas consumidas y consumos específicos de los equipos y total de la EDAM	82

1. OBJETO

El objetivo principal del presente trabajo es reflejar los conocimientos adquiridos a lo largo los estudios del Grado en Ingeniería Mecánica con la realización de un documento técnico. En ese sentido, en este trabajo de naturaleza profesional se busca aplicar las competencias propias del Ingeniero Técnico Industrial y las capacidades necesarias para ello, como lo son la realización de mediciones y cálculos, el manejo de normativas y reglamentos, y la reunión de datos relevantes con los que, tras su análisis, tomar las decisiones oportunas.

Por otro lado, este trabajo tiene como objeto específico el estudio y diseño de una estación desaladora de agua de mar por ósmosis inversa alimentada a partir de energía eólica para el abastecimiento parcial de la población del Valle de Güímar, en la isla de Tenerife (Islas Canarias). El análisis de dicho sistema se centra en el dimensionado de los principales elementos mecánicos que conforman el proceso de desalación, así como los aerogeneradores que la abastecerán energéticamente.

1.1. ABSTRACT

The main aim of this project is to demonstrate the knowledge acquired during the studies of the bachelor's Degree in Mechanical Engineering through the writing of a technical document. In this professional paper it is intended to apply the Technical Industrial Engineering's abilities and the skills needed for that, such performing measurements and calculations, handling regulations and the gathering of data and its analysis in order to make appropriate decisions.

On the other hand, the specific purpose of this project is the study and design of a reverse osmosis seawater desalination plant powered by wind energy to feed partially the Valle de Güímar's population in Tenerife (Canary Islands). This desalination system analysis is focused on its mechanical equipment sizing as well as on the wind turbines selection.

2. ALCANCE

Se realiza un estudio para una estación desaladora de agua de mar por el proceso de ósmosis inversa con una capacidad de producción de 10.000 m³/día para el abastecimiento parcial de la población del Valle de Güímar en Tenerife y que se alimentará a partir de energía eólica.

En este trabajo se definen las características tanto mecánicas como energéticas del sistema de desalación, enfocándose principalmente en el núcleo de desalación de la planta, la captación de agua de mar, la distribución del producto y el estudio eólico para el dimensionado del grupo de aerogeneradores con los que abastecer energéticamente la planta desaladora.

A continuación se detallan los apartados que serán objeto de estudio en este trabajo:

- Emplazamiento de la estación desaladora.
- Dimensionado del sistema de captación de agua de mar.
- Elección de las membranas y su configuración.
- Elección del sistema de recuperación de energía en el núcleo de desalación.
- Elección de las bombas de alta presión y *booster*.
- Dimensionado del sistema de distribución.
- Dimensionado del sistema de evacuación de la salmuera.
- Cálculo del consumo específico de la estación desaladora.
- Localización del sistema eólico.
- Cálculo del recurso eólico.
- Selección del aerogenerador.

Quedan excluidos de este trabajo los apartados que se enumeran a continuación:

- Válvulas y demás accesorios de control y distribución para las conducciones, así como variadores de frecuencia, instalaciones eléctricas, electrónicas y de automatización de todo el sistema.

- Instalaciones tanto de pretratamiento como de postratamiento, incluyéndose los estudios químico y biológico (filtros, dosificadores, inhibidores, etc.).
- Estudio geotécnico del terreno de los pozos de captación.
- Obra civil en su totalidad (pozos de captación, cálculo de la estructura de la planta de procesos, cimentación de los aerogeneradores, etc.) y su planificación.
- Instalaciones para el control del flujo de rechazo.
- Dimensionado de las líneas de conducción de agua dentro de la planta de procesos.
- Pliego de condiciones.
- Mediciones y presupuesto.
- Estudio de seguridad y salud.
- Estudio de impacto ambiental.

De los puntos incluidos y excluidos de este trabajo se puede observar que en él se realiza un análisis general de la estación desaladora y de su sistema de abastecimiento energético mediante el recurso eólico disponible. Sin embargo, si el proyecto se fuera a llevar a cabo sería necesario incluir en el estudio todos los puntos mencionados anteriormente, cosa que no se ha hecho por cuestiones de tiempo.

3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

En las últimas décadas se ha desarrollado una situación de creciente escasez de recursos hidráulicos en Tenerife, aunque más intensiva en las islas de la provincia oriental, que ha empeorado con el incremento poblacional, las necesidades hídricas de las superficies de cultivo de la isla y la actividad turística. En consecuencia, se ha producido una sobreexplotación de los recursos hídricos disponibles, que en su mayoría son de origen subterráneo. Además, dicho desequilibrio entre la demanda de agua y los recursos hídricos disponibles, que es más acentuado en las comarcas de la vertiente sur de la isla, ha propiciado un deterioro de la calidad del agua de los acuíferos, cuya salinidad ha aumentado progresivamente.

Ante estos problemas se han desarrollado estrategias tanto de estabilización y reutilización de aguas residuales como de desalación de agua de mar, siendo esta última la de mayor relevancia.

La desalación de aguas en Canarias ha supuesto en los últimos cincuenta años un factor de supervivencia para muchas comunidades de las islas, especialmente en Lanzarote y Fuerteventura, aunque también las poblaciones costeras de Gran Canaria (donde habita la mayoría de la población) se abastecen fundamentalmente de agua desalada y las islas de Tenerife y El Hierro han ido incorporándose al uso de esta tecnología de forma progresiva.

En el caso de Tenerife son 22 las instalaciones de desalación de agua existentes en la actualidad, cuatro de ellas de carácter comarcal (Adeje-Arona, Guía de Isora, Granadilla y Santa Cruz) con una capacidad conjunta de 28 hm³ al año. Además, se prevé la implantación de otras tres para el año 2027 según lo establecido en el anejo 6 del documento para la Gestión y Gobernanza del Plan Hidrológico de Tenerife aprobado en 2015, entre ellas la EDAM del Valle de Güímar.

La planta de 10.000 m³/día estudiada en este trabajo se ajusta a la necesidad de ampliación del sistema existente, de ámbito local, actualmente constituido por una desaladora portátil de 2.000 m³/día localizada en el Polígono Industrial del Valle de Güímar, desde la que se impulsa el agua producida hasta el depósito del polígono. En cambio, con la EDAM del Valle de Güímar aumentará la disponibilidad de los recursos hídricos de la comarca mediante el transporte de agua desalada desde un nuevo depósito de cabecera, situado en La Hidalga (Arafo), hasta los depósitos de Caletillas, en el término municipal de Candelaria, y de El Puertito, en Güímar.

Por otro lado, el Marco Sobre Clima y Energía para 2030 aprobado por la Comisión Europea establece un objetivo vinculante para impulsar las energías renovables y conseguir que éstas cubran al menos el 27% del consumo de energía de la Unión Europea para dicho año. En ese sentido es importante que las nuevas edificaciones, además de ser energéticamente eficientes, incorporen en la medida de lo posible tecnologías que aprovechen los recursos naturales. Por ello, se aprovechará el importante recurso eólico presente en el sureste de

la isla de Tenerife con la instalación de un grupo de aerogeneradores para abastecer energéticamente la estación desaladora.

4. ANTECEDENTES

4.1. SITUACIÓN GLOBAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

El agua es un elemento fundamental para la supervivencia de los seres vivos y que representa entre el 50 y el 90% de la masa de éstos, siendo en el caso de los seres humanos del 75%. Dicha importancia se refleja en el hecho de que el acceso al agua sea reconocido por las Naciones Unidas como un derecho humano. Además, el agua es un factor clave para el desarrollo de las actividades económicas y comerciales en general.

Sin embargo, el agua no se distribuye equitativamente en todo el planeta y existe un problema de accesibilidad de este recurso para ser utilizado por las poblaciones pues, aunque se estima que en el planeta hay un total de 1.386.000 kilómetros cúbicos de agua, el 97.5% es agua salada y tan solo un 2.5% es dulce, donde el 1.74% se encuentra en forma de hielo en los glaciares y casquetes polares, que hoy en día se están derritiendo como consecuencia del calentamiento global.

Localización	Porcentaje de agua total	Tipo de agua
Mares y océanos	96,5 %	Salada
Casquetes y glaciares polares	1,74 %	Dulce
Agua subterránea salada	0,94 %	Salada
Agua subterránea dulce	0,76 %	Dulce
Glaciares continentales y permafrost*	0,022 %	Dulce
Lagos de agua dulce	0,007 %	Dulce
Lagos de agua salada	0,006 %	Salada
Humedad del suelo	0,001 %	Dulce
Atmósfera	0,001 %	Dulce
Embalses	0,0008 %	Dulce
Ríos	0,0002 %	Dulce
Agua biológica	0,0001 %	Dulce

* Permafrost: capa de hielo permanente en los niveles superficiales del suelo de las regiones muy frías o periglaciares.

Figura 1. Tipos de agua y su distribución en el planeta (Abengoa, 2015)

Por otro lado, el crecimiento de la población, la tendencia a la urbanización de las poblaciones y la industrialización ha generado un aumento permanente de la demanda global de agua dulce que agrava la situación de accesibilidad de este recurso, estimándose un déficit global de agua del 40% para el año 2030 bajo el escenario actual de uso de dicho recurso, de acuerdo con el informe del 2015 de las Naciones Unidas sobre el desarrollo global del agua.

Por todo ello, se puede afirmar que los recursos hídricos disponibles en el mundo son relativamente escasos, sobre todo en relación con las demandas de la población, la industria y el sector agrario.

4.2. SITUACIÓN HIDROLÓGICA EN CANARIAS

En Canarias, las aguas de consumo son obtenidas tanto de recursos hidráulicos convencionales, que pueden ser superficiales (principalmente embalses) o subterráneos (pozos y galerías), así como de recursos no convencionales, como es el caso de la reutilización de aguas residuales o la desalación. Estos calificativos de “convencional” y “no convencional” se deben a que los recursos subterráneos y el aprovechamiento de las aguas superficiales han sido los orígenes tradicionales de agua no sólo en Canarias, sino en todo el mundo, pero el hecho de que las técnicas de desalación lleven desarrollándose en las islas desde hace cincuenta años hace que hoy en día pase a ser un recurso tan convencional como cualquier otro.

Por otro lado, los crecimientos poblacionales y la actividad turística intensiva en las islas han condicionado un cambio significativo en la asignación de los usos de los recursos hídricos, que se refleja en el aumento en los últimos años de la demanda para su uso urbano como consecuencia del aumento de la población. Estas variaciones han hecho que, según el Sistema de Información Medioambiental de Canarias (SIMAC), sólo Lanzarote y Fuerteventura se acerquen a las medias de consumo europeas recomendadas de 90 litros por habitante y día, y que los balances de consumos y recursos disponibles en Canarias sean cero o deficitarios, con la excepción de La Gomera y La Palma. Esto deja un estrecho margen a la disponibilidad de caudales ecológicos suplementarios para el correcto mantenimiento de hábitats, paisajes y ecosistemas, o para la recuperación de acuíferos.

Para superar el creciente déficit hídrico en Canarias se ha tenido que recurrir a la reutilización de las aguas depuradas y, en mayor medida, a la desalación, sobre todo en las islas con menos recursos hídricos como Lanzarote y Fuerteventura, islas que antes de la implantación de las técnicas de desalación tenían que ser abastecidas de agua por medio de buques aljibe de la Armada Española. Por ello, la primera desaladora de España se construyó en 1965 en Lanzarote, con una producción de 2.500 m³/día y que utilizaba el proceso de desalación por evaporación súbita.

En la actualidad Canarias se ha convertido en la región europea con el mayor número de plantas desaladoras con un total de 332, de acuerdo con el Informe de Coyuntura en materia de aguas del 2014 hecho por el SIMAC, la mayoría en las islas de la provincia de Las Palmas (286), con presencia de todas las tecnologías comerciales, lo que ha servido en muchos casos para que los propios fabricantes pongan a punto sus tecnologías. La importancia de la desalación de agua en Canarias se refleja en los datos de origen del agua consumida (115.299.000 m³ en 2013), de la cual el agua desalada supuso un 85% del total.

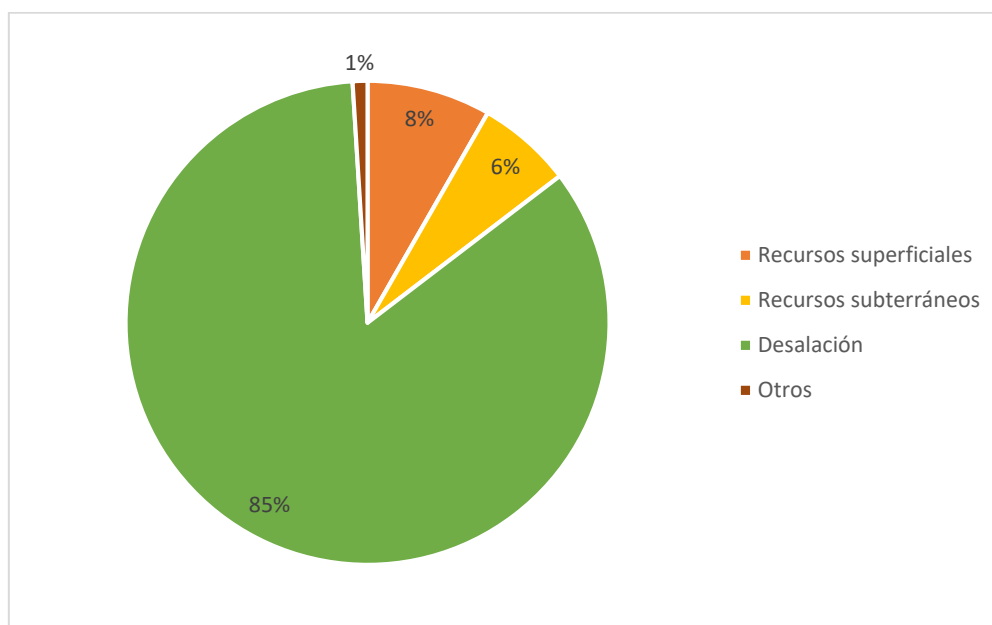


Figura 2. Origen del agua consumida en Canarias en el año 2013 (Informe de Coyuntura en materia de aguas del SIMAC, 2014)

4.3. SITUACIÓN HIDROLÓGICA EN TENERIFE

La situación hídrica de la isla de Tenerife, así como las del resto de islas de la provincia occidental, es muy distinta a las de las islas orientales del archipiélago canario pues en su mayoría se abastece de los recursos subterráneos de los que dispone. Sin embargo, este recurso es insuficiente por sí sólo para hacer frente a la demanda de agua en la isla que, de acuerdo con el Plan Hidrológico de Tenerife, se estableció en el año 2010 en un total de 197,5 hm³, tal y como se puede ver en la tabla 1.

CONSUMOS (hm³/año)	2000	2005	2010
Urbano	69,7	82,6	74,9
Turístico	23,2	26,5	18,1
Industrial + Servicios	6,7	6,8	6,9
Agricultura (**)	98,2	90,7	83,7
Campos de golf	2,5	4,1	3,0
Recursos no utilizados (**)	17,0	8,8	11,0
TOTAL	217,1	219,6	197,5

(**) En 2000 2005 los consumos agrícolas y recursos no utilizados englobaban los errores de cierre del balance

Tabla 1. Evolución de los consumos hídricos en Tenerife (Memoria de Información del Plan Hidrológico de Tenerife, 2015)

Los recursos hídricos subterráneos presentes en ese año fueron de 165 hm³, por lo que fue necesario la contribución al balance hídrico de otros recursos como las aguas superficiales y las aguas depuradas en menor medida (2 hm³ y 9.3 hm³), pero sobre todo de la desalación, que aportó un total 21.2 hm³ en ese año. La contribución de la desalación en el balance hídrico de Tenerife es notable y la tendencia es que dicha contribución aumente pues desde el año 2000 los recursos hídricos subterráneos han descendido, tal y como se ilustra en la tabla 2.

RECURSOS (hm³/año)	2000	2005	2010
Superficiales	0,0	0,5	2,0
Subterráneos	200,4	192,5	165,0
Reutilización	8,7	7,6	9,3
Desalación	8,0	19,0	21,2
TOTAL	217,1	219,6	197,5

Tabla 2. Evolución de los recursos hídricos en Tenerife (Memoria de Información del Plan Hidrológico de Tenerife, 2015)

5. GENERALIDADES

5.1. DESALACIÓN DE AGUA

La desalación es el proceso de separación de minerales disueltos (sales) y otras sustancias indeseables contenidas en las aguas salobres o marinas con el fin de obtener agua adecuada bien sea para el consumo humano, para uso industrial o agrícola.

Los procesos de desalación se han clasificado tradicionalmente en dos grandes grupos en función de su tecnología básica: procesos de desalación mediante membranas y procesos de desalación por destilación (o evaporación). La desalación mediante membranas se basa en el uso de un filtro especial (membrana) para producir agua adecuada para un uso determinado, mientras que en el caso de la destilación se lleva a cabo la evaporación del agua y su posterior condensación para la eliminación de las sales.

En España, actualmente se utilizan mayoritariamente los sistemas de membranas semipermeables de ósmosis inversa ya que en los últimos años se ha conseguido una normalización de las membranas, lo que ha favorecido la competencia y la bajada de precios de la tecnología, que además ha mejorado en su eficiencia y, por tanto, se ha reducido el precio del agua producida. Por otro lado, es en los países del Golfo Pérsico donde la técnica más utilizada sigue siendo la destilación, que es una técnica mucho más costosa desde el punto de vista energético.

Por último, existe otro tipo de tecnología incluida en el grupo de los procesos de membrana, la electrodiálisis, que es relativamente moderna, apropiada para la desalación de aguas salobres y cuya aportación energética es estrictamente eléctrica, concretamente de corriente continua.

5.1.1. COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS

Los procesos de destilación necesitan energía calorífica para provocar el cambio de estado de líquido a vapor, mientras que en la ósmosis inversa se aplica una presión para superar la presión osmótica y en la electrodiálisis se necesita aplicar una carga eléctrica para que se produzca el desplazamiento de

los iones que componen el agua. En el primer caso la aportación de calor es prácticamente independiente de la salinidad del agua, mientras que en el caso de la ósmosis inversa se requiere una mayor presión para superar la presión osmótica del agua a medida que la salinidad de ésta aumenta y en el caso de la electrodiálisis la intensidad de corriente necesaria también es mayor a medida que aumenta la concentración de sales en el agua.

Estas tecnologías aplican concepciones completamente diferentes ya que tanto la osmosis inversa como la electrodiálisis emplean una membrana para realizar la separación y efectúan el proceso a temperatura ambiente. En cambio, la destilación requiere de una considerable aportación calorífica para que se produzca un cambio de estado en el cual existe una pérdida importante de energía. Por ello, siendo este último el proceso de mayor antigüedad, ha ido perdiendo importancia en las últimas décadas en favor de los procesos de membrana, más eficientes energéticamente.

Tecnología	Características
Destilación o evaporación	<ul style="list-style-type: none"> - Tiene un elevado consumo energético - Requiere una elevada inversión inicial - Precisa de una extensión de terreno importante - Su eficiencia es baja - No depende de la salinidad del agua - Necesita una fuente de vapor que según los casos puede o no ser independiente del proceso - Produce un agua de calidad casi pura - Puede acoplarse a una central eléctrica productora de energía
Ósmosis inversa	<ul style="list-style-type: none"> - Tiene el menor consumo energético - Se puede utilizar tanto en agua salobre como de mar - La inversión inicial depende de las características del agua a desalar, pero en general es inferior a la de los otros sistemas - Precisa pretratamientos físico-químicos - Precisa una extensión de terreno de tipo medio - Necesita una fuente exterior de energía - Además de iones se consigue separar bacterias y virus
Electrodiálisis	<ul style="list-style-type: none"> - Tiene un consumo energético de tipo medio que, para aguas de salinidad baja, puede ser similar a la ósmosis inversa - Necesita menores tratamientos químicos que los otros sistemas - Sus necesidades de espacio e inversión son intermedias - Su coste de instalación es superior a la ósmosis inversa - El agua producto es de inferior calidad a la de las otras tecnologías - Su manejo es sencillo en todos los casos

Tabla 3. Comparación de las características de los principales procesos de desalación (Medina San Juan, 2000)

Por todo lo anterior, se entiende que la destilación se emplea específicamente a nivel comercial para desalar agua de mar, la electrodiálisis para desalar agua salobre y la ósmosis inversa tanto para agua de mar como agua salobre.

5.1.2. DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA

El proceso de desalación por ósmosis inversa se basa en el proceso de ósmosis, que es un fenómeno natural por el cual dos soluciones de distinta concentración salina puestas en contacto a través de una membrana semipermeable (permeable al agua, no a las sales) tienden a igualar sus concentraciones. Para ello se produce un movimiento desde la solución más diluida hacia la más concentrada, tal y como se ilustra en la figura 3, que se detiene cuando se alcanza un equilibrio entre ambas concentraciones, obteniéndose un desnivel entre los dos tubos que contienen las soluciones. Dicho desnivel corresponde a la presión osmótica de la solución más concentrada, es decir, a la diferencia de presiones osmóticas entre ambas soluciones.

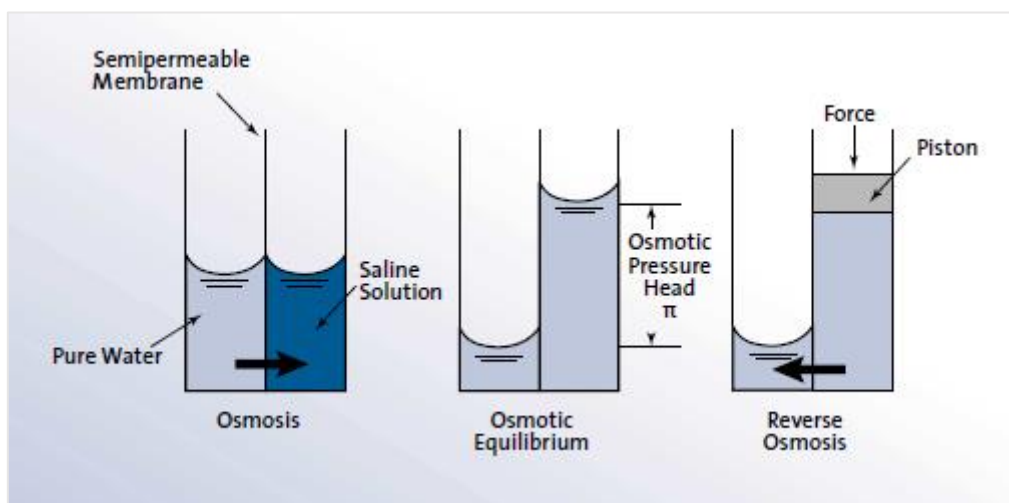


Figura 3. Ósmosis y ósmosis inversa (Documentación técnica de Grundfos sobre bombas para el tratamiento de aguas, 2002)

Si se aplica a la solución salina una presión externa mayor que la presión osmótica se consigue invertir el proceso y el agua de esta solución se desplaza en la dirección contraria a la natural dejando tras de sí una solución más concentrada en sales.

La ósmosis inversa aplicada a la desalación de aguas, tanto salobres como de mar, consiste en esencia en el bombeo del agua de alimentación a alta o media presión, dependiendo si se trata de agua de mar o agua salobre, hacia una membrana semipermeable (3) dando lugar a dos flujos de agua, tal y como se muestra en la figura 4, uno de alta concentración de sales (4) denominado rechazo o salmuera y otro de baja concentración denominado agua producto o permeado (5).

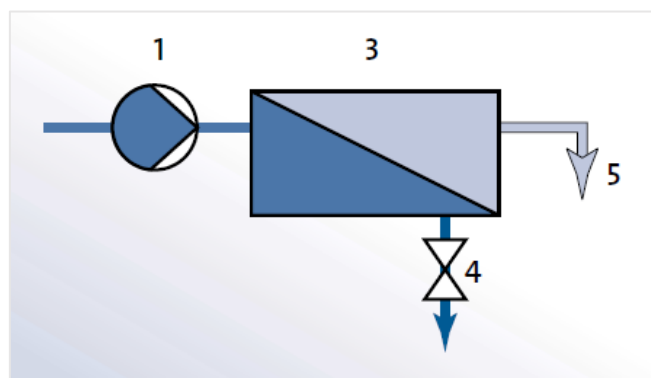


Figura 4. Sistema de desalación por ósmosis inversa de simple etapa (Documentación técnica de Grundfos sobre bombas para el tratamiento de aguas, 2002)

Los elementos fundamentales para poder reproducir el proceso de ósmosis inversa a escala industrial lo constituyen la bomba necesaria para aplicar la presión y la membrana semipermeable, que debe reunir las siguientes características:

- Resistencia a las presiones a las que se somete el flujo de alimentación para invertir el proceso de ósmosis.
- Permeabilidad al agua suficiente para que el producto sea elevado.
- Porcentaje de rechazo de sales elevado para que el producto sea de buena calidad.

5.2. ELEMENTOS BÁSICOS DE UNA PLANTA DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA

5.2.1. CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR

El caudal de extracción y la localización de la toma de agua bruta de alimentación son factores determinantes en el diseño del pretratamiento requerido para el agua de alimentación. Así, el agua de mar tiene una mayor

concentración de sales disueltas en lugares cálidos con poca renovación como en el Mediterráneo, y menor en lugares semicerrados con abundantes aportes continentales como en el mar Báltico. Por otro lado, el caudal de agua bruta de alimentación se puede obtener por medio de dos procedimientos básicos de captación, éstos son la toma cerrada y la toma abierta.

5.2.1.1. TOMA ABIERTA

La captación por toma abierta es un procedimiento al que se recurre cuando las condiciones del terreno no permiten la toma cerrada y se requiere un caudal de agua de alimentación elevado. Existen dos tipos de captación por toma abierta: en canal y mediante emisario submarino. En ambos casos el agua es captada a una determinada distancia de la costa, se recoge en un depósito (no siempre necesario) y se impulsa a la instalación desaladora.

La toma en canal es de menor longitud y generalmente superficial, de modo que está sometida a la acción del oleaje y se ve afectada por la presencia de algas y los contaminantes propios de su emplazamiento. Por ello, se debe instalar a la entrada de la toma los dispositivos de filtración o separación necesarios para evitar sobre todo la entrada de algas y materiales gruesos que podrían romper las bombas.

Si el oleaje o las características de la costa determinan una elevada turbidez y arrastre de contaminación se recurre a la toma abierta mediante emisario submarino, cuya tubería de captación debe sumergirse en el mar a una distancia conveniente para garantizar una profundidad mínima que evite la influencia del oleaje y debe ser anclada al fondo marino siempre que lo permita el perfil del terreno. Además, dicha tubería debe estar hecha de un material resistente a la corrosión y flexible, siendo los más frecuentemente utilizados el polietileno (PE) y el poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV).

En cualquier caso, la toma abierta es un proceso de captación fundamentalmente empleado en instalaciones de gran tamaño y producción (en torno a 250.000 m³/día o superior) debido a que el agua de alimentación se ve afectada por una mayor presencia de sólidos en suspensión, una elevada actividad biológica, una sensibilidad notable a la polución por hidrocarburos y una temperatura variable.

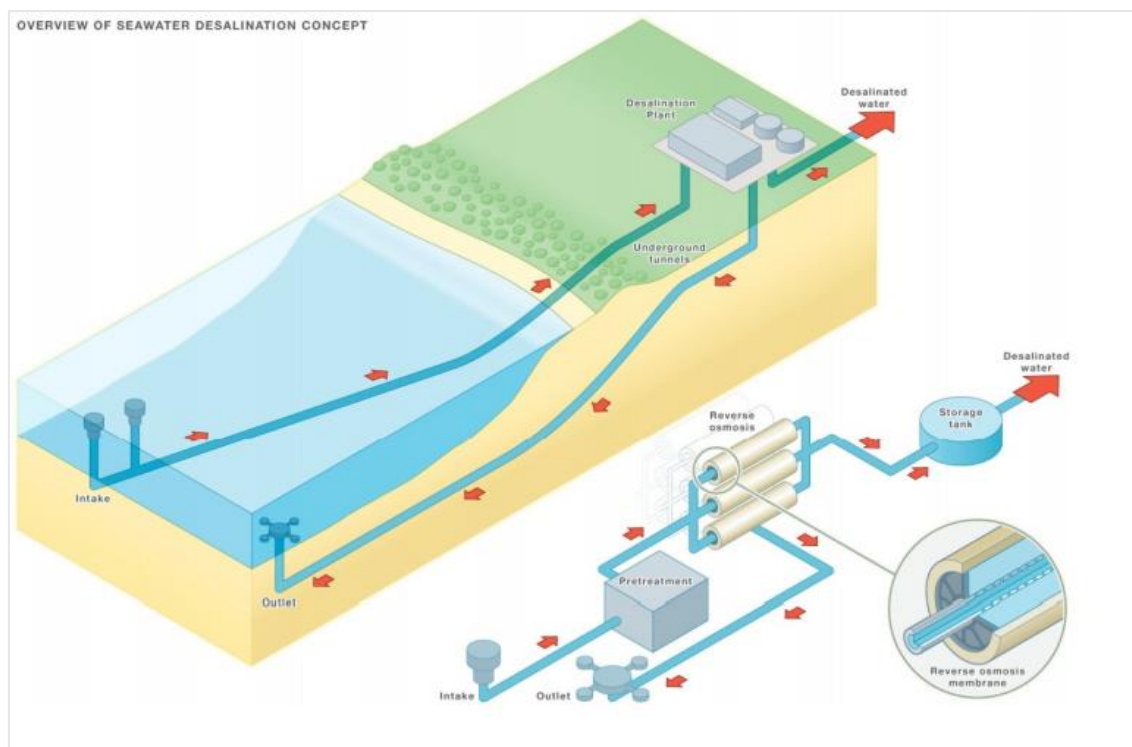


Figura 5. Esquema de una EDAM con toma abierta (Sydney Water)

5.2.1.2. TOMA CERRADA

El proceso de captación por toma cerrada se realiza por medio de pozos aislados o con cántaras de captación. La toma cerrada mediante pozos es la más favorable y para ello se realizan perforaciones por debajo de la cota del agua en el terreno, por lo general de forma circular y diámetros del orden de 350 mm y cuya profundidad puede llegar a superar los 40 metros hasta poder alcanzar la suficiente permeabilidad del terreno que garantice el caudal de extracción demandado. Normalmente estas perforaciones se entuban con tuberías de PVC que cuentan en su último tramo con ranuras por las que pasa el agua.

La captación del agua bruta se realiza, en el caso de los pozos aislados de captación, con bombas sumergibles instaladas en el interior de cada perforación, mientras que en el caso de la solución de pozos con cántara común se recurre a bombas horizontales. Sea cual sea la solución aplicada, con la toma cerrada se logra una escasa o nula actividad biológica, un índice de sedimentación (SDI) bajo, temperaturas estables y un bajo contenido en oxígeno disuelto. Sin embargo, la desventaja principal es la propia permeabilidad del terreno, que dificulta la obtención de grandes caudales. Además, con la toma cerrada pueden darse variaciones en la composición química del agua a lo largo

de los años y contaminación del agua por nitratos, pesticidas y contenidos importantes de otros elementos como el hierro o sílice, que hacen necesario el pretratamiento del agua antes de su paso por las membranas.

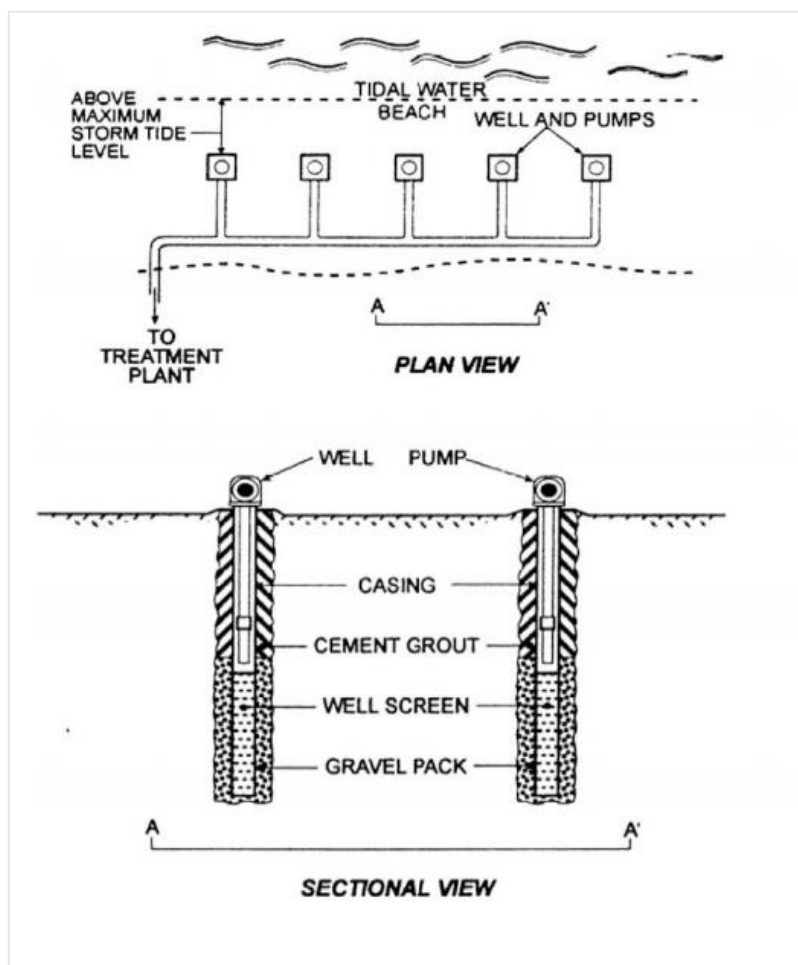


Figura 6. Toma cerrada mediante pozos aislados (Missimer y Wright, 1997)

Por todo lo anterior, la toma cerrada es la más favorable, en particular mediante pozos aislados, y la que se debe construir siempre que el terreno y las condiciones de operación de la planta lo permitan.

5.2.2. PRETRATAMIENTO DEL AGUA DE MAR

El objeto del pretratamiento en las plantas de desalación es adecuar tanto las características físico-químicas como las biológicas del agua captada a las necesidades del proceso de desalación para evitar así la corrosión, la formación de incrustaciones y, en definitiva, el deterioro prematuro de los equipos. Además, este proceso condiciona de manera muy importante los costes de mantenimiento y de explotación de la planta desaladora. Para ello es importante que el

pretratamiento se adecúe a las características y requerimientos del proceso de desalación utilizado.

En el caso del proceso de desalación por membranas, la misión del pretratamiento consiste en reducir al máximo posible el riesgo de atascamiento de las membranas por acumulación de sustancias, materiales y microorganismos sobre su superficie puesto que este tipo de atascamiento reduce la vida útil y la eficiencia de las membranas, empeora la calidad del permeado y produce un incremento de la presión necesaria para su funcionamiento. En concreto, los objetivos del pretratamiento son cinco:

- *Eliminar los sólidos en suspensión*

Las partículas en suspensión pueden provocar el atascamiento de las membranas al ser retenidas en su superficie por filtración mecánica. La valoración del atascamiento que pueden producir las sustancias coloidales del agua se hace con el SDI (*Silt Density Index*) o índice de fouling. Dicho índice es normalmente más bajo en el caso del agua subterránea captada en la toma cerrada que en el del agua superficial captada en la toma abierta.

Para que no haya problemas de atascamiento en las membranas este índice debe ser lo más bajo posible. El valor máximo del SDI generalmente admitido por los fabricantes de las membranas es 5, aunque esto está condicionado al diseño de la instalación y a las instrucciones concretas del fabricante.

- *Evitar la precipitación de óxidos metálicos*

Los óxidos metálicos que se encuentran con más frecuencia en el agua son los óxidos de hierro, manganeso y aluminio. Los dos primeros pueden estar en el agua en varias formas, siendo las susceptibles a acumularse y atascar las membranas el hierro férrico y el manganeso en su estado IV de oxidación.

- *Evitar la precipitación de sales minerales*

La precipitación de sales en las membranas se produce cuando su concentración en el agua rechazo supera el producto de solubilidad. Las sales que normalmente pueden crear problemas de precipitaciones son los sulfatos de calcio, bario y estroncio, el carbonato cálcico, el fluoruro de calcio y la sílice.

- *Reducir el contenido de materia orgánica del agua*

La materia orgánica que puede adherirse en la superficie de la membrana y provocar su atascamiento puede ser de origen natural procedente del humus vegetal (lavado de turbas, ácidos húmicos y tánicos, etc.) o proveniente de la contaminación, como sería el caso de los aceites, grasas y otros compuestos orgánicos.

- *Eliminar o reducir la actividad biológica del agua de entrada*

Cuando el agua de aportación contiene microorganismos y suficientes nutrientes ocurren los crecimientos microbiológicos en las membranas que atascan las membranas si éstas no son biodegradables y si lo son pueden destruir la capa activa de ellas, de modo que pueden llegar a perder sus propiedades.

Para alcanzar los objetivos mencionados se aplican unos tratamientos físico-químicos al agua bruta captada, que son más intensivos en el caso de que el agua producto sea para consumo humano. Los procesos de pretratamientos más utilizados en las plantas de membranas son los siguientes:

- *Acidificación y dosificación de inhibidores de la incrustación*

Para evitar la precipitación del carbonato cálcico se acidifica el agua, ya que la disminución de pH aumenta la solubilidad de esta sal, o se usan antiincrustantes, esto último es lo que se suele realizar especialmente en las instalaciones de tratamiento de aguas salobres. Además de ser efectivos con los carbonatos, los antiincrustantes sirven también evitar la precipitación de los sulfatos cálcicos, de bario y de estroncio, de la sílice y óxidos metálicos (hierro y manganeso, fundamentalmente).

- *Oxidación*

La oxidación es un procedimiento que se emplea para eliminar los elementos y compuestos reductores (sustancias orgánicas, hierro ferroso, manganeso divalente y el sulfuro de hidrógeno) que pueden estar presentes en el agua, sobre todo si es de origen subterráneo. Los oxidantes comúnmente utilizados son el hipoclorito sódico y el permanganato potásico. Una vez

realizado el proceso de oxidación siempre es necesario una etapa de filtración para eliminar las formas insolubles oxidadas.

- *Coagulación-floculación*

La coagulación-floculación sirve, junto a la decantación y la filtración, para eliminar las sustancias coloidales (orgánicas e inorgánicas) mediante la adición de una sal metálica o coagulante que neutraliza la carga asociada a las partículas coloidales. Generalmente se emplean como coagulante sales de aluminio o de hierro.

- *Decantación*

El proceso de decantación se realiza cuando el agua, tras la coagulación-floculación, presenta una concentración de materia floculada superior a 30-50 mg/L. Esta etapa se puede omitir y filtrar directamente si el contenido en materia floculada es inferior a 20-30 mg/L. Los decantadores eliminan materia en suspensión y la materia floculada por sedimentación gravitatoria.

- *Flotación*

La flotación es un proceso alternativo a la decantación por el que se eliminan determinados tipos de sólidos que son capaces de flotar mediante la inyección de microburbujas de aire.

- *Filtración por lechos (Filtros de arena)*

Se utilizan filtros de arena de presión de tamaño acorde con el volumen a tratar y se colocan generalmente por conjuntos en paralelo y dispuestos de manera horizontal o vertical. El movimiento del agua en estos filtros es siempre en sentido vertical, penetrando por la parte superior del filtro, así el agua desciende a través de la capa o capas del medio filtrante que retienen los materiales sólidos y algas que pueda transportar. En su parte inferior llevan un colector o plataforma provisto de boquillas que recogen el agua filtrada.

La limpieza de estos filtros se realiza con aire y agua, por lo que es necesario un equipo especial formado por bombas y compresores de aire de capacidad adecuada al tamaño del filtro.



Figura 7. Depósito con filtración de arena horizontal (Dimasa Grupo)

- *Filtración por cartuchos*

La filtración por cartuchos es el mínimo pretratamiento necesario en una planta de membranas para garantizar un nivel de filtración comprendido entre 1 y 5 μm , de este modo se asegura la protección de las membranas ante la posibilidad de que el agua arrastre macropartículas en suspensión.



Figura 8. Filtro de cartuchos (Dimasa Grupo)

Los filtros de cartuchos son depósitos metálicos recubiertos interiormente, de disposición vertical y que utilizan como medio filtrante unos cartuchos o bujías constituidos por un eje hueco provisto de orificios sobre el que se enrolla un hilo

de polipropileno (u otro material plástico) a unas determinadas tensiones que garantizan la separación de sólidos de tamaños no menores de 1 µm. El flujo del agua en los cartuchos se realiza desde la parte exterior hacia el eje, donde se recoge el agua filtrada. El agua entra generalmente por la parte inferior del filtro y después de atravesar los cartuchos se recoge en su parte superior.

Los filtros de cartucho son elementos de seguridad inmediatamente anteriores a las membranas y no deben utilizarse para una eliminación sistemática de partículas en suspensión. Por tanto, a la salida de los procesos físico-químicos previos a la filtración por cartuchos las aguas deben presentar una turbidez inferior a 1 NTU (acrónimo en inglés de Unidad Nefelométrica de Turbidez). Finalmente, se consiguen unos valores de SDI adecuados para las membranas usadas en desalación.

- *Desinfección*

La desinfección del agua es un proceso destinado a reducir al máximo el posible atascamiento de las membranas por crecimientos microbiológicos y que se lleva a cabo por dosificación de un oxidante-desinfectante químico (cloro o sus derivados normalmente) o mediante procesos físicos como puede ser la radiación ultravioleta, si se desea evitar la adición de oxidantes al agua.

- *Reducción o decloración*

En el caso de emplear desinfectantes y de que se cuente con un sistema de membranas sensibles a los oxidantes, es necesario la adición de un agente reductor al agua para evitar que el agente oxidante alcance las membranas.

Los compuestos de azufre son los reactivos más empleados en la decloración, especialmente el dióxido de azufre o las soluciones acuosas de compuestos de sulfito (bisulfito, metabisulfito, etc.).

- *Adsorción*

La contaminación del agua por materia orgánica, sea de origen natural o por contaminación, se puede reducir por adsorción utilizando filtros de carbón activo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los lechos de carbón activo, que también eliminan eficazmente el cloro libre, son susceptibles de albergar

colonias de microorganismos que provocarían problemas de ensuciamiento en las membranas de ósmosis inversa.

5.2.3. NÚCLEO DE DESALACIÓN

5.2.3.1. MEMBRANAS

La membrana es una lámina delgada, hecha normalmente de acetato de celulosa, poliamida o polisulfona, que por sí sola no soportaría los esfuerzos a los que se le somete en el proceso de separación. Por tanto, la membrana de ósmosis inversa se estructura y empaqueta cuidadosamente para su integración en las unidades de proceso con el objetivo de maximizar el flujo de agua a través de la membrana minimizando el paso de sales.

Las membranas de ósmosis inversa desarrolladas a lo largo de los años se han estructurado en su configuración en torno a cuatro tipos:

- *Membranas de tipo plano*

Este tipo de membranas es el más sencillo y el primero en utilizarse. Las membranas de tipo plano están constituidas por una lámina unida a un marco o placa de plástico con canales ranurados en su superficie, que puede ser circular o rectangular y que actúa de soporte de la membrana y le confiere rigidez y resistencia. Los conjuntos placa-membrana se colocan en un recipiente a presión, que permite el contacto del agua con todos los lados de la placa.

La película empleada como membrana no difiere de las otras empleadas en otras configuraciones, por lo que sus características unitarias de rechazo y caudal son similares a otras. Sin embargo, este tipo de membranas presentan una pequeña capacidad productiva, de modo que se deben colocar un gran número de membranas colocadas en pilas, que resultan voluminosas, pesadas e incómodas para operar y encarecen enormemente su coste. Este diseño se utiliza fundamentalmente en procesos químicos y para el pretratamiento de productos alimenticios (cerveza, zumos, etc.).

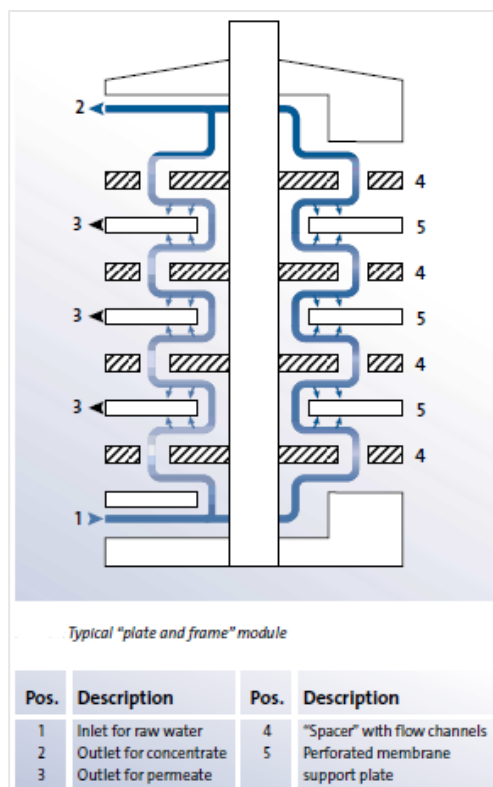


Figura 9. Esquema de una membrana de configuración plana (Documentación técnica de Grundfos sobre bombas para el tratamiento de aguas, 2002)

- *Membranas tubulares*

Esta configuración representa una alternativa a la de tipo plano y en ella la membrana va alojada dentro de un tubo, normalmente de PVC, que soporta la presión. Durante el funcionamiento, el agua a presión circula por el interior de los tubos que contienen la membrana; el agua producto pasa a través de la membrana y del tubo poroso, cayendo a un depósito de recogida para su retirada del sistema.

El sistema tubular presenta una superficie de membrana por unidad de volumen reducida, tienen una capacidad de producción de permeado pequeña incluso disponiendo varios en paralelo, y requiere unos gastos de inversión elevados. El uso de estas membranas está relacionado a las aguas o líquidos de elevada turbiedad en procesos industriales ya que las membranas tubulares pueden limpiarse fácilmente tanto por medios mecánicos como hidráulicos.

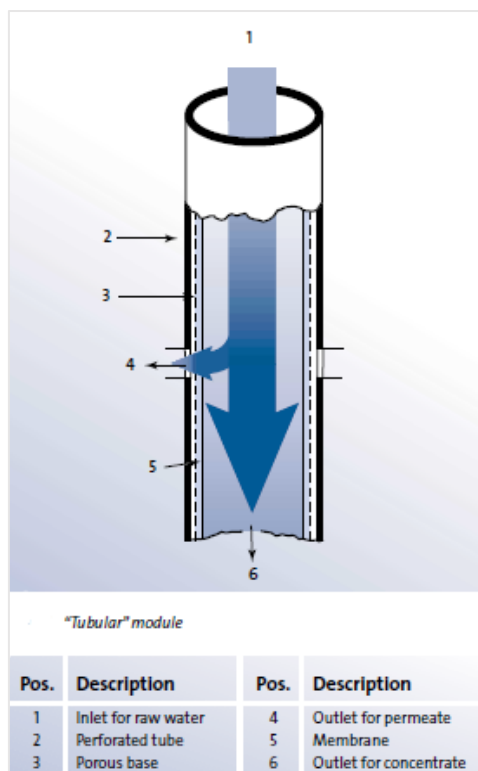


Figura 10. Esquema de una membrana de configuración tubular (Documentación técnica de Grundfos sobre bombas para el tratamiento de aguas, 2002)

- *Membranas de fibra hueca*

Las membranas de fibra hueca consisten en minúsculos tubos huecos del tamaño de un cabello humano (84 μm). Esta delgadez permite su empaquetamiento en poco espacio, dentro de un tubo cilíndrico (hecho de un material plástico de alta resistencia a la corrosión como el PRFV) que constituye la carcasa protectora y permite la circulación de la solución a desalar. Las fibras se colocan paralelas alrededor de este tubo, doblándose en unos de sus extremos y retornando al otro, de forma que la longitud de cada fibra es aproximadamente el doble que la del tubo.

El flujo dentro del tubo a presión se reparte de forma radial, a través del conjunto de fibras, de modo que el permeado penetra a través de las paredes de la fibra y fluye por el hueco de ésta y se recoge a través de un extremo del tubo a presión. Por otro lado, el agua que no ha pasado a través de la membrana arrastra las sales hacia la salida del concentrado dispuesto en el extremo opuesto.

Esta configuración representa la mayor densidad posible de empaquetamiento de membrana con la consiguiente mayor relación de

producción de agua por volumen ocupado. Sin embargo, su coste de fabricación es superior a las de enrollamiento en espiral y, debido al poco espacio entre las fibras, esta configuración resulta ser la más propensa al ensuciamiento.

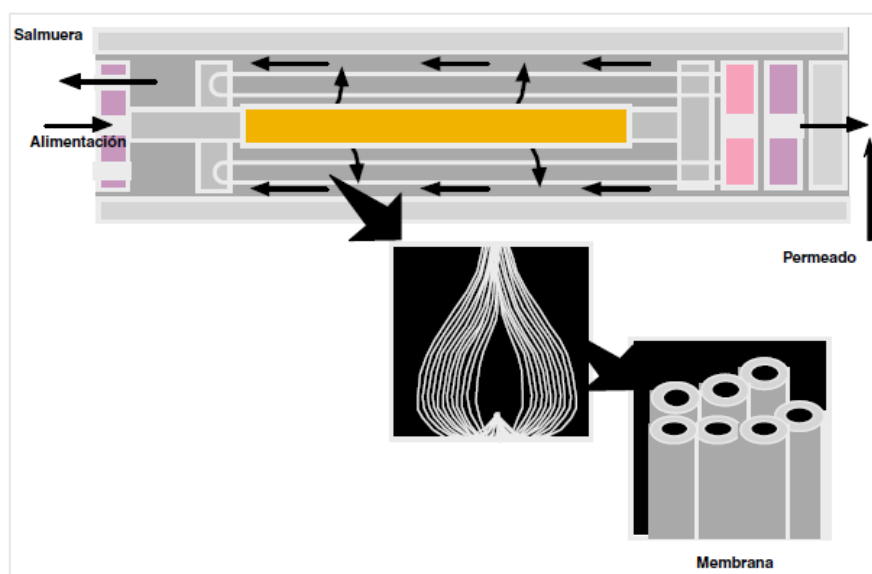


Figura 11. Esquema de una membrana de fibra hueca (Guía de desalación del Ministerio de Salud y Política Social, 2009)

- *Membranas de enrollamiento en espiral*

En este caso las membranas están formadas por varias láminas rectangulares enrolladas alrededor de un eje cilíndrico provisto de perforaciones que permiten recoger el agua producto. Dos de estas láminas u hojas se agrupan entre sí, pero opuestas y separadas por un espaciador que actúa como canal para el flujo de permeado. Ambos lados y uno de los extremos de este conjunto se sellan mediante unos cordones o líneas de pegamento para formar un conjunto de varias capas a modo de «sobre». El extremo abierto (no pegado) está conectado con el tubo encargado de recoger el permeado, alrededor del cual se enrolla el sobre para formar la espiral. Junto al sobre, se enrolla también una red plástica (espaciador), de modo que queden separadas las superficies de membrana y se mantenga de ese modo suficiente espacio libre para el flujo de agua de alimentación. El elemento así constituido se completa con unas piezas plásticas en los extremos para evitar un posible “efecto telescópico” o “*telescoping*”, es decir, el desplazamiento interno de las distintas láminas de componentes, y se cubre exteriormente con un recubrimiento a base de epoxy-fibra de vidrio que asegura el conjunto.

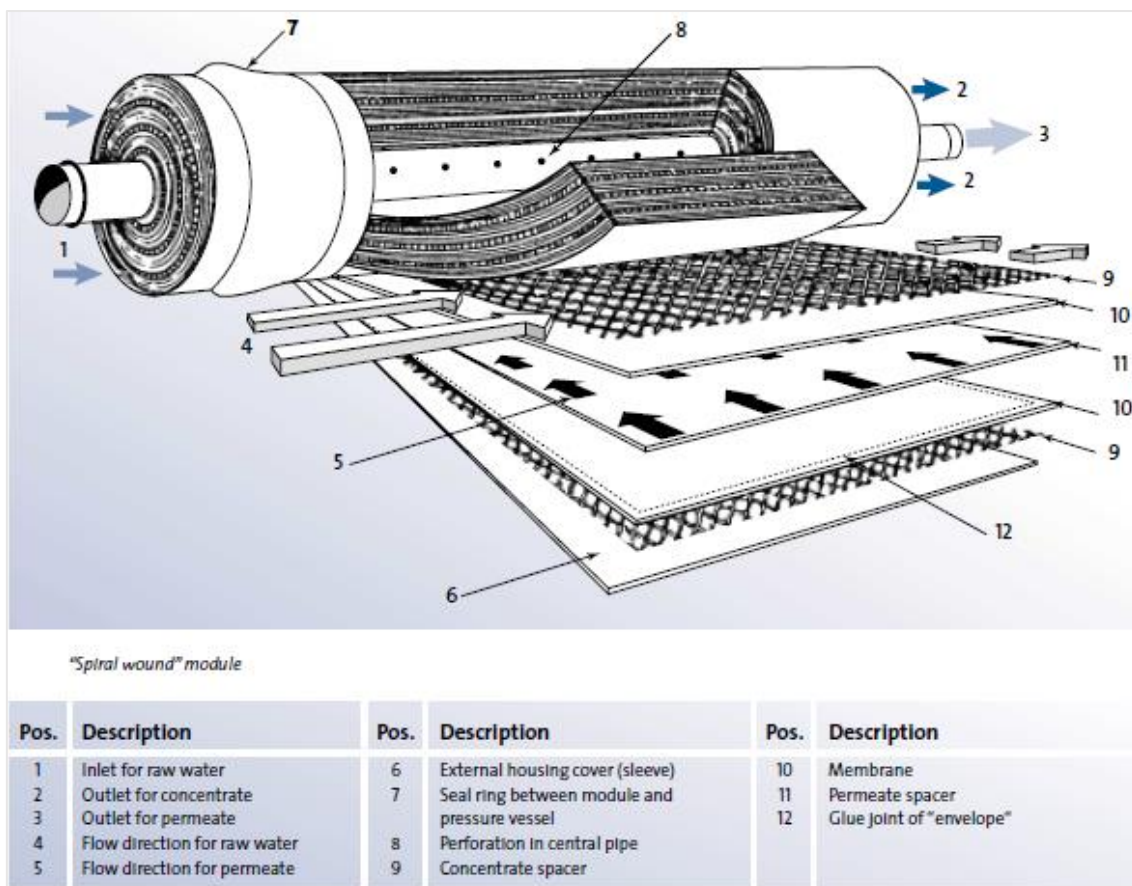


Figura 12. Esquema de una membrana de enrollamiento en espiral (Documentación técnica de Grundfos sobre bombas para el tratamiento de aguas, 2002)

Por último, las membranas se disponen en recipientes cilíndricos conocidos como tubos de presión, capaces de soportar las elevadas presiones de operación. La alimentación se sitúa en un extremo y fluye en paralelo a la dirección del tubo que recoge el permeado. Parte del agua fluye a través de la membrana, recorre un camino espiral y es recogida en el tubo de permeado. El agua que no pasa a través de la membrana circula a lo largo del elemento paralelamente al tubo de permeado, arrastrando las sales hacia la salida de concentrado situada en el extremo opuesto del tubo de presión.

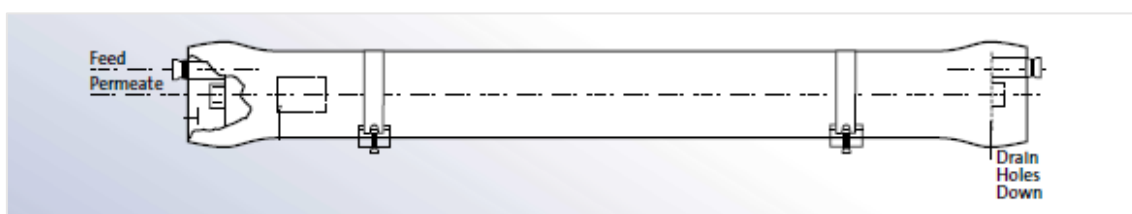


Figura 13. Tubos de presión para membranas de enrollamiento en espiral (Documentación técnica de Grundfos sobre bombas para el tratamiento de aguas, 2002)

En la actualidad, en tratamientos de desalación de agua tanto salobre como de mar para abastecimientos urbanos y agrícolas se usa únicamente las membranas de fibra hueca y de enrollamiento en espiral, siendo esta última la dominante y la de mayor implantación.

5.2.3.2. BOMBA DE ALTA PRESIÓN

El corazón del sistema de ósmosis inversa es la bomba de alta presión, que se encarga de aportar al agua de alimentación la presión suficiente para superar la presión osmótica y además alcanzar la producción deseada. Dado que la ósmosis inversa permite la desalación tanto de aguas salobres como de mar y la presión osmótica a vencer depende de la salinidad del agua a tratar, las presiones de operación de estas bombas son variables, especialmente teniendo en cuenta la variedad de membranas existentes y los continuos avances que realizan los fabricantes, que se traduce fundamentalmente en la aplicación de presiones cada vez menores.

La selección de la bomba obedece fundamentalmente al estudio de dos variables: la presión de bombeo necesaria y el caudal de producción deseado. Sin embargo, se hace necesario tener en cuenta otros aspectos de considerable importancia a la hora de su selección, como son el rendimiento, los materiales de construcción, el mantenimiento, nivel de ruido y vibraciones, su coste, etc.

Las bombas de alta presión (BAP) que se utilizan son fundamentalmente de dos tipos: bombas de desplazamiento positivo y bombas centrífugas.

- *Bombas de desplazamiento positivo*

Hay dos tipos principales de este tipo de bombas, las helicoidales y las de pistones.

Las *bombas helicoidales o de tornillo* son bombas de desarrollo horizontal en las que el eje o rotor tiene forma de hélice excéntrica que les permite un funcionamiento sin vibraciones ni turbulencias. Son autocebadas, rotativas y con solo dos elementos (rotor y estátor), lo que le confiere gran sencillez. Para altas presiones de 70 bar y capacidades de hasta 14 m³/h sus velocidades de funcionamiento son bajas, 800 rpm, mientras que para caudales pequeños de 1 a 3 m³/h las velocidades son de 2.000 a 2.500 rpm. Las eficiencias para altas

presiones son bajas en comparación con otras bombas, pero son muy seguras en su funcionamiento y fáciles de mantenimiento. Aunque pueden tener capacidades de hasta 250 m³/h y 80 bar, su mayor aplicación está en caudales y presiones medias, de hasta 40 kg/cm², es decir, en aguas de salinidades medias.

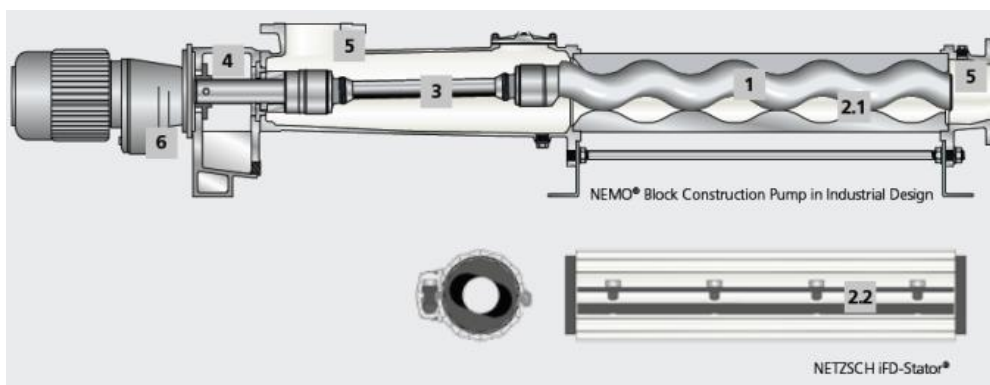


Figura 14. Bomba de tornillo excéntrico (Netzsch)

Por otro lado, las *bombas de pistones* son bombas muy robustas y con un alto rendimiento teórico del 90%, tanto para bombas grandes como pequeñas, debido a una alta eficiencia volumétrica (100%). Según el fabricante, con estas bombas se pueden conseguir caudales tan pequeños como 3 m³/h hasta unos 100 m³/h y presiones entre los 20 y 80 bar. Su campo de aplicación está en instalaciones medianas y sobre todo pequeñas, aunque debido a los altos rendimientos que presentan se ha intentado su introducción en instalaciones de mayor tamaño, pero los resultados no son tan favorables debido a los mayores problemas mecánicos que presentan (mayor abrasión que en las centrífugas y vibraciones importantes).

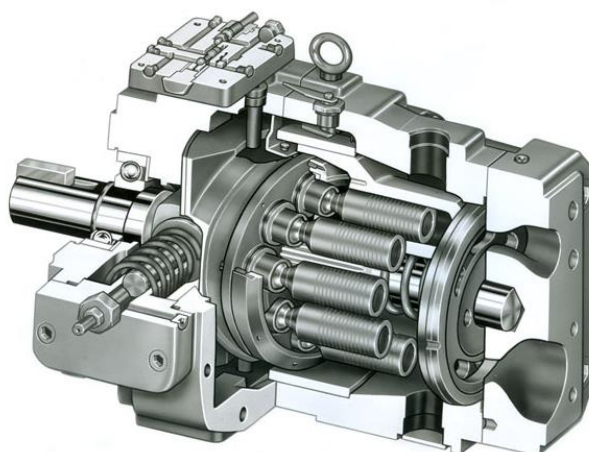


Figura 15. Bomba de pistones (COHA-SAS)

- *Bombas centrífugas*

Las bombas centrífugas son las más utilizadas y conceptualmente las más simples. Constan de un impulsor o rodete que gira en el interior de una carcasa mediante un eje que es accionado desde el exterior por un motor de accionamiento eléctrico para poder aportarle al flujo energía tanto de presión como de velocidad tras su paso por el rodete.

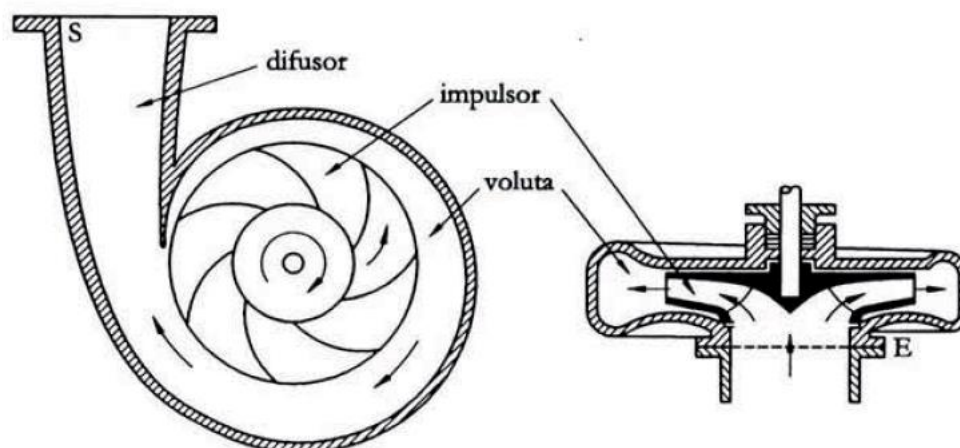


Figura 16. Esquema de una bomba centrífuga (Agüera Soriano, 1996)

Las bombas centrífugas tienen rendimientos hidráulicos algo inferiores a los de las otras bombas, pero su fiabilidad es mucho mayor y necesitan poco mantenimiento. Se suele utilizar una válvula reguladora en la línea de descarga de la bomba para el control de la presión a las membranas de ósmosis inversa y en ocasiones una válvula de contrapresión para recirculación del caudal en exceso. Actualmente, se utilizan fundamentalmente dos tipos de bombas centrífugas en las instalaciones de desalación por OI, que son las multietapas de segmentos y las de cámara partida.

Las *bombas de segmentos* (o bombas de sección anular) constan de módulos hidráulicos (etapas) en forma de aros relativamente estrechos y cada módulo dispone de un impulsor, un difusor de varias hojas y un anillo para permitir el paso de varillas o tornillos. A través de estos, cuatro largos pernos sujetan los módulos entre las cajas exterior e interior. El número de módulos varía en función de la presión de la bomba.

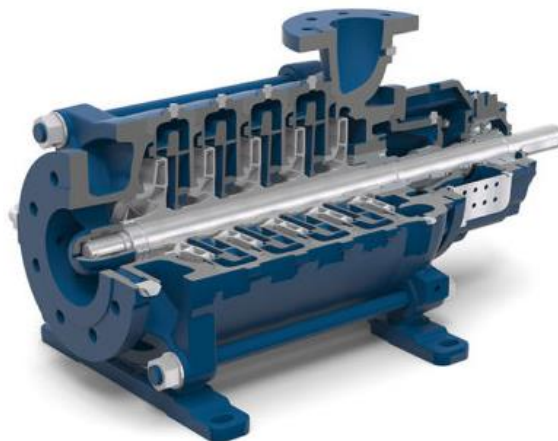


Figura 17. Bomba multietapa de segmentos (Lowara)

Las *bombas de cámara partida* tienen el cuerpo formado por dos carcasas que se disponen horizontalmente una sobre la otra, uniéndose mediante una serie de pasadores o tornillos colocados verticalmente. Las tuberías de aspiración e impulsión quedan incorporadas a la mitad inferior de la bomba para facilitar su montaje y desmontaje. Interiormente la bomba está formada por una serie de cámaras, cuyo número depende de la presión requerida, en la que giran unos impulsores distribuidos simétricamente respecto al centro de la bomba y colocados en posición para asegurar su equilibrio.

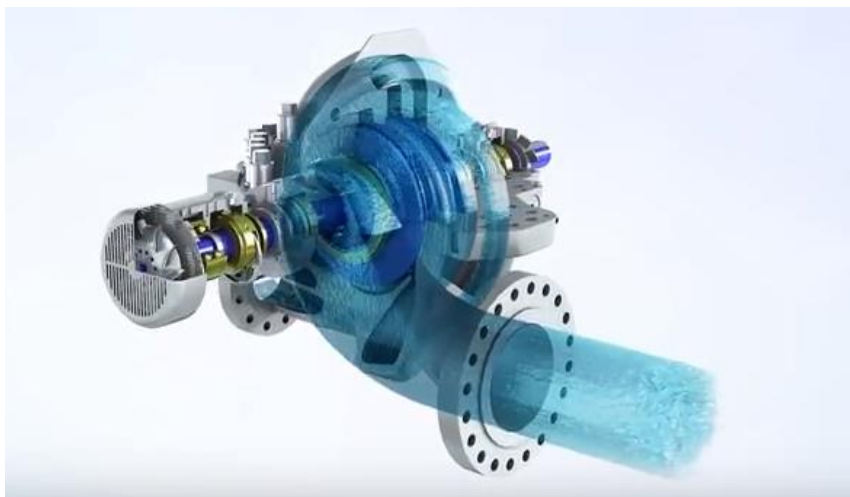


Figura 18. Bomba multietapa de cámara partida (Sulzer)

Las bombas de cámara partida tienen rendimientos equivalentes a las de segmentos ya que se trata de dos concepciones de un mismo modelo de bombas, diferenciándose en la facilidad que las de segmento ofrecen en su acceso al interior para mantenimiento. Sin embargo, su mayor inconveniente es

el precio, pues al no ser un diseño específico de instalaciones desaladoras, incorporan una serie de elementos de seguridad importantes cuando se trabaja a muy elevadas presiones que no resultan tan necesarios para la ósmosis inversa.

5.2.3.3. RECUPERADOR DE ENERGÍA

De la membrana semipermeable salen dos flujos, uno es el agua permeada, cuya presión es cercana a la atmosférica, y el otro es el rechazo, cuya presión es alta y ligeramente inferior a la presión del agua salada a la entrada de la membrana. Actualmente en las estaciones de desalación de agua de mar está ampliamente extendido el uso de equipos con los que aprovechar ese potencial energético para reducir así el consumo de energía de la bomba de alta presión y, en definitiva, los costes de operación.

Para el aprovechamiento de la energía de presión de la salmuera existen cuatro tecnologías: la turbina Francis (en desuso por su baja eficiencia), la turbina Pelton, el conjunto bomba-turbina (o turbocharger) y el intercambiador de presión, siendo esta última la de uso más extendido en los últimos años.

- *Turbina Francis*

La turbina Francis fue el primer equipo de recuperación de energía en surgir y consiste en una bomba invertida que es movida por la presión y el caudal del rechazo. Este tipo de equipo se caracteriza por su sensibilidad a las variaciones de caudal ya que éstas tienen más repercusión en la eficiencia de una turbina que en la de una bomba debido a la forma de sus respectivas curvas de rendimiento.



Figura 19. Ilustración de una turbina Francis (Flovel)

Generalmente una o dos turbinas Francis son movidas por el flujo de uno o dos colectores que recogen el rechazo de todos los bastidores, de modo que uno o dos trenes de producción estarían dotados de esta turbina que se conecta a un motor que alimenta a su vez a la bomba de alta presión.

- *Turbina Pelton*

Es una turbina con álabes en forma de cuchara sobre los que actúa el flujo de rechazo. Su disposición en una línea de producción es igual que la descrita para una turbina Francis. Sin embargo, en comparación con dicha turbina, la turbina Pelton tiene rendimientos superiores en la recuperación de energía (88% frente a 77%) y admite variaciones en la presión de entrada a la turbina sin que esto afecte considerablemente al rendimiento.

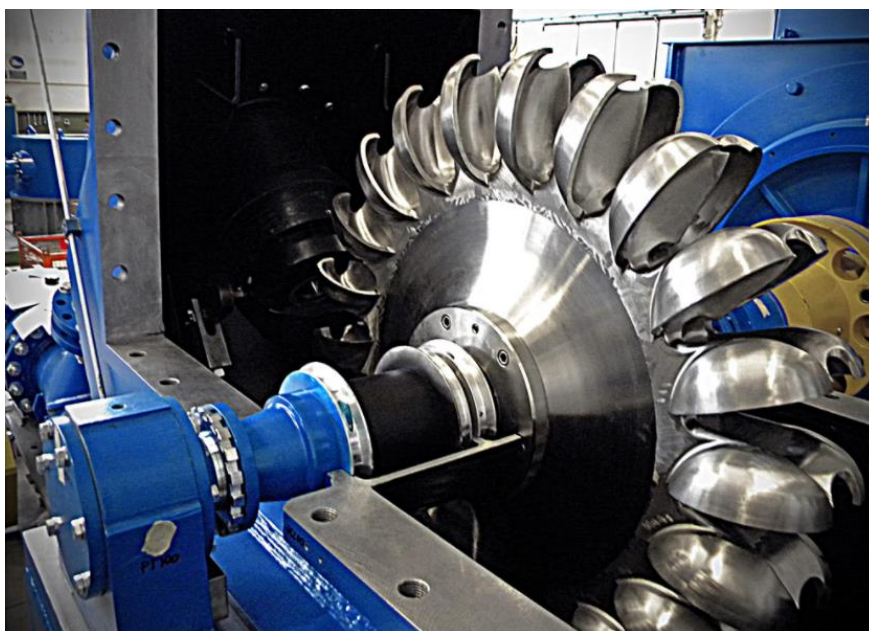


Figura 20. Turbina Pelton (Zeco Turbines)

- *Turbocharger*

El *turbocharger* o conjunto bomba-turbina convierte la energía de presión hidráulica del rechazo (G) en energía mecánica a través de una turbina. Dicha energía se usa para accionar una bomba, que comparte eje con la turbina, y elevar así la presión del agua de alimentación (C). Se trata de un impulso adicional ya que previamente la bomba principal proporciona un mayor impulso de presión (A-C) al agua de alimentación.

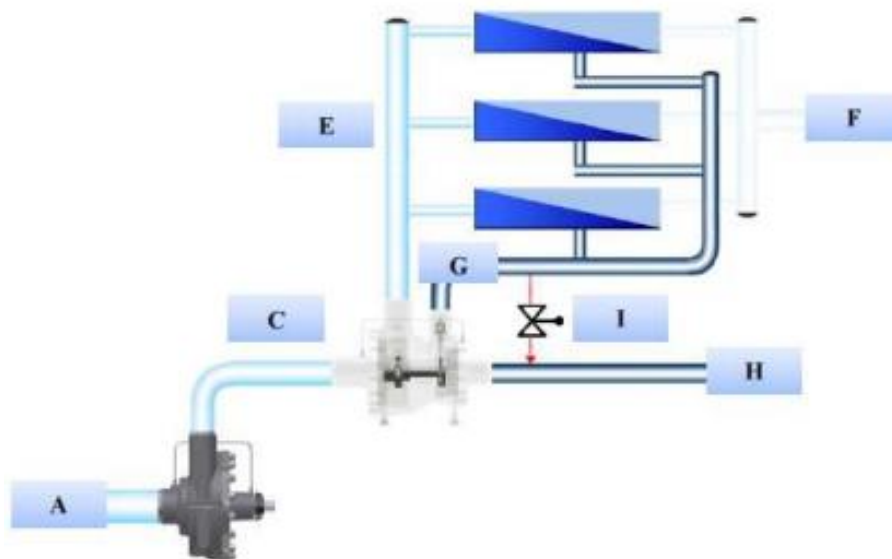


Figura 21. Sistema de ósmosis inversa con Turbocharger (Energy Recovery Inc.)

- *Intercambiador de presión*

Los intercambiadores de presión son dispositivos que transfieren directamente la alta presión de la salmuera de rechazo al agua de alimentación sin convertirla previamente en energía mecánica de rotación, lo que permite alcanzar rendimientos altos no menores del 90%. Según su funcionamiento se distinguen dos tipos de Cámaras de Intercambio de Presión (CIP) disponibles en el mercado: las de *desplazamiento positivo* y las de *desplazamiento rotativo*.

En ambos casos el proceso es básicamente el mismo, iniciándose éste con la introducción de la salmuera a alta presión y el agua de alimentación a baja presión simultáneamente en la cámara isobárica. En ella se produce un intercambio de presión entre ambas corrientes, de tal modo que a medida que se reduce la presión de la salmuera se aumenta la presión del agua de alimentación. Luego el agua de alimentación a alta presión que sale de la cámara isobárica pasa por una bomba booster para aumentar ligeramente su presión hasta alcanzar la presión de funcionamiento de la bomba de alta. Por otro lado, la salmuera a baja presión (debido a que ha cedido su presión al agua de alimentación) es desplazada al mismo tiempo de la cámara y enviada al exterior por el agua de alimentación que entra en la cámara a baja presión y de nuevo se repite el proceso.

En el caso de los intercambiadores de presión de *desplazamiento positivo*, hay dos cámaras en paralelo, cada una realizando uno de los dos pasos de forma alternada gracias a unas válvulas con las que se da paso a una corriente u otra. Algunos fabricantes realizan el contacto entre agua de mar y salmuera directamente ya que, gracias a la diferencia de salinidad entre ellas, hay también una diferencia de densidades y de viscosidades, lo que permite realizar la operación de esta forma. Otros fabricantes prefieren situar un pistón separador entre ambos fluidos que realiza un cierre hermético. Finalmente, otros sitúan un pistón flotante entre ambos fluidos que, sin realizar un cierre hermético, los mantiene semi-separados.



Figura 22. CIP de desplazamiento positivo DWEER (Flowserve)

Por otro lado, las cámaras de *desplazamiento rotativo* no disponen de válvulas que dan paso a una corriente u otra, sino que son las propias cámaras mediante una serie de canales abiertos en la estructura del rotor las que dan paso a medida que éste gira a las diferentes corrientes. Por otro lado, en este sistema el contacto entre los fluidos es directo, no existiendo una separación física (pistón) entre ambas corrientes. Por ello, se produce una mezcla entre las corrientes mayor que en el caso de los sistemas de desplazamiento positivo, llegando a ser del 2% al 6%.

El proceso realizado en las cámaras de desplazamiento rotativo consta de 4 etapas, en la primera etapa empieza el llenado de la tobera con agua de mar

a baja presión, en la segunda etapa se produce la expulsión de la salmuera a baja presión debido al ingreso del agua de mar en la tobera, la tercera etapa empieza con el llenado de la tobera con salmuera a alta presión y la cuarta y última etapa termina con la expulsión del agua de mar a alta presión hacia el bastidor debido a la transferencia de presión de la salmuera. Al terminar la cuarta etapa se ha realizado un ciclo y de nuevo comienza la primera etapa

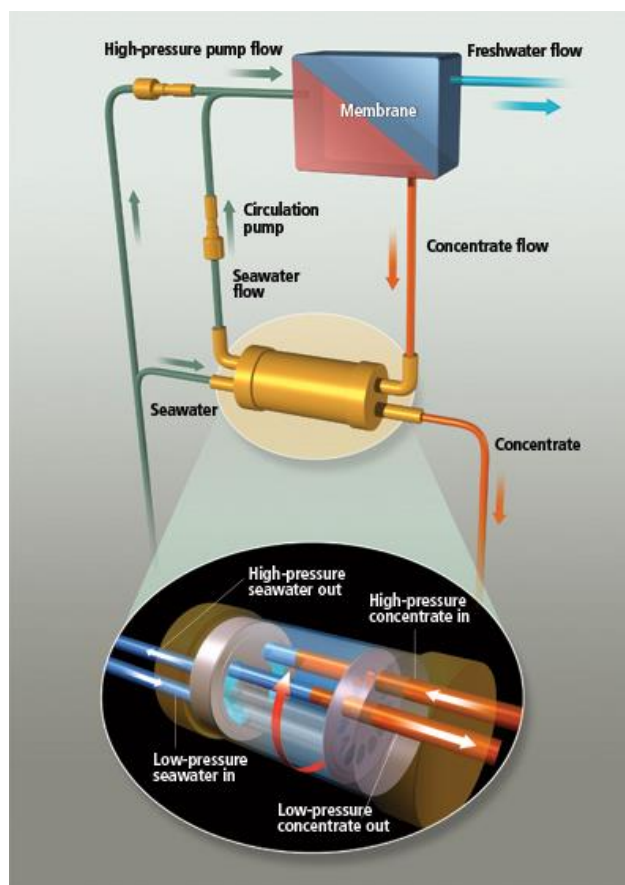


Figura 23. CIP de desplazamiento rotativo (Energy Recovery, Inc.)

5.2.3.4. BOMBA BOOSTER

Son por lo general bombas centrífugas de desarrollo horizontal y provistas de diferentes etapas o impulsores que se van agregando en función de la presión requerida. Las bombas auxiliares o booster son las encargadas de terminar de elevar la presión del agua de alimentación tras su paso por el intercambiador de presión, del que no sale a la presión de descarga de la BAP sino un tanto inferior.

Tienen diámetros relativamente pequeños, con impulsores estrechos que permiten aumentar las eficiencias para caudales pequeños frente a las que se obtendrían con bombas centrífugas normales. Con este desarrollo se trata de

acercar a las características de eficiencia de las bombas de pistones, salvando los inconvenientes que éstas tienen en relación con vibraciones, poca flexibilidad en cuanto a caudales y presiones, y vida útil relativamente corta.

5.2.4. POSTRATAMIENTO DEL PERMEADO

Las aguas desaladas generalmente tienen un marcado carácter agresivo debido a su baja dureza (bajo nivel de minerales) y a su baja alcalinidad, por lo que requieren un tratamiento posterior para su corrección antes de ser distribuidas.

El tipo de tratamiento de corrección, así como su alcance, dependen fundamentalmente del proceso de desalación utilizado y de la calidad del agua tratada obtenida. Se distinguen tres actuaciones fundamentales en el caso del agua desalada de origen marino: descarbonatación, acondicionamiento químico y la post-cloración.

- *Descarbonatación o desgasificación.*

Si en el pretratamiento se ha empleado gas carbónico para rebajar el pH y evitar la aparición de carbonatos, se producirá una gran cantidad de CO₂ (carbónico) que quedará en disolución y atravesará con facilidad la membrana apareciendo en el agua producto. El carbónico puede provocar una disminución del pH del agua que aumentaría su agresividad. Mediante la desgasificación se puede reducir la concentración de CO₂ hasta alcanzar valores de pH de equilibrio en los que el índice de Langelier (LSI) se sitúe en el intervalo de $\pm 0,5$. De ese modo, el pH quedaría ajustado en el intervalo marcado por la vigente legislación de aguas de consumo humano (RD 140/2003).

La eliminación del carbónico se realiza mediante el descarbonatador, consistente en una torre en la que el agua entra por la parte superior mediante unos difusores y se filtra a través de un lecho de material (normalmente anillos de Raschig o coque) a contracorriente de un caudal de aire que arrastra el gas en disolución evacuándolo a la atmósfera por la parte superior de la torre.

- *Acondicionamiento químico.*

Dada la gran capacidad de eliminación de las membranas, el agua producida no tiene más que algo de cloruro sódico disuelto. En estas condiciones

el agua no es apta para determinados usos como el consumo humano o el regadío agrícola ya que carece de dureza y alcalinidad, por lo que resulta muy agresiva. Por ello suele hacerse un proceso de postratamiento al agua producto mediante el que se aportan determinadas sustancias como calcio, magnesio y bicarbonatos, ajustándose su equilibrio calcio - carbónico.

Esta etapa es muy importante dado que es la última previa a la desinfección y posterior distribución. En el caso de una desaladora por ósmosis inversa de agua marina, el agua permeada contiene una cierta concentración de cloruros y de sodio, lo que supone un LSI fuera del intervalo legal para el agua de consumo humano y pone de manifiesto la necesidad de remineralizar las aguas desaladas, que se puede hacer de dos formas diferentes:

- *Remineralización mediante mezcla del agua producto con otra que al menos haya sido pretratada.*

La remineralización por mezcla de aguas se basa en añadir al producto otra agua que puede ser del mismo u otro origen, y que haya sido al menos pretratada. En esta mezcla el agua desalada debe suponer al menos el 10%.

La mezcla de aguas será una solución que podría considerarse en los siguientes supuestos:

- Cuando además de agua de mar se disponga de otra de origen diferente (pozos de agua salobre o dulce relativamente próximos).
- Cuando el agua de aportación no sea de mar, sino más o menos salobre.

La práctica de la mezcla de aguas no será aplicable en las instalaciones en las que disponga solo de agua de mar, en estos casos la remineralización del producto se deberá abordar por la vía química.

- *Remineralización química del propio agua producto.*

La remineralización química del agua se puede realizar por medio de varios procedimientos:

- Dosificación de CO₂ y cal viva.
- Dosificación de CO₂ e hidróxido cálcico.

- Dosificación de CO₂ y lechos de carbonato cálcico (calcita).
 - Dosificación de CO₂ y torres de dolomitas.
 - Dosificación de cloruro magnésico y bicarbonato sódico.
 - Dosificación de sosa cáustica.
- *Post-cloración.*

El agua producto carece de rastros de cloro residual y como antes de su uso final suele almacenarse en algún depósito, existen riesgos de que pueda contaminarse. Por ello, si el agua se dedica al abastecimiento de una población es necesario volverla a clorar para cumplir con la normativa sanitaria en cuanto a presencia de cloro residual en la red.

Los tres procedimientos de cloración que se emplean en esta fase son:

- *Gas cloro.*
Muy extendido en los abastecimientos, por su menor coste, cuando se tratan de grandes caudales. Su manipulación es más peligrosa y se requiere aislar adecuadamente los equipos para evitar accidentes.
- *Hipoclorito sódico.*
Es el procedimiento más barato, tanto de implantación como de funcionamiento.
- *Hipoclorito cálcico.*
Similar al caso anterior, pero con la ventaja de aportar calcio, que sirve para elevar el contenido de este elemento en el agua producto, que es muy desequilibrada desde el punto de vista iónico.

5.2.5. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA PRODUCIDA

El agua producto se bombea a un depósito principal de almacenamiento, conocido como depósito de cabecera, que se ubica a una cota superior de la población a la que se surte de agua para garantizar el abastecimiento por gravedad de ésta.

5.2.6. EVACUACIÓN DE LA SALMUERA Y ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES DE LA DESALACIÓN

El proceso de desalación de aguas está asociado al vertido del flujo del rechazo de alta concentración en sales que se produce, además del permeado, en dicho proceso. Es necesario considerar la gestión de este rechazo como una parte integrada en el diseño de cualquier instalación por su posible impacto en el medio ambiente. Se tendrá en cuenta, siempre que sea posible, el uso de las corrientes de rechazo en el lavado de las unidades de filtración en el pretratamiento, con el objetivo de ahorrar agua y de mejorar la eficacia del sistema. Igualmente deberán tenerse en cuenta las características del sistema receptor, que podrá ser cerrado, en redes de alcantarillado municipal a depuradora, o abierto al medio natural, con el objetivo final de preservar el estado del medio donde se implante la instalación. Es importante señalar que cualquier vertido deberá contar con la correspondiente autorización administrativa.

Estas medidas de tratamiento deberán ser recogidas en el proyecto y aplicadas según el marco legislativo existente. En ese sentido, desde el punto de vista ambiental, el principal requisito administrativo que requiere la construcción de una desaladora es la obligación de realizar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), tal y como establecen las leyes nacionales y autonómicas.

Entre los valores ambientales más significativos que se suelen evaluar en un estudio de impacto ambiental de cualquier proyecto, destacan la biodiversidad y los hábitats. Las desaladoras de agua de mar, por razones de optimización de costes energéticos, suelen situarse en zonas muy próximas a la costa. La riqueza biológica de las zonas costeras se debe a su elevada diversidad ambiental, con ecosistemas de tamaño en general pequeño que forman una gran confluencia biodiversa (ecotonos). Además, la diversidad de los hábitats y las condiciones ambientales que podemos encontrar en el medio costero han dado lugar a la protección de muchas especies mediante leyes de ámbito regional, nacional o europeo.

En cuanto a la normativa, el EIA se desarrolla dentro del marco que ofrece la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.

5.3. ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica es la tecnología con la que se genera electricidad a través de la fuerza del viento mediante la utilización de la energía cinética producida por el efecto de las corrientes de aire. La fuerza del viento mueve las hélices y, mediante un sistema mecánico, hace girar el rotor de un generador que produce energía eléctrica.

La energía eólica se ha utilizado desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar molinos con los que bombear agua. A partir de 1980 progresa la tecnología eólica, alcanzándose aerogeneradores de 20 a 50 kW, cuyas turbinas eran pesadas, ruidosas, con baja disponibilidad, difícil regulación y con un gran coste unitario de inversión, alrededor de 3.000 €/kW instalado. Las nuevas turbinas se sitúan entre 1 y 4 MW de potencia nominal, en el caso de aquellas para uso *onshore*, y entre 4 y 6 MW en el caso de aquellas para uso *offshore*. Además, estos nuevos aerogeneradores son mucho más ligeros, más disponibles, presentan un buen control de la regulación y su coste unitario de inversión se sitúa entre 1.100 y 1.400 €/kW instalado, según el tipo y tamaño de la máquina y de las características del parque eólico.

5.3.1. EL VIENTO

El viento es aire en movimiento como consecuencia de las diferencias de temperatura provocadas por la radiación solar sobre las distintas partes del globo terrestre. Las diferencias de densidad y presión originadas por estas variaciones de temperatura son la causa del movimiento de las masas de aire. Por otro lado, los vientos globales no solo se rigen por los cambios de temperatura y presión atmosférica, sino también por otros factores como la fuerza de *Coriolis*, que hace que el viento del hemisferio norte tienda a girar en un sentido cuando se acerca a un área de bajas presiones, mientras que el del hemisferio sur lo hace en dirección opuesta.

Las características en las que aparece el viento (velocidad, dirección, turbulencia, etc.) son complicadas de predecir ya que ello depende de factores tanto globales como locales, tales como la posición de la luna, diferencia de

temperaturas global y local, orografía, rugosidad de la superficie, obstáculos, entre otros. Así, la proximidad del terreno y su rugosidad producen una deceleración del aire, de forma que la velocidad del viento aumenta con la altura siguiendo una distribución aproximadamente parabólica. Por ello interesa situar el buje del aerogenerador lo más alto posible dado que a mayor altura el viento es más homogéneo y de mayor intensidad.

Debido a la variabilidad y aleatoriedad del viento se deben aplicar técnicas estadísticas para su análisis de viabilidad como fuente de energía. La experiencia demuestra que las distribuciones reales de viento se ajustan bastante bien a una distribución de Weibull de dos parámetros (factor de escala y de forma). Este tratamiento se realiza a partir de series de mediciones de la velocidad y dirección del viento en el lugar de estudio. Las medidas de velocidad y dirección deben realizarse a una altura del suelo para la que el flujo de aire no esté perturbado por el efecto del rozamiento con la superficie del terreno y los obstáculos que pueda haber en él. En el caso de aerogeneradores, la altura a la que se hagan las mediciones debe coincidir con la altura del buje y la campaña de medición se debe desarrollar en un período de tiempo lo más largo que técnica y económicamente sea posible, a ser posible de más de 25 o 30 años, aunque períodos de 5 a 10 años ya comienzan a ser representativos.

Por último, hay que tener en cuenta que no es posible extraer del viento toda su energía cinética. En primer lugar, lo contrario supondría detener por completo el viento, lo que impediría que éste pasara de forma continua a través de las aspas de la turbina. En este sentido, el rendimiento máximo de conversión viene dado por el *límite de Betz*, que establece que solo se puede extraer del viento como máximo el 59.3% de su energía mediante un aerogenerador. Por otro lado, se debe tener en cuenta que en el proceso de transformación de la energía se producen inevitablemente ciertas pérdidas mecánicas.

5.3.2. AEROGENERADORES

El aerogenerador es una turbina eólica que obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento, que actúa sobre las palas del rotor, en un par de giro. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido del rotor y de la velocidad del viento. En

primer lugar, la energía cinética de un objeto en movimiento es proporcional a su masa, de modo que la energía cinética del viento depende de la densidad del aire, y es tanto mayor cuanto mayor es la densidad. Así, la turbina recibe más energía cuando hace frío que cuando hace calor y cuando se ubica a menores altitudes, donde la presión del aire es mayor. Por otro lado, cuanto mayor sea el área de barrido, mayor es la energía recibida por el aerogenerador, en concreto dicha energía es proporcional al cuadrado del diámetro del rotor.

Existen dos tipos de aerogeneradores, los de eje vertical y los de eje horizontal. Este último tipo de turbina eólica, en su mayoría tripala, es mucho más utilizada ya que tiene mejores rendimientos en un intervalo más amplio de velocidades de viento, unas características de par y velocidad más adecuadas para el accionamiento de un generador eléctrico, permiten barrer mayores superficies y aprovechan el beneficioso efecto del aumento de la velocidad del viento con la altura respecto al suelo.

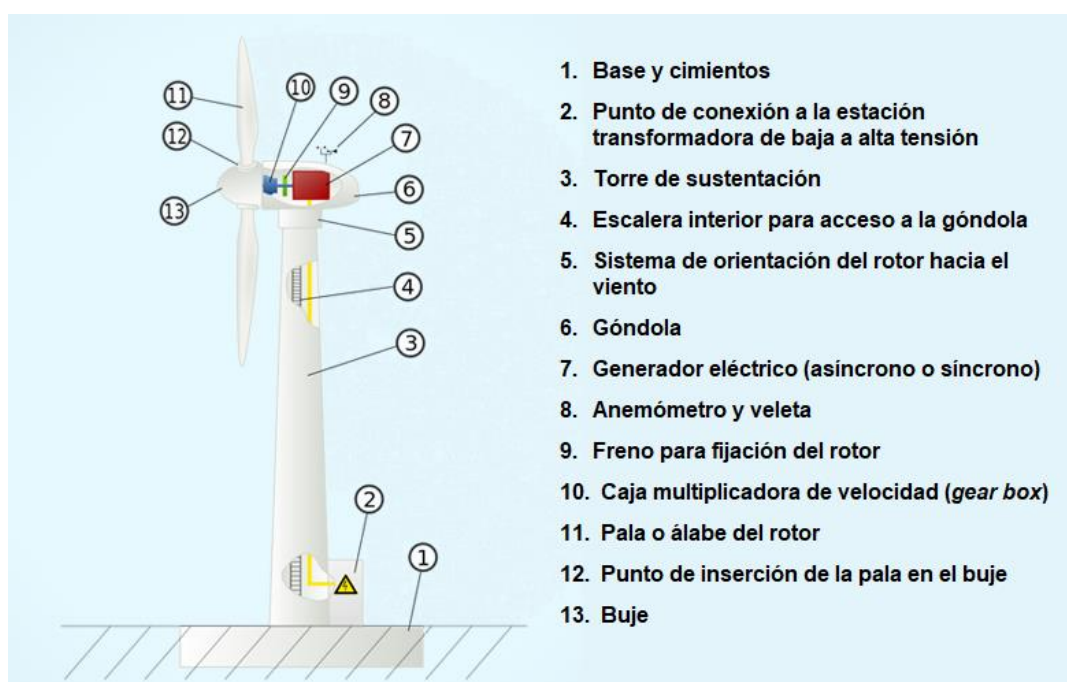


Figura 24. Esquema de un aerogenerador de eje horizontal (Agencia TSS)

El funcionamiento de un aerogenerador puede explicarse en función de las siguientes fases:

- *Orientación automática*

El aerogenerador se orienta automáticamente, según los datos registrados por la veleta y anemómetro que incorpora en la parte

superior, para aprovechar al máximo la energía cinética del viento. El rotor gira sobre una corona situada al final de la torre.

- *Giro de palas*

El viento hace girar las palas, que comienzan a moverse con velocidades de viento de unos 3,5 m/s y proporcionan la máxima potencia con unos 11 m/s. Cuando los vientos son muy fuertes (25 m/s o superior) las palas se colocan en bandera y el aerogenerador se frena para evitar tensiones excesivas.

- *Multiplicación*

El rotor, que es el conjunto de tres palas conectadas en el buje, hace girar un eje lento conectado a una caja multiplicadora que eleva la velocidad de giro desde unas 13 a unas 1.500 revoluciones por minuto.

- *Generación*

La multiplicadora, a través del eje rápido, transfiere su energía al generador eléctrico acoplado, que produce electricidad.

- *Evacuación*

La energía generada es conducida por el interior de la torre hasta la base y, desde allí, por línea subterránea hasta la subestación, donde se eleva su tensión para incorporarla a la red eléctrica y distribuirla a los puntos de consumo.

El diseño y selección del aerogenerador depende del tipo del régimen de viento del lugar, entre otros factores. La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) establece, según la norma IEC-61400-1, los requisitos mínimos de seguridad para turbinas eólicas, que se clasifican en cuatro tipos de categorías según las condiciones de viento, las cuales vienen definidas por la velocidad y por parámetros de turbulencia. Los aerogeneradores no incluidos en ninguna de estas clases se designan por la clase S y sus valores de diseño los especifica el proyectista. Por otro lado, como las clases de I a IV no alcanzan a lugares con velocidad media anual mayor que 10 m/s, se denomina clase 0 a los aerogeneradores para lugares con condiciones excepcionales de viento superiores a medias anuales de 10 m/s.

Con la información de la velocidad media de viento en el emplazamiento, y tras haber analizado el recurso eólico, se puede elegir el aerogenerador que

mejor se adapta a las condiciones de dicho entorno. Cualquier aerogenerador puede operar en un emplazamiento de igual o mayor clase, pero nunca en uno de clase menor. Esto se debe a que cuanto menor es la clase, más pequeño es el aerogenerador ya que el área de barrido es también menor para poder soportar mejor los esfuerzos causados por las mayores velocidades del viento.

Parámetro		Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV	Clase S
V _{ref} (m/s)		50	42,5	37,5	30	Valores a especificar por el proyectista
V _{med} (m/s)		10	8,5	7,5	6	
A) Alta turbulencia	I15 (+)	0,18	0,18	0,18	0,18	
	a (+)	2,0	2,0	2,0	2,0	
B) Baja turbulencia	I15 (+)	0,16	0,16	0,16	0,16	
	a (+)	3,0	3,0	3,0	3,0	

Tabla 4. Clases de aerogeneradores en función del régimen de viento según lo establecido en la norma IEC-61400-1

Como otras tecnologías de energías renovables, la energía eólica requiere de una inversión elevada. Entre los gastos que conlleva la instalación de un parque eólico (turbina, obra civil, conexiones a la red, sistemas de control, etc.), los gastos de los aerogeneradores suponen de media un 70% del total (Villarrubia López, 2012), aunque dicho porcentaje puede variar en función del país y el proyecto dependiendo de las características del emplazamiento, los costes de la turbina, la competitividad de la industria eólica local, etc.

La evolución del precio de los aerogeneradores ha tendido a aumentar en la última década, alcanzándose un pico en el 2009. De acuerdo con el *informe del 2012 de Análisis de Costes de la Energía Eólica* elaborado por la Agencia Internacional de las Energías Renovables, entre los años 2000 y 2002 el precio de las turbinas eólicas rondó los 700 USD/kW, pero se incrementó hasta los 1.500 USD/kW en EEUU y los 1.800 USD/kW en Europa en 2009. Desde este año, el precio de los aerogeneradores disminuyó hasta un 18% en Europa en 2012 gracias al incremento de la competitividad entre los fabricantes de aerogeneradores y a la reducción del precio de los materiales fundamentales para su construcción tales como el acero, cobre y cemento. En 2012, el precio de los aerogeneradores se estableció entre los 1.100 y los 1.400 USD/kW, aunque en China se alcanzan precios muy bajos en torno a 640 USD/kW. En el caso de España, el precio de un aerogenerador se encuentra cercano a los 1.300

USD/kW (1.122 €/kW), lo que supone un coste de inversión total de un parque eólico en torno a los 1.770 USD/kW (1.530 €/kW).

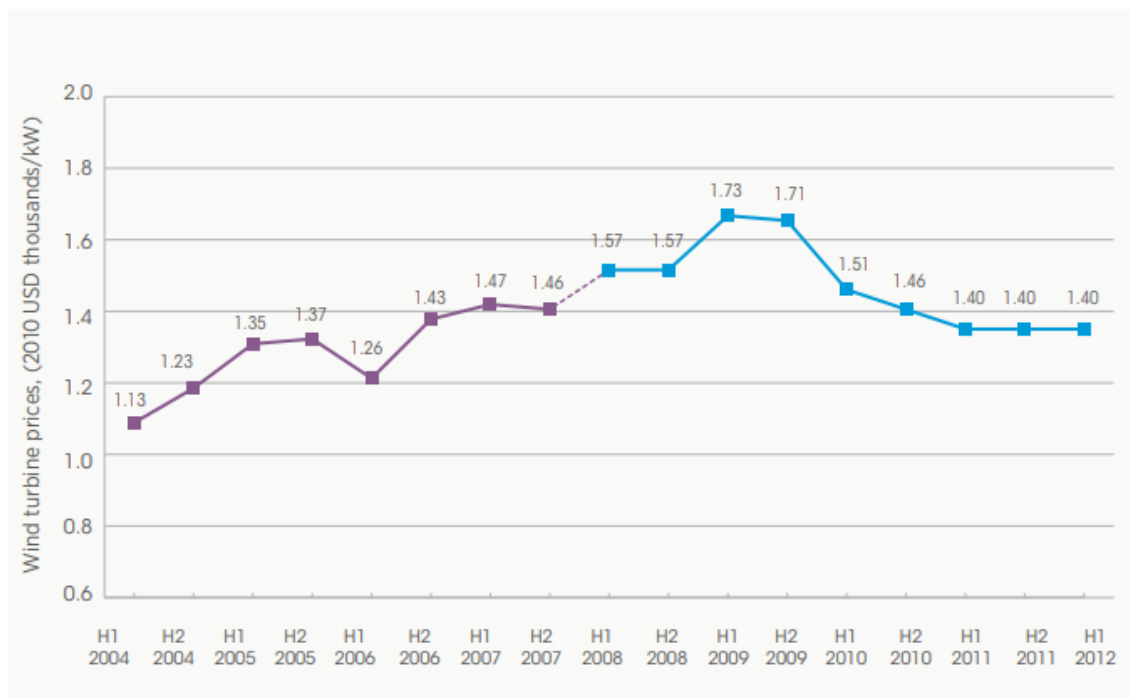


Figura 25. Evolución del coste de los aerogeneradores entre los años 2004 y 2012 (Bloomberg NEF)

5.3.3. UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA EN LA DESALACIÓN DE AGUAS

Ante los elevados costes de producción en la desalación de aguas, el aumento del precio de los combustibles fósiles y la reducción de los costes de las tecnologías de energías renovables en los últimos años resulta de gran interés la integración de estas tecnologías en las plantas de desalación de aguas, cuyo consumo energético es elevado. Por tanto, la generación de energía renovable para abastecer este tipo de instalaciones supone una valiosa inversión económica con la que se reducen costes de tipo externo, social, medioambientales y operacionales. Sin embargo, las virtudes que ofrecen las tecnologías renovables no se reflejan en la implementación actual de estas tecnologías en instalaciones de desalación de aguas a nivel global, que se ha situado en tan solo un 1% del agua desalada total (IEA-ETSAP e IRENA, 2012).

La desalación de aguas con energías renovables se desarrolla sobre todo con procesos por ósmosis inversa (62%), seguido de los procesos térmicos por evaporación súbita multietapa y evaporación multiefecto. Por otro lado, la fuente de energía dominante es la solar fotovoltaica, que se utiliza en un 43% de las

aplicaciones de estas tecnologías en procesos de desalación, seguida de la solar térmica y la energía eólica. La combinación de una u otra fuente de energía renovable con un determinado proceso de desalación es fundamental para cubrir la demanda energética de la planta, así como para alcanzar el objetivo de producción de agua de forma económica y medioambientalmente eficiente. El estudio de viabilidad de las tecnologías aplicadas en una planta de desalación de aguas abastecida con energías renovables requiere un detallado análisis de una variedad de factores tales como la localización, características de las aguas de alimentación y producto, el recurso energético renovable disponible, el tamaño y capacidad de la planta, la posibilidad de conexión a la red eléctrica y los requerimientos de operación y mantenimiento.

En Canarias existe una abundante disponibilidad de recursos renovables, especialmente de energía solar y eólica. Destaca sobre todo esta última ya que el clima de las Islas Canarias viene determinado, además de la corriente marina fría, la orografía y la proximidad al continente africano, por los vientos Alisios, de velocidades medias considerables y alta frecuencia anual. Por ello, en Canarias, y en particular Tenerife, se dan las condiciones óptimas para la explotación a gran escala de la energía eólica. Además, con turbinas eólicas se consigue producir electricidad tanto de día como de noche y requiere, a igualdad de potencia eléctrica producida, menos superficie para su instalación en comparación con los paneles solares, lo que resulta determinante dado el alto consumo energético de una estación desaladora.

La desalación de aguas aprovechando la energía eólica es, por tanto, una de las opciones más prometedoras, sobre todo en áreas costeras y de alto potencial eólico, como es el caso de Tenerife y Canarias en general. Esta opción es aplicada sobre todo en plantas desaladoras de agua por procesos de ósmosis inversa y electrodiálisis. Un ejemplo de este tipo de plantas lo podemos encontrar en Fuerteventura, donde el Consorcio de Abastecimiento de Aguas de Fuerteventura (CAAF) puso en marcha en 2010 un parque eólico de 1,7 MW en Corralejo para abastecer la EDAM de esta localidad (3.300 m³/día), con el que se ha llegado a producir el 80% de la energía que consume al cabo del año.

Además de todo lo anterior, hay que tener en cuenta que el viento es un recurso un tanto aleatorio y variable, tanto en dirección como en velocidad. Por

tanto, para conseguir unas condiciones de operación continuas se hace necesario la combinación de los recursos eólicos con otras fuentes de energía renovable (por ejemplo, solar), baterías de almacenamiento de energía eléctrica o cualquier otro método de almacenamiento de energía, como puede ser el bombeo reversible. Otra opción, utilizada en la EDAM de Corralejo, es el apoyo en red, consistente en la alimentación de la planta tanto con la electricidad aportada por la red como con la de la instalación eólica cuando no sea suficiente con la energía producida por esta última, mientras que cuando se producen excedentes éstos se inyectan a la red. Estos excedentes tendrían prioridad, como toda electricidad producida por medio de fuentes renovables según queda establecido en la Ley 24/2013 del Sector Eléctrico, para su vertido a la red, pero no podría ser vendida ya que el parque eólico sería para autoconsumo. De hecho, al verter electricidad a la red se debe pagar los peajes de acceso a las redes de transporte y distribución como contribución a la cobertura de los costes de dichas redes.

5.3.4. ASPECTOS AMBIENTALES

La aplicación de la energía eólica tiene un impacto ambiental, con aspectos positivos y negativos. Por ello, resulta necesario llevar a cabo medidas correctoras que eviten o minimicen estos últimos a la vez que se aprovechan los aspectos positivos de esta tecnología.

Entre los aspectos medioambientalmente negativos de la energía eólica se distinguen fundamentalmente dos: el ruido y el impacto en las vías de paso para las aves. En primer lugar, el ruido tan molesto e indeseado que caracteriza a los aerogeneradores tiene su origen en el rozamiento entre las distintas partes móviles de la máquina y en el ruido aerodinámico que producen las palas al girar. Todo ello crea problemas en las comunidades próximas al parque eólico, por lo que el Decreto 6/2015 por el que se aprueba el Reglamento que regula la instalación y explotación de los Parques Eólicos en Canarias establece que la distancia entre un aerogenerador y un núcleo habitado no será inferior a 250 metros para aerogeneradores de potencia inferior a 900 kW y a 400 metros para aerogeneradores de potencia superior. En segundo lugar, los aerogeneradores resultan problemáticos para murciélagos y aves, tanto comunes como

migratorias. Entre las medidas preventivas que pueden llevarse a cabo se encuentran la parada preventiva de los aerogeneradores en aquellos periodos del año en los que se desarrolla un paso intensivo de las aves, el uso de flashes de luz intermitente (en lugar de luz continua de advertencia aeronáutica) para reducir el número de aves atraídas y la incorporación de sistemas de detección remota de aves en vuelo que permitan realizar la disuasión de las aves en riesgo de colisión o la parada automática de los aerogeneradores.

En lo que a las ventajas de la energía eólica se refiere, la emisión de gases contaminantes de ésta es nula, si se exceptúan las emisiones derivadas de su construcción, mantenimiento y desmantelamiento. A su vez, con su uso se deja de emitir de media 710 g/kWh de CO₂, 5 g/kWh de SO₂ y 1g/kWh de NO_x. De este modo, un aerogenerador de 2.100 kW de potencia nominal, trabajando un total de 4.200 horas anuales a plena carga (FC = 48%) puede evitar la emisión de 6.260 toneladas anuales de dióxido de carbono, unas 44 toneladas de dióxido de azufre y unas 9 toneladas de óxidos de nitrógeno. Además, las necesidades de suelo de los parques eólicos son relativamente pequeñas (entre 50 y 150 m²/kW), destinándose tan solo de un 5% a 10% de dicha superficie a albergar aerogeneradores, instalaciones auxiliares e infraestructuras de acceso. El resto queda libre para su uso en actividades que no perturben el funcionamiento de las máquinas eólicas, tales como la agricultura, la ganadería o el recreo.

6. NORMAS Y REFERENCIAS

6.1. DISPOSICIONES LEGALES Y NORMAS APLICADAS

- DECRETO 6/2015, de 30 de enero, por el que se aprueba el Reglamento que regula la instalación y explotación de los Parques Eólicos en Canarias.
- Decreto Legislativo 1/2000, de 8 de mayo, por el que se aprueba el Texto Refundido de las Leyes de Ordenación del Territorio de Canarias y de Espacios Naturales de Canarias.
- IEC 61400-1: Aerogeneradores. Comisión Electrotécnica Internacional.
- Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.

- Marco estratégico en materia de clima y energía para el periodo 2020-2030. Comisión Europea.
- 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 Tenerife (PHT). Cabildo de Tenerife.
- Plan Insular de Ordenación de Tenerife (PIOT). Cabildo de Tenerife.

6.2. BIBLIOGRAFÍA

Agüera Soriano, J. (1996) *Mecánica de fluidos incomprensibles y turbomaquinas hidráulicas*. Editorial Ciencia 3.

Çengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2012) *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. McGraw Hill.

EA-ETSAP and IRENA. (2012) *Water Desalination Using Renewable Energy*. EA-ETSAP and IRENA Technology Brief 112.

Grundfos. (2002) *Documentación técnica sobre bombas para el tratamiento de aguas*. Grundfos

International Renewable Energy Agency. (2012) *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series*. Volume 1: Power Sector.

Medina San Juan, J. A. (2000) *Desalación de aguas salobres y de mar: osmosis inversa*. Mundi-Prensa.

Ministerio de Sanidad y Política Social. (2009) *Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano*. Centro de Publicaciones de la Secretaria General Técnica.

Peñate Suarez, B. and Arenas, S. (2016) *La importancia de los sistemas de recuperación de energía en la desalación de aguas en Canarias*. iAgua.

Veza, J. M. (2002) *Introducción a la desalación de aguas*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Servicio de Publicaciones.

Villarrubia López, M. (2012) *Ingeniería de la energía eólica*. Marcombo Ediciones Técnicas.

6.3. OTRAS REFERENCIAS

- Asociación Industrial Danesa del Viento: <http://www.windpower.org>
- Consejo Insular de Aguas de Tenerife: <http://www.aguastenerife.org/>
- Enercon: <https://www.enercon.de/home/>
- Flowserve: <https://www.flowserve.com/en>
- Flowtite: <http://www.flowtite.com/en>
- Goldwind: <https://www.goldwindamericas.com/>
- Grundfos: <https://es.grundfos.com/>
- Sistema de Información Medioambiental de Canarias:
<http://www.gobiernodecanarias.org/medioambiente/piac/temas/informacion-ambiental/simac/>
- iAgua: <https://www.iagua.es/>
- Instituto Nacional de Estadística: <https://www.ine.es/>
- Instituto Tecnológico de Canarias. Recurso eólico:
<http://www.itccanarias.org/recursoeolico/>
- International Water Association. Desalination: past, present and future:
<http://www.iwa-network.org/desalination-past-present-future/>
- KSB: <https://www.ksb.com/ksb-es/>
- Lowara: <http://lowara.com/>
- Puertos del Estado. Oceanografía: <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>
- Sede electrónica del catastro: <https://www1.sedecatastro.gob.es/>
- Senvion: <https://www.senvion.com/global/en/products-services/wind-turbines/>
- Sistema de Información Territorial de la Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias (IDECanarias): <http://visor.grafcan.es/visorweb/>
- Suez Water Technologies and Solutions:
<https://www.suezwatertechnologies.com/>
- Sulzer: <https://www.sulzer.com/en>
- Suzlon: <https://www.suzlon.com/>
- Vestas: <https://www.vestas.com/>

6.4. PROGRAMAS DE CÁLCULOS

- Aplicación online del ITC para la estimación de la energía producida por un aerogenerador.
- Aplicaciones online para la selección de bombas de los fabricantes Flowserve, Grundfos, KSB, Lowara y Sulzer.

Enlaces:

<https://www.flowserve.com/en/more/support-resources/online-tools/affinity-pump-selection-tool>

<https://product-selection.grundfos.com/front-page.html?qcid=375487814>

https://www.ksb.com/ksb-en/Select_your_pumps_and_valves/ksb-easyselect/

www.xylect.com/

<https://www.sulzer.com/en/campaign/sulzer-select>

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

- AutoCAD 2018.
- Google Maps.
- Goolzoom.
- Mendeley. Software de gestión de referencias bibliográficas.
- Microsoft Office Excel 2016.
- Microsoft Office Word 2016.
- Softwares (hoja Excel) para el dimensionado de los intercambiadores de presión de Energy Recovery Inc. y Danfoss.
- Software para el dimensionado de membranas Winflows versión 3.3.2 de SUEZ Water Technologies & Solutions.
- Water Density Calculator de la Universidad de Michigan.

7. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

En este apartado se recogen algunos conceptos y abreviaturas a los que se han hecho referencia en el presente trabajo y que pueden, por desconocimiento o descripción poco clara, llevar a confusión.

7.1. DEFINICIONES

- *Agua bruta de alimentación*: agua de mar antes de pasar por el pretratamiento físico y químico.
- *Ámbito territorial del Valle de Güímar*: comarca de la isla de Tenerife, compuesta por los municipios de Candelaria, Arafo y Güímar, que forma parte de las ocho comarcas hidráulicas principales que se establecen en el PHT.
- *Booster*: bomba auxiliar utilizada para terminar de elevar la presión del agua de alimentación, tras su paso por el intercambiador de presión, hasta la presión de operación.
- *Consumo específico*: parámetro que indica el consumo energético por metro cúbico de agua, en este caso, producida por una planta desaladora.
- *Conversión o recobro*: es la relación expresada en porcentaje del caudal de agua que puede desalarse a partir de un determinado caudal de alimentación.
- *Mezcla volumétrica*: mezcla producida dentro del intercambiador de presión entre las corrientes de agua de alimentación y salmuera.

7.2. ABREVIATURAS

- BAP: Bomba de Alta Presión
- ERD: Energy Recovery Device
- ERI: Energy Recovery Inc.
- LSI: Índice de saturación de Langelier.
- PHT: Plan Hidrológico de Tenerife
- PIOT: Plan Insular de Ordenación de Tenerife
- TDS: Siglas en inglés de sólidos totales disueltos.
- UTM: Sistema de coordenadas universal de Mercator.
- PEX: Siglas en inglés de intercambiador de presión.

8. REQUISITOS DE DISEÑO

8.1. SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO

El emplazamiento donde se ubique la estación de desalación de agua de mar alimentada con energía eólica se debe establecer teniendo en cuenta las condiciones más favorables para la obtención tanto del recurso hídrico y como del eólico, entre otros factores (sociales, ambientales, económicos, etc.).

En primer lugar, el emplazamiento se debe localizar en España ya que existen diferencias entre las normativas de cada país y de esta forma se facilita el acceso a ellas al conocer las entidades reguladoras. En segundo lugar, la planta desaladora tiene que, por un lado, ubicarse cerca del recurso hídrico, en este caso agua de mar, por lo que debe estar en una zona costera y, por otro lado, estar en una zona donde se disponga de suficiente recurso eólico. En tercer lugar, el emplazamiento donde se sitúe la estación desaladora debe seleccionarse respetando el Plan de Ordenación Territorial de la localidad y las leyes referentes a la protección de espacios naturales. Por último, la estación desaladora debe ubicarse en una zona donde exista escasez de agua y, por tanto, la necesidad de dicha estación sea real.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se ha decidido situar la planta desaladora estudiada en la isla de Tenerife, donde los recursos hídricos convencionales disponibles no son suficientes actualmente y se espera que dicha situación empeore en el futuro. Además, Tenerife cuenta con un recurso eólico muy bueno gracias a los vientos Alisios, que son muy estables y de alta velocidad.

Para la elección de una localidad en específico se ha consultado el Plan Hidrológico de Tenerife aprobado en 2015, donde se prevé en el anejo 6 del documento para la Gestión y Gobernanza la implantación de tres EDAM para el año 2027: una en Valle de Guerra, otra en el Recinto Portuario de Santa Cruz y la última en el Polígono Industrial Valle de Güímar.



Figura 26. Mapa eólico de las Islas Canarias (IDAE)

Finalmente, se ha tomado la decisión de ubicar la planta desaladora en el Polígono Industrial Valle de Güímar ya que es la zona que ofrece el mejor recurso eólico y no habría problema en lo que a la clase del suelo se refiere, que se trata de suelo urbanizable. En concreto, la planta se sitúa en la parcela 04, que se encuentra en la Manzana 6, en el lado del polígono que está en el municipio de Arafo, a 280 m de la ITV Güímar Tenerife Applus, tal y como se puede ver en la figura 27. El resto de información de la parcela se encuentra en la consulta descriptiva del inmueble realizada en la Sede Electrónica del Catastro (figura 28).



Figura 27. Situación de la parcela donde se sitúa la EDAM del Valle de Güímar

CONSULTA DESCRIPTIVA Y GRÁFICA DE DATOS CATASTRALES DE BIEN INMUEBLE

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE HACIENDA SECRETARÍA DE ESTADO DE HACIENDA
DIRECCIÓN GENERAL DEL CATASTRO

REFERENCIA CATASTRAL DEL INMUEBLE
5753504CS6355S0001EX

DATOS DESCRIPTIVOS DEL INMUEBLE

LOCALIZACIÓN
PG VALLE GUIMAR M IV 604 Suelo
38509 ARAFO [HIDALGA LA] [S.C. TENERIFE]

USO PRINCIPAL: Suelo sin edif. AÑO CONSTRUCCIÓN: --
COEFICIENTE DE PARTICIPACIÓN: 100,000000 SUPERFICIE CONSTRUIDA (m²): --

PARCELA CATASTRAL

SITUACIÓN
PG VALLE GUIMAR M IV 604
ARAFO [HIDALGA LA] [S.C. TENERIFE]

SUPERFICIE CONSTRUIDA (m²): -- SUPERFICIE GRÁFICA PARCELA (m²): 11.232 TIPO DE FINCA: Suelo sin edificar

INFORMACIÓN GRÁFICA E: 1/2000

Este documento no es una certificación catastral, pero sus datos pueden ser verificados a través del 'Acceso a datos catastrales no protegidos' de la SEC.

Figura 28. Consulta descriptiva y gráfica de datos catastrales de la parcela donde se sitúa la EDAM del Valle de Güímar (Sede Electrónica del Catastro)

8.2. PRODUCCIÓN DE LA PLANTA

El propósito de la nueva EDAM del Valle de Güímar es sustituir la desaladora portátil que actualmente se localiza en el Polígono Industrial del Valle de Güímar y que es capaz de producir hasta 2.000 m³ de agua al día para impulsarla hasta el depósito del polígono. Con ello se busca aumentar la producción y ampliar así la red de infraestructuras para el suministro de agua a la población en el ámbito territorial del Valle de Güímar con el transporte del agua desalada desde el depósito de La Hidalga, en el municipio de Arafo, hasta los depósitos de Caletillas, en el municipio de Candelaria, y de El Puertito, en el municipio de Güímar, aparte de continuar impulsando agua al depósito del polígono. Dicho aumento se establece en cuatro veces la capacidad de la planta desaladora portátil actual, con lo que se pasaría a producir un total de 10.000 m³ al día de agua desalada, que corresponde a la mitad de la capacidad de la EDAM de Santa Cruz de Tenerife. De este modo, con la nueva estación desaladora se afronta el descenso de los recursos hídricos subterráneos con la producción de agua desalada destinada a cubrir parcialmente la demanda urbana, turística e industrial en el ámbito territorial del Valle de Güímar.

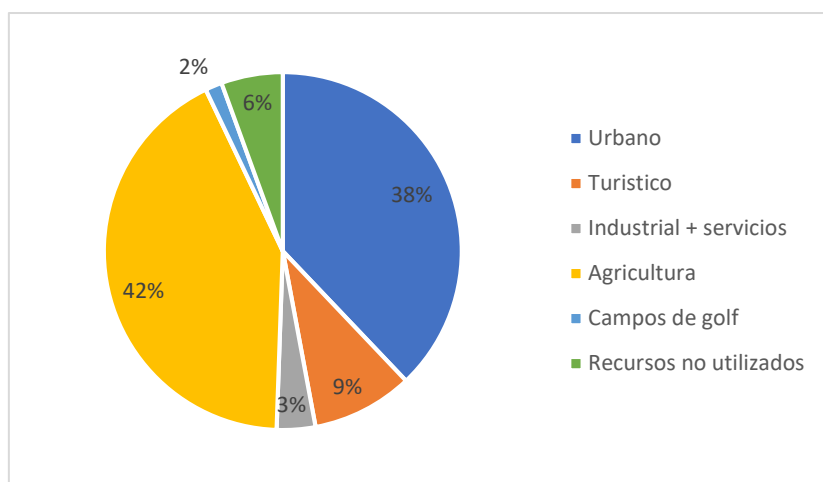


Figura 29. Consumos hídricos en Tenerife en 2010 (Memoria de Información del Plan Hidrológico de Tenerife, 2015)

Según la Encuesta sobre el Suministro y Saneamiento del Agua publicada en el Boletín de Estadísticas e Indicadores del Agua del 2008 del Instituto Nacional de Estadística, el consumo medio de agua en España se establece en 160 litros por habitante y día. Por otro lado, la población de los municipios de Candelaria, Arafo y Güímar en el año 2017 fue, según datos del INE, de 27.149, 5.531 y 19.273, respectivamente. Con esta información, que es la última disponible, se puede determinar el consumo urbano de agua, que resulta ser de 8.312,48 m³/día. Sin embargo, a este consumo hay que sumarle el debido al sector turístico e industrial. Para ello se hará uso de la tabla 1 de consumos hídricos en Tenerife, cuyos valores relativos en el año 2010 se resumen en la figura 29. Finalmente, se calcula que el consumo total de estos tres sectores en los municipios de Candelaria, Arafo y Güímar resulta ser de 10.937 m³/día, por lo que se cubriría el 91% de dicha demanda con la EDAM del Valle de Güímar.

$$\text{Consumo total} = 8.312,48 \text{ m}^3/\text{día} \cdot \left(1 + \frac{9}{38} + \frac{3}{38}\right) = 10.937 \text{ m}^3/\text{día}$$

Sin embargo, en un estudio de este tipo dicha información es insuficiente ya que se requiere estimar el porcentaje de la demanda de agua que puede cubrir la EDAM en el futuro. Para ello se hace uso de la transformación de la tasa de crecimiento geométrico (ecuación 8.1) con la que es posible realizar proyecciones de población en el futuro haciendo uso de los datos de la evolución de la población en los municipios de Candelaria, Arafo y Güímar en los últimos 15 años, que se recoge en la tabla 5.

Año	Población			Tasa de Crecimiento		
	Candelaria	Arafo	Güímar	Candelaria	Arafo	Güímar
2002	15980	5156	15920			
2003	17398	5122	16251	0,089	-0,007	0,021
2004	19197	5256	16334	0,103	0,026	0,005
2005	20628	5276	16489	0,075	0,004	0,009
2006	21415	5257	16603	0,038	-0,004	0,007
2007	22477	5310	16837	0,050	0,010	0,014
2008	23394	5346	17253	0,041	0,007	0,025
2009	24319	5502	17662	0,040	0,029	0,024
2010	25140	5543	17852	0,034	0,007	0,011
2011	25957	5536	18131	0,032	-0,001	0,016
2012	26290	5507	18445	0,013	-0,005	0,017
2013	26134	5497	18589	-0,006	-0,002	0,008
2014	26543	5464	18751	0,016	-0,006	0,009
2015	26490	5499	18777	-0,002	0,006	0,001
2016	26746	5458	19000	0,010	-0,007	0,012
2017	27149	5531	19273	0,015	0,013	0,014
CRECIMIENTO MEDIO:				0,039	0,005	0,014

Tabla 5. Evolución de la población de los municipios de Candelaria, Arafo y Güímar y su tasa de crecimiento anual (INE)

$$N_f = N_o \cdot (1 + r)^n \quad (8.1)$$

Donde,

r = tasa de crecimiento en tanto por uno

n = amplitud del intervalo

N_o = población inicial

N_f = población final

Teniendo en cuenta que el Plan Hidrológico de Tenerife proyecta la puesta en marcha de la EDAM del Valle de Güímar en 2027, se aplica la ecuación 8.1 para conocer el consumo y el porcentaje de éste que cubre la estación desaladora en dicho año, así como diez y veinte años después de su puesta en marcha.

Año	Población			Total	Consumo Urbano (m ³ /d)	Consumo Total (m ³ /d)	% Apoyo EDAM
	Candelaria	Arafo	Güímar				
2027	39.811	5.819	22.096	67.725	10.836	14.258	70
2037	58.377	6.122	25.332	89.831	14.373	18.912	53

2047	85.603	6.441	29.042	121.086	19.373	25.492	39
------	--------	-------	--------	---------	--------	--------	----

Tabla 6. Estimación de la población futura, consumos y porcentaje de dichos consumos que cubre la EDAM del Valle de Güímar

Los resultados muestran que la capacidad de la planta es adecuada ya que, en el caso de menor porcentaje de apoyo de la EDAM, ésta es capaz de cubrir el 39% del consumo urbano, turístico e industrial estimado para el año 2047. Para poner en perspectiva este resultado, hay que tener en cuenta que el aporte de agua desalada al balance hídrico de la isla de Tenerife en el 2015 fue del 14% y que la EDAM de Santa Cruz cubre el 33% de la demanda de agua de la ciudad.

8.3. TEMPERATURA DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN

La temperatura del agua de alimentación de las membranas es un factor determinante en el proceso de desalación ya que ésta influye en los siguientes aspectos:

- *Caudal y calidad del agua producto.*

Con el aumento de la temperatura se produce una dilatación de los poros de la membrana y una reducción de la viscosidad del agua a desalar, por lo que el caudal de agua permeada no solo aumenta, sino que además pasan más iones a través de la membrana, disminuyendo así la calidad del permeado.

- *Riesgo de precipitaciones.*

La solubilidad de determinadas sales aumenta con la temperatura, reduciéndose de este modo el riesgo de precipitaciones.

- *Actividad biológica.*

Con el aumento de la temperatura se favorece el crecimiento de la actividad biológica, lo que supone en la práctica ensuciamientos más frecuentes e importantes.

- *Presión de operación.*

Bajas temperaturas del agua suponen viscosidades mayores, menor difusión a través de la membrana y, por tanto, una mayor presión de

operación, lo que produce un incremento del consumo específico de la instalación.

Esta información tan relevante se determina con los datos históricos de temperatura del agua que facilita Puertos del Estado en su página web y que son recogidos por boyas, siendo la boya de Santa Cruz de Tenerife la más cercana a la zona donde se ubica la EDAM del Valle de Güímar.

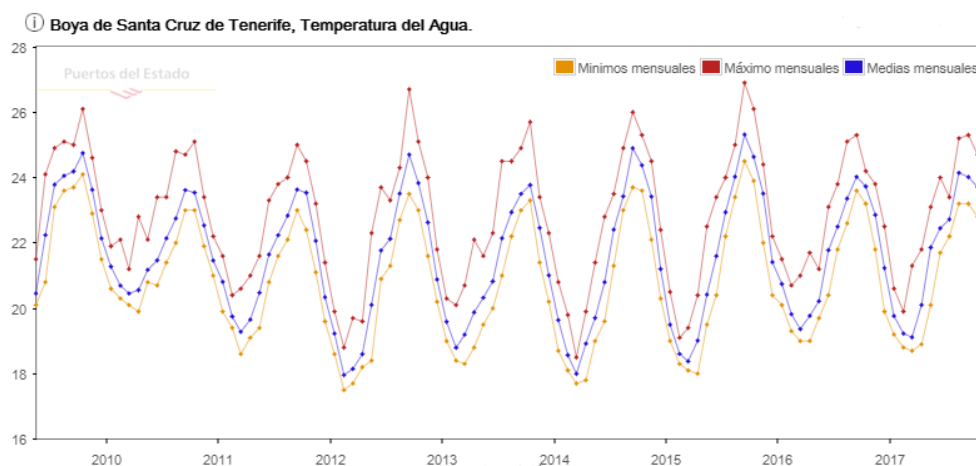


Figura 30. Temperatura superficial mínima, máxima y media mensual del agua registrada por la boya de Santa Cruz de Tenerife entre los años 2009 y 2017 (Puertos del Estado)

Tal y como se puede observar en la figura 30, las variaciones de temperatura son notables a lo largo del año e incluso pueden serlo, en algunos casos, dentro del mismo mes. Sin embargo, con el uso de pozos como método de captación del agua de alimentación se consiguen temperaturas estables, evitándose los inconvenientes operacionales que suponen las variaciones de temperatura del agua de alimentación. Por ello, en el apartado 1.2 del Anexo I se determinan las temperaturas medias, tanto mínima como máxima, anuales registradas y se establece una temperatura del agua de alimentación de 21°C.

8.4. COMPOSICIÓN DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN

La composición del agua de alimentación depende, además de si se trata de agua de mar (TDS estándar de 34.500 mg/L) o de agua salobre (TDS hasta 10.000 mg/L), de la zona geográfica en la que se encuentre la masa hídrica, así el agua del mar Báltico tiene un contenido de sólidos totales disueltos de 28.000 mg/L, mientras que en el Golfo Pérsico se alcanza un TDS de 47.000 mg/L.

Para conocer la composición del agua de mar en Tenerife, tan fundamental para el diseño de la estación desaladora, se recurre a un análisis (tabla 7) facilitado por EMMASA, empresa gestora de la EDAM de Santa Cruz de Tenerife.

Cationes		mg/L
Calcio		431
Magnesio		1470
Sodio		11870
Potasio		451
Amoniaco		0,000
Bario		0,017
Estroncio		0,000
Hierro		0,025
Manganeso		0,003
Aniones		mg/L
Sulfato		3148
Cloruro		21353
Fluoruro		0,862
Nitrato		0,700
Bromo		0,500
Fosfato		0,000
Boro		5,230
Sílice		1,100
Sulfuro de hidrógeno		0,000
Bicarbonato		139,20
Dióxido de carbono		0,88
Carbonato		2,23
Parámetros físico-químicos de importancia		
TDS a 25°C (mg/L)		38873
pH		8
Sólidos en suspensión, SDI		4

Tabla 7. Composición química del agua de alimentación de la EDAM del Valle de Güímar (EMMASA)

Este análisis muestra que el agua de alimentación tiene un contenido de sólidos totales disueltos de 38.873 mg/L y un pH de 8, lo que es razonable ya que según la bibliografía consultada (Medina San Juan, 2000) estos valores en el caso del mar Atlántico están en torno a 38.000 mg/L y 8,1, respectivamente.

8.5. CALIDAD DEL AGUA PRODUCIDA

El agua producida en la estación desaladora tiene como finalidad suministrar agua desalada para su consumo por la población en el ámbito territorial del Valle de Güímar, por lo que se debe cumplir con los criterios

sanitarios pertinentes de control de la calidad del agua de consumo humano. En España, la salubridad, calidad y limpieza de las aguas destinadas al consumo humano se regula en base al Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

Parámetro	RD 140/2003
pH	6,5 – 9,5
TDS (mg/L)	< 1600
Amonio (mg/L)	< 0,5
Boro (mg/L)	< 1
Cloruro (mg/L)	< 250
Fluoruro (mg/L)	< 1,5
Nitrato (mg/L)	< 50
Sodio (mg/L)	< 200
Sulfato (mg/L)	< 250

Tabla 8. Valores exigidos relativos a parámetros no deseables en las aguas potables (Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social)

En la tabla 8 se detallan las características más relevantes exigidas en los anexos del citado real decreto. Es importante destacar que, aunque valores de sólidos totales disueltos de hasta 2.000 mg/L no suponen ningún riesgo para la salud si el consumo del agua es temporal, la Organización Mundial de la Salud aconseja que el TDS en las aguas de consumo humano no supere los 900 mg/L, siendo lo aconsejable un TDS en torno a 500 mg/L.

9. ANÁLISIS DE SOLUCIONES

9.1. SISTEMA DE CAPTACIÓN

Ante las dos técnicas de captación de agua de mar posibles, se realiza un balance de las ventajas y desventajas que cada una ofrece. De esta manera se llega a la conclusión de que la captación por pozos es la más conveniente ya que favorece la estabilidad de la temperatura del agua de alimentación y se consigue reducir la inversión del pretratamiento necesario gracias al filtrado natural que estos ofrecen. En cuanto al número de pozos, se analizan las desaladoras cercanas de Santa Cruz de Tenerife y de Granadilla y se llega a la conclusión de que para alcanzar una producción de 10.000 m³/día son necesarios cinco pozos, aunque se considera necesario la implantación de uno

más de reserva que entraría en funcionamiento en caso de mantenimiento de algunos de los otros cinco pozos, una avería de alguna de sus bombas de captación o por no alcanzarse el caudal previsto con los otros pozos. Este pozo de reserva se rota con el objetivo de facilitar las operaciones de mantenimiento y repartir la carga de trabajo entre todas las bombas de captación.

Tipo de captación	Ventajas	Desventajas
Toma abierta	<ul style="list-style-type: none"> - Caudal asegurado incluso para posibles ampliaciones. - Bajo mantenimiento. Sólo requiere inspección y limpieza anual de las rejillas del filtro colador. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contenido de sólidos en suspensión y actividad tanto orgánica como biológica importante. - Mayores condicionantes ambientales (ej. Amplio margen de variación de temperaturas). - Es necesaria la ejecución de costosas obras marinas.
Toma cerrada	<ul style="list-style-type: none"> - Baja contaminación. - Bajos índices de turbidez (NTU) y de colmatación (SDI). - Ausencia de actividad orgánica y biológica. - Temperaturas estables. - Bajo contenido de oxígeno disuelto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contenido importante de elementos secundarios como Fe, Al, Si, F, entre otros. - Reducción de caudales con el paso del tiempo por la obstrucción debida a elementos finos que arrastra el flujo de agua.

Tabla 9. Ventajas y desventajas de los métodos de captación de agua de mar

9.2. MEMBRANAS

El análisis de la configuración de membranas se inicia con la evaluación de las características físico-químicas y de temperatura del agua de alimentación, así como de las características requeridas por el permeado. Estos factores son considerados, en primer lugar, para seleccionar los modelos de membranas adecuados que ofrecen los diversos fabricantes, entre los que destacan Hydranautics, Toray, Dow Filmtec, LG Chem. y SUEZ. Se opta por consultar las membranas de este último fabricante, que ofrece dos líneas de membranas, una de bajo consumo (AE Series) y otra de alto rechazo de sales (AD Series). La selección de la línea de membranas y el modelo, además del número de membranas y la conversión, se realiza con la ayuda del software de dimensionado que el fabricante facilita, en este caso Winflows. En este proceso de selección se ha tenido en cuenta factores de operación del sistema de desalación como el consumo específico, número de tubos necesarios, presión de operación y calidad del permeado. En este último caso, se ha tenido en cuenta

que la concentración de boro en el permeado conseguida con cada línea se ajustara a los límites establecidos en el RD 140/2003, cosa que ha sido determinante para la selección de la línea de membranas AD Series. Por otro lado, se han estudiado conversiones de 40, 45 y 50% y se ha observado que a medida que este parámetro aumenta, el consumo específico se reduce, pero la presión de operación aumenta, lo que tiene un efecto negativo sobre las membranas a largo plazo. Por ello, se toma una decisión intermedia al establecer la conversión de la planta desaladora en 45%. Por último, se opta por el modelo AD-440 ya que es con el que se consigue un menor número mínimo de tubos de presión necesarios (47). El número final de tubos de presión, que cuentan con 7 membranas cada uno, se aumenta hasta 55 por cada línea de producción ya que con ello se consigue reducir el consumo específico y la presión de operación de las membranas un 5%.

9.3. RECUPERADOR DE ENERGÍA

La selección de la tecnología de recuperación más favorable para el sistema de desalación se realiza teniendo en cuenta, por un lado, la reducción del consumo específico que con ellos se consigue y, por otro lado, la información cualitativa relativa a ellos.

En primer lugar, se utiliza el software de dimensionado que el fabricante facilita y que permite la incorporación de turbinas Pelton, turbochargers o intercambiadores de presión y, mediante simulación, conocer el consumo específico que con ellos se obtendría. A partir de los resultados obtenidos (tabla 10) se toma la decisión de hacer uso de intercambiadores de presión, con los que se consigue el menor consumo específico.

Sistema de recuperación de energía	Rendimiento equipo (%)	C.E. (kWh/m ³)
Sin recuperador de energía	-	4,89
Turbina Pelton	85	3,02
Turbocharger	80	2,62
Intercambiador de presión	94	2,33

Tabla 10. Comparativa de consumos específicos al incorporar a la EDAM recuperadores de energía

Por otro lado, para la selección del modelo de cámara isobárica más conveniente se tiene en cuenta, además del consumo específico que permiten

obtener y que es conocido gracias al uso de hojas Excel de dimensionado facilitadas por los fabricantes, las ventajas y desventajas conseguidas con ellas. Esta información se recoge en un artículo de la revista iAgua (Peñate Suarez y Arenas, 2016) a partir de la información facilitada por gestores y operarios de distintas plantas desaladoras en Canarias y se resume en la figura 31. Tanto a partir de los resultados obtenidos con las hojas Excel como de la información cualitativa facilitada en el artículo de iAgua se llega a la conclusión de que el modelo más adecuado es el PX-Q300, siendo necesarios un mínimo de cuatro equipos por línea cada línea de producción. Sin embargo, se opta por incluir cinco intercambiadores de presión por cada línea de producción para reducir aún más el consumo específico.

	Mantenimiento rutinario	Desventajas	Ventajas
Turbinas Francis	Cambio de aceite, cambio de retenes, cambio de junta tórica, sellos, engrasado motor.	Ya es una tecnología obsoleta. No alcanza valores de consumo específico deseables. Rendimientos relativamente bajos.	Simplicidad de tuberías. Se adapta bien a la variación de condiciones. Nos permite ajustar la producción, modificando los caudales de inyección de la turbina y ajustando la válvula de descarga de la bomba.
Turbinas Pelton	Cambio de aceite, cambio de retenes, cambio de junta tórica, sellos.	Ha sido desplazada casi en su totalidad por las cámaras isobáricas. Rendimientos relativamente bajos.	Simplicidad de tuberías. Se adapta bien a la variación de condiciones. Tiene un consumo específico menor que la turbinas Francis.
ERI-PX / ERI-PQ	Ver que no hay obstrucción en los ERIs, asegurar flujo de lubricación, biofouling	No tolera objetos extraños. Alta emisión de ruido: > 92 dB (PXQ < 81). Problemas teóricos de mezcla y atoramiento, aunque en la práctica ningún operador de planta se quejó de estos problemas. En tomas abiertas puede generar problemas	Robusto, de fácil mantenimiento y poco gasto de mantenimiento. Ligero lo cual facilita su montaje/desmontaje y mantenimiento. Es modular y ocupa poco espacio. Capacidad máxima ERI-PXQ 300 (68 m³/h)
Calder DWEER	En muelles de válvulas de retención, juntas de los pistones y válvulas LINX, picaduras por corrosión..	Problemas de soldaduras mal acabadas. Fallos en bomba de aceite y en la válvula solenoide del sistema hidráulico. Se ha procedido a cambiar el sistema de regulación hidráulico por uno eléctrico. Ocupa mucho espacio. El equipo debe estar controlado por un sistema de control y todos los equipos deben estar funcionando de forma secuencial.	Flexibilidad operacional, capaz de tolerar fluctuaciones de caudal y presión sin degradación del rendimiento o daño del equipo. Los materiales son en súper-dúplex. Hace poco ruido < 80 dB respecto a otros equipos. Capacidad mínima de salmuera 200 m³/d y máxima 500 m³/h.
ISave ERDs	Reponer aceite, cambio de retenes, sello, juntas tóricas, revisar que no hay obstrucción en el rotor, asegurar flujo de lubricación.	Está muy condicionado por el tamaño de la planta. El dispositivo con mayor capacidad de salmuera es el ISave 70 con 52 m³/h. Requiere exigencia en el pretratamiento. Ruido a tener en cuenta > 80 dB	El único control que necesita es un variador de frecuencia. Es muy compacto sin necesidad de muchas conexiones. Ocupa poco espacio. Ideal para pequeña y mediana escala.
Bomba Danfoss	Cambio de aceite, cambio de retenes, cambio de junta tórica, sellos, engrasado motor.	Está muy condicionado por el tamaño de la planta, ya que su capacidad máxima de producción es de 1,1 m³/h a 3.000 rpm. Alto coste de inversión para pequeñas capacidades.	Es un sistema robusto hecho con súper-dúplex, de poco mantenimiento, ocupa poco espacio, con pocas conexiones, detectadas pocas averías y alta eficiente. Ideal para pequeña escala.
RO-KINETIC	Cambio de los retenes, sellos de gomas, reparación válvulas servocomandadas e inerciales.	Complejo de desarmar por la válvula reductora. Tendencia al fallo por el carácter artesanal de la fabricación. Ha requerido cambios de acero del 904 L al Dúplex por corrosión intersticial, cambio de los retenes de las mancuernas por pérdida de agua. Ocupa mucho espacio. Capacidad máxima de salmuera conocida 166,67 m³/h.	Evita el innecesario consumo de energía cinética que aparece en las paradas en la operación. Permite regular los tiempos de cambio de cámara mediante la gestión del variador de accionamiento de las levas del sistema.

Figura 31. Datos cualitativos obtenidos de la recaudación de información durante las entrevistas a operarios y jefes de varias plantas desaladoras de Canarias (iAgua)

9.4. BOMBAS

En el proceso de selección de bombas se hace uso de las herramientas para dicha finalidad que facilitan los fabricantes en sus páginas web. En ellas es

necesario especificar el caudal que la bomba debe desplazar y la altura manométrica que ésta debe aportar al flujo. Para esto último es necesario determinar, mediante un balance de energía, la variación de la altura cinética, de presión y de cota entre los puntos de estudio. Además, se tienen en cuenta las pérdidas de carga, tanto las producidas en los tramos de tuberías como en los accesorios, entre los puntos de estudios. Conocidos dichos parámetros, se introducen en la herramienta online de selección de los fabricantes y se filtran los modelos adecuados con los mayores rendimientos. En el caso de las bombas de captación, se realiza una selección de bombas sumergibles ya que se opta por el método de captación de toma cerrada por pozos, mientras que en el resto de los casos se consultan bombas centrífugas. Finalmente se selecciona la bomba del fabricante que asegure el mayor rendimiento.

9.4.1. BOMBA DE CAPTACIÓN

Modelo de la bomba	Fabricante	Eficiencia (%)
Z10220 2/2A-L8W	Lowara	80,4
SP 160-4-A-200203A4	Grundfos	73,7
UPA 250C-150	KSB	82,2

Tabla 11. Rendimientos de las bombas sumergibles seleccionadas

9.4.2. BOMBA DE ALTA PRESIÓN

10. Modelo de la bomba	Fabricante	Eficiencia (%)
4x10DMX-A	Flowserve	78,4
Multitec CA 125-9.1	KSB	76,5
MPAE100B/10A	Lowara	78,6
MBN RO 150-320 E	Sulzer	76,5

Tabla 12. Rendimientos de las bombas de alta presión seleccionadas

9.4.3. BOMBA BOOSTER

Modelo de la bomba	Fabricante	Eficiencia (%)
8HPX12A	Flowserve	77,5
RPH 200-450A	KSB	76,2
ZE 200-250	Sulzer	77,9
BMS 215-1 HP-B-C-P-A	Grundfos	60,6

Tabla 13. Rendimientos de las bombas booster seleccionadas

9.4.4. BOMBA DE DISTRIBUCIÓN

Modelo de la bomba	Fabricante	Eficiencia (%)
8X15WXH-DS	Flowserve	82,7
Multitec A125	KSB	75,7
MPA150A	Lowara	79,1
MC 200-450	Sulzer	81,4

Tabla 14. Rendimientos de las bombas de distribución seleccionadas

9.5. TUBERÍAS

Las tuberías dimensionadas para los sistemas de captación, distribución y vertido al mar de la salmuera son de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Se toma esta decisión ya que el PRFV es un material muy recurrido en el campo de la desalación debido a que es altamente resistente a la corrosión, ligero, flexible y con acabado superficial interior excelente.

Por otro lado, se han de determinar los diámetros nominales para los sistemas de tuberías que se dimensionan en este trabajo. Para ello se aplica, en primer lugar, el criterio de Bonnet para calcular el diámetro mínimo de la tubería en función del caudal y, por último, se selecciona el diámetro inmediatamente superior que ofrece el fabricante, en este caso Flowtite.

9.6. AEROGENERADORES

En primer lugar, para el dimensionado de los aerogeneradores con los que abastecer la desaladora es necesario determinar el recurso eólico del emplazamiento donde se instalen, que se ubica en La Pasada, en el municipio de Güímar. Dicho potencial eólico depende de la distribución anual de la velocidad del viento, que sigue aproximadamente la función densidad de probabilidad de Weibull, $p(v)$:

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

Donde,

v : velocidad del viento en m/s

c : factor de escala en m/s

k : factor de forma (adimensional) que caracteriza la asimetría de la función $p(v)$

Los factores de escala y forma, así como otros parámetros tales como velocidad media del viento, frecuencias relativas de la velocidad del viento, dirección dominante, etc., son obtenidos tras la realización de un estudio estadístico del viento de series históricas que, para ser representativas, han de ser de periodos no menores de 5 a 10 años. Dicha información es proporcionada por la Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias (IDECanarias) y el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), siendo la velocidad media del emplazamiento de 7,43 m/s, la dirección dominante NNW, el factor de escala de 8,18 m/s y el factor de forma 2,016. Con dichos datos y aplicando la función de Weibull se obtiene la distribución de la frecuencia de la velocidad del viento, que se representa en la figura 32.

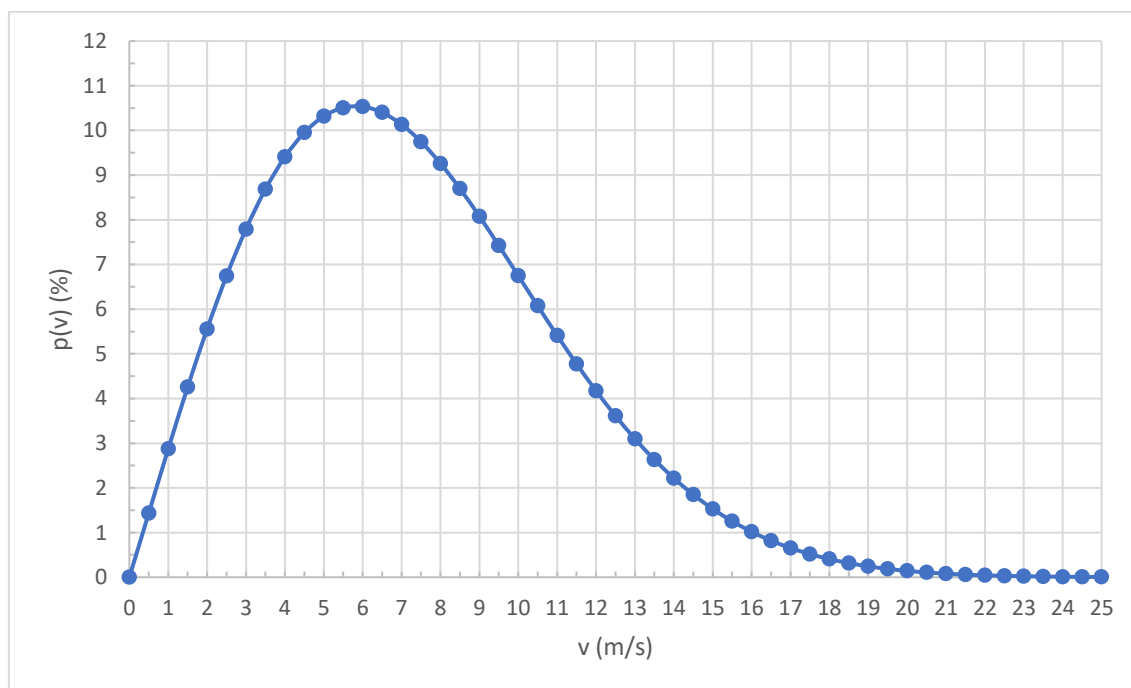


Figura 32. Distribución de Weibull de la frecuencia de la velocidad del viento en la zona donde se sitúa el sistema eólico

Por otro lado, se debe hacer una selección de los aerogeneradores adecuados para el emplazamiento según el estudio estadístico realizado y de acuerdo a la información relativa a las curvas de potencia de dichos aerogeneradores. Dado que la velocidad de la velocidad media del viento es de 7,43 m/s, la clasificación del emplazamiento de acuerdo con la norma IEC-61400-1 es de clase III, por lo que se deben buscar aerogeneradores de esa misma clase.

Finalmente, se calcula la energía anual producida por el aerogenerador con la siguiente expresión:

$$E = T \int_{v_a}^{v_d} p(v) P(v) dv$$

Donde,

$p(v)$: función densidad de probabilidad de velocidad

$P(v)$: curva de potencia del aerogenerador

T : periodo de tiempo considerado, generalmente un año (8.760 h)

Se evalúan los resultados de producción energética anual ofrecidos por varios modelos de aerogeneradores y se usa un parámetro, el factor de carga, como criterio de valoración del aprovechamiento de la potencia nominal de los aerogeneradores.

Fabricante	Modelo	Energía anual (kW)	Potencia nominal (kW)	FC (%)	Valoración
Vestas	V90-2.0MW	6.898.685	2.000	39	Muy bueno
Senvion	MM100	7.844.047	2.000	45	Excelente
Enercon	E-103 EP2	8.535.953	2.350	41	Excelente
Suzlon	S111	7.027.146	2.100	48	Excelente
Goldwind	GW109/2500	10.263.842	2.500	47	Excelente

Tabla 15. Energía anual producida y factor de carga para cada modelo de aerogenerador

Los resultados obtenidos (tabla 15) indican que el aerogenerador que tiene el mayor factor de carga (48%) y, por tanto, presenta el mejor comportamiento resulta ser el Suzlon S111, modelo por el que se opta instalar. En consecuencia, resultan necesarios 2 aerogeneradores de dicho modelo para cubrir la necesidad energética anual de la estación desaladora.

10. RESULTADOS FINALES

En este apartado se detallan las soluciones finales por las que se opta en el diseño de la estación desaladora que se estudia en este trabajo y cuyos cálculos se realizan en el documento Anexos.

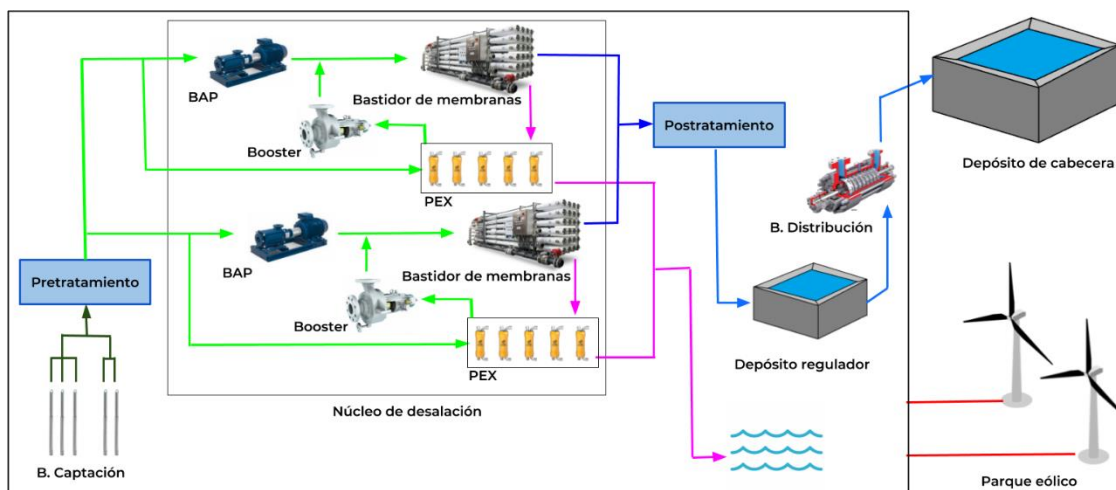


Figura 33. Esquema general de la estación desaladora y del parque eólico para su autoabastecimiento

10.1. SISTEMA DE CAPTACIÓN

La captación se realiza mediante toma cerrada con la colocación de seis pozos, uno de ellos en reserva, paralelos a la costa cercana a la estación desaladora. Dichos pozos se distribuyen en dos grupos de tres y se disponen en cruz, habiendo entre ellos una separación mínima de 20 m y contando todos con una profundidad de 30 m. En cada uno de estos pozos se colocan bombas sumergibles del fabricante KSB modelo UPA 250C-150 de 42 kW (57 CV) de potencia y cuyo punto de operación se sitúa en 185 m³/h y 64 m de columna de agua. Mientras cinco de estas bombas funcionan, una se encontraría en reserva y se pondría en marcha en caso de haber una avería en alguna de las otras o de no alcanzarse el caudal previsto con los otros pozos. Dicha bomba de reserva se rota con el objetivo de facilitar las operaciones de mantenimiento y repartir la carga de trabajo entre las seis bombas de captación.

10.2. NÚCLEO DE DESALACIÓN

10.2.1. MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA

La planta desaladora se diseña de forma modular, contando con dos líneas de producción de idénticas características. Cada una tiene una capacidad de producción de 5.000 m³ de agua permeada al día, para lo cual cuentan con un bastidor de 55 tubos de presión que suman 385 membranas de arrollamiento en espiral de alto rechazo modelo AD-440 del fabricante SUEZ. En total, son

necesarios 110 tubos y 770 membranas para alcanzar la capacidad de la estación desaladora, que ha sido establecida en 10.000 m³/día.

10.2.2. BOMBA DE ALTA PRESIÓN

La bomba de alta presión seleccionada es una bomba centrífuga de 10 etapas del fabricante Lowara modelo MPAE100B/10A de 450 kW (612 CV) de potencia y cuyo punto de operación se sitúa en 211 m³/h y 597 m de columna de agua. Es necesario tener en cuenta que, para poder asegurar el funcionamiento continuo de la EDAM, se debe instalar un sistema de tipo 1+1. De este modo una bomba estaría en funcionamiento mientras que la otra se encontraría en reserva y se pondría en marcha en caso de avería o mantenimiento de la bomba activa. Por otro lado, dado que es altamente improbable una avería simultánea en las dos líneas de producción y el alto precio de estas bombas, se opta por incluir solo una bomba de reserva que actúe en caso de avería o parada por mantenimiento de alguna de las bombas. Esta bomba de reserva se rota, igual que en el caso de la captación, con el objetivo de facilitar las operaciones de mantenimiento y repartir la carga de trabajo entre las tres bombas de alta presión.

10.2.3. SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Se opta por un sistema de recuperación de energía mediante cámaras isobáricas, siendo los intercambiadores de presión del fabricante Energy Recovery Inc. modelo PX-Q300 los seleccionados para su implantación en el sistema de desalación. En concreto, se incorporan 5 intercambiadores de presión en cada línea de producción, lo que supone un total de 10 intercambiadores de presión instalados en la estación desaladora.

10.2.4. BOMBA BOOSTER

La bomba auxiliar seleccionada es una bomba centrífuga monoetapa del fabricante Sulzer modelo ZE 200-250 de 15 kW (20 CV) de potencia y cuyo punto de operación se sitúa en 252 m³/h y 14 m de columna de agua. Debido a que se sigue un sistema 1+1 y que la planta desaladora dispone de dos líneas de producción se deben instalar un total de 4 bombas booster.

10.3. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

El agua producida en la estación desaladora, tras ser tratada para cumplir con la normativa que regula la calidad del agua para el consumo humano, se impulsa desde el depósito regulador de la planta hasta el depósito de cabecera, que se sitúa en una cota mayor con el fin de realizar la distribución del agua a las poblaciones por gravedad. La impulsión del agua producto se realiza con una bomba de sección anular de 3 etapas del fabricante Flowserve modelo 8X15WXH-DS de 261 kW (355 CV) de potencia y cuyo punto de operación se sitúa en 417 m³/h y 166 m de columna de agua. Teniendo en cuenta que se aplica el sistema 1+1, se deben instalar un total de 2 bombas de distribución.

10.4. SISTEMA DE EVACUACIÓN DE LA SALMUERA

La salmuera que se obtiene de los bastidores de membranas de la estación desaladora se recoge en una tubería colectora (emisario) por la que se conduce de vuelta al mar. Este emisario se extiende 225 m mar adentro desde la línea de costa y tiene una longitud total de 625 m desde la nave de procesos hasta el punto final de vertido, que se encuentra a 12 m de profundidad.

10.5. MATERIAL Y LONGITUD DE LAS TUBERÍAS

Las tuberías seleccionadas son de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) del fabricante Flowtite. Se instalan tuberías de tres diámetros diferentes (300, 450 y 500 mm) en el sistema de captación, mientras que los sistemas de distribución y de evacuación de la salmuera comparten tuberías del mismo diámetro (400 mm). Las longitudes de las tuberías se resumen, en función de su diámetro nominal, en la tabla 16.

Diámetro (mm)	Longitud de tubería (m)			
	Captación	Distribución	Emisario	Total
300	45			45
400		2.630	625	3.255
450	75			75
500	390			390

Tabla 16. Longitudes de tuberías en función de su diámetro nominal

10.6. CONSUMO ENERGÉTICO DE LA ESTACIÓN DESALADORA

El consumo específico de la estación desaladora, calculada a partir de los consumos eléctricos de los principales equipos, resulta ser de 3,7 kWh/m³. Los consumos específicos de los equipos de mayor consumo de la estación desaladora se incluyen en la tabla 17, en la que se puede ver que la bomba de alta presión es el componente con mayor peso en el total del consumo energético de la planta con un 61% seguida de la bomba de distribución con un 18% y la de captación con un 16%.

Equipo	P (kW)	Q (m ³ /h)	Uds.	Consumo (kW)	C.E. (kWh/m ³)
BAP	469	211,3	2	938	2,2
B. Booster	16	252,3	2	32	0,1
B. Captación	49	185,4	5	245	0,6
B. Distribución	272	417,2	1	272	0,7
Total bombas				1.487	3,6
Otros				42	0,1
Total EDAM				1.529	3,7

Tabla 17. Potencias eléctricas consumidas y consumos específicos de los equipos y total de la EDAM

10.7. PARQUE EÓLICO

Para cubrir el consumo energético anual de la estación desaladora se instalan 2 aerogeneradores S111 del fabricante Suzlon. Dicho modelo es una turbina eólica de clase IEC IIIA que tiene una potencia nominal de 2,1 MW, una altura de buje de 90 m y un diámetro de rotor de 111,8 m. La producción energética anual conseguida con estos dos aerogeneradores, que operan con un factor de carga del 48%, es de 14.054 MWh.

10.8. ESTIMACIÓN DEL PRESUPUESTO Y DEL PERIODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL

El coste que supone la construcción de la estación desaladora estudiada en el presente trabajo y del parque eólico con el que se abastece se estima en *19 millones de euros*, en el que el presupuesto de la EDAM supone el 65% y el del parque eólico el 35%. Además, se estima que tras los primeros 7 años de operación de la estación desaladora se recupera la inversión inicial.

Los detalles de los cálculos de costes se desarrollan en el Anexo V.

11. CONCLUSIONES

En cuanto a lo académico, el presente trabajo ha servido para poner en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo del Grado en Ingeniería Mecánica, siendo ciertos conceptos de determinadas asignaturas más requeridos que otros. En concreto, se han desarrollado cálculos y aplicados conceptos fundamentalmente de Ingeniería Fluidodinámica, Instalaciones y Máquinas Hidráulicas y Oficina Técnica. Además, la realización de este trabajo ha supuesto un acercamiento al entorno laboral y profesional del Ingeniero Técnico ya que en su redacción se ha requerido la lectura e interpretación de leyes y reglamentos, una búsqueda exigente de información veraz y contrastada y la toma de decisiones ante diferentes soluciones posibles.

En lo que al estudio se refiere, se ha realizado el diseño de una estación desaladora de agua de mar para abastecer a una población del sureste de la isla de Tenerife de un recurso tan vital y cada vez más escaso en Canarias y en el resto del mundo como lo es el agua potable. Para ello, se aplican las tecnologías más eficientes en la desalación de aguas marinas, como lo son la ósmosis inversa y las cámaras isobáricas utilizadas para mejorar la eficiencia energética de este tipo de instalaciones. Aun así, las plantas desaladoras tienen un consumo energético elevado, cuyo impacto se puede reducir aprovechando las energías renovables disponibles en la zona, en este caso la energía eólica.

En definitiva, este trabajo ha servido para aplicar las competencias y capacidades adquiridas en los estudios del Grado en Ingeniería Mecánica, así como para demostrar la viabilidad de una estación desaladora de agua de mar en la isla de Tenerife abastecida mediante energía eólica con la que hacer frente a la disminución y deterioro de los recursos hídricos convencionales locales de una manera en la que se puede reducir el impacto medioambiental de una instalación de este tipo.

11.1. CONCLUSION

On the academic side, this project has been profitable to make use of the knowledge acquired in the studies of the bachelor's Degree in Mechanical

Engineering, although some ideas of certain subjects have been more demanded than others. In particular, calculations and concepts included in this study are mainly related to the subjects of Fluid Dynamics Engineering, Hydraulic Machines and Systems as well as Technical Office. Moreover, the development of this project has been helpful to make first contact with the Technical Industrial Engineer professional environment as it has been required handling regulations, a thoroughly search of reliable information and making decisions.

As far as the project is concerned, a seawater desalination plant design has been developed aiming the water supply to a southeastern population in Tenerife, a place that, just as in other Canary Islands and the rest of the world, is heading to harsher water shortage issues. To do this, the most efficient technologies in seawater desalination have been used, such as reverse osmosis and pressure exchanger devices used to recover energy from the concentrate. Nonetheless, desalination plants have a high energetic consumption, which has an environmental impact that may be reduced using the available renewable energy, in this case wind power.

In conclusion, this project has been of use to apply the abilities and skills acquired in the studies of the bachelor's Degree in Mechanical Engineering as well as to make known the feasibility of a wind powered seawater desalination plant in Tenerife with which face the local conventional water resources decrease and decay in an environmentally friendly way.

12. ORDEN DE PRIORIDAD DE LOS DOCUMENTOS BÁSICOS

Ante posibles discrepancias en la interpretación de los documentos que conforman el presente trabajo, se aclara el orden de prioridad de estos:

1. Planos
2. Anexos
3. Memoria

Universidad de La Laguna
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
Grado en Ingeniería Mecánica

ANEXOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DE UNA ESTACIÓN DESALADORA DE AGUA DE MAR
ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA CON APOYO EN RED PARA
EL ABASTECIMIENTO PARCIAL DE LA POBLACIÓN DEL VALLE DE
GÜÍMAR EN TENERIFE

Autor: Alberto Antonio Francisco Rodríguez

Tutor: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE

1. Dimensionado del bastidor de membranas.....	12
1.1. Programa de dimensionado.....	12
1.2. Análisis del agua de alimentación	13
1.3. Producción de agua desalada	15
1.4. Elección de las membranas.....	16
1.5. Resumen de la configuración del bastidor de membranas	22
2. Dimensionado del sistema de recuperación de energía y selección de las bombas del núcleo de desalación	27
2.1. Sistema de recuperación de energía	27
2.1.1. Comparación de recuperadores de energía.....	27
2.1.2. Selección del intercambiador de presión.....	28
2.1.3. Dimensionado del sistema de intercambio de presión y comprobación de la calidad del permeado	31
2.2. Selección de la bomba de alta presión.....	33
2.3. Selección de la bomba booster	42
2.4. Recálculo del consumo específico del núcleo de desalación	46
3. Dimensionado de los sistemas de captación, distribución y evacuación de la salmuera.....	50
3.1. Sistema de captación	50
3.1.1. Pozos de captación.....	51
3.1.2. Tuberías	54
3.1.2.1. Longitudes y diámetros.....	55
3.1.2.2. Pérdidas de carga.....	57
3.1.3. Selección de la bomba de captación.....	62
3.2. Sistema de distribución	66
3.2.1. Longitud y diámetro de la tubería de distribución.....	66
3.2.2. Pérdidas de carga	67

3.2.3. Selección de la bomba de distribución	68
3.3. Sistema de evacuación de la salmuera	72
3.3.1. Longitud y diámetro de la tubería de evacuación	73
3.3.2. Pérdidas de carga	74
3.3.3. Selección de la bomba de evacuación	74
4. Cálculos energéticos y dimensionado del sistema eólico	78
4.1. Consumo específico de la desaladora.....	78
4.2. Dimensionado del sistema eólico	79
4.2.1. Determinación del recurso eólico	80
4.2.2. Cálculo de la energía producida por un aerogenerador	84
4.2.3. Selección del aerogenerador	87
4.2.4. Análisis de la producción energética anual	89
5. Estimación del presupuesto y del periodo de recuperación de la inversión inicial	93
6. Documentación técnica.....	98
6.1. Resultados del software de diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa winflows.....	98
6.2. Ficha técnica del modelo de membrana seleccionado	98
6.3. Ficha técnica del intercambiador de presión	98
6.4. Ficha técnica de la bomba de alta presión	98
6.5. Ficha técnica de la bomba booster.....	98
6.6. Ficha técnica de las tuberías de PRFV	98
6.7. Ficha técnica de la bomba de captación	98
6.8. Ficha técnica de la bomba de distribución.....	98
6.9. Ficha técnica del aerogenerador	98

Índice de figuras

Figura 1. Software de dimensionado de membranas Winflows.....	12
Figura 2. Registro histórico de temperaturas mínimas y máximas mensuales (Puertos del Estado).....	13
Figura 3. Guía de diseño de elementos de Winflows	14
Figura 4. Introducción de datos del agua de alimentación en Winflows	15
Figura 5. Introducción de datos de los flujos del proceso de desalación.....	16
Figura 6. Oferta de membranas de SUEZ para tratamientos de agua	16
Figura 7. Parámetros de operación de las membranas AD Series y AE Series	17
Figura 8. Especificaciones constructivas de las membranas AD Series y AE Series	17
Figura 9. Introducción de datos del bastidor de membranas.....	18
Figura 10. Propiedades de la bomba con los valores de eficiencias por defecto	19
Figura 11. Composición química del agua permeada (product) y la salmuera (concentrate)	23
Figura 12. Datos cualitativos obtenidos de la recaudación de información durante las entrevistas a operarios y jefes de varias plantas desaladoras de Canarias (iAgua).....	29
Figura 13. Hoja Excel de dimensionado del sistema de intercambio de presión con equipos iSave de Danfoss.	30
Figura 14. Hoja Excel de dimensionado del sistema de intercambio de presión con equipos PX de ERI.	31
Figura 15. Sistema de intercambio de presión instalado en la planta desaladora por ósmosis inversa	33
Figura 16. Curva característica para bombas centrífugas, curva del sistema para un sistema de tuberías y punto de operación (Çengel y Cimbala, 2012)	35
Figura 17. Herramienta web Water Density Calculator	37
Figura 18. Curvas características de la bomba 4x10DMX-A de Flowserve.....	38
Figura 19. Curvas características de la bomba Multitec CA 125-9.1 de KSB... 38	
Figura 20. Curvas características de la bomba MPAE100B/10A de Lowara.... 39	
Figura 21. Curvas características de la bomba MBN RO 150-320 E de Sulzer 40	
Figura 22. Presión de saturación del agua de mar (MIT)	42

Figura 23. Curvas características de la bomba 8HPX12A de Flowserve	43
Figura 24. Curvas características de la bomba RPH 200-450A de KSB	44
Figura 25. Curvas características de la bomba ZE 200-250 de Sulzer	44
Figura 26. Curvas características de la bomba BMS 215-1 HP-B-C-P-A de Grundfos.....	45
Figura 27. Introducción de los rendimientos de la BAP seleccionada	46
Figura 28. Rendimientos de la bomba auxiliar seleccionada	46
Figura 29. Parámetros de operación recalculados del sistema de intercambio de presión	47
Figura 30. Infraestructuras del Valle de Güímar para el suministro de agua de mar desalada (Consejo Insular de Aguas de Tenerife)	52
Figura 31. Ubicación de los pozos de captación y representación de las redes de tuberías de alimentación de la EDAM del Valle de Güímar.....	52
Figura 32. Elevación máxima del terreno donde se van a construir los pozos de captación (Goolzoom)	53
Figura 33. Estadística de bajamares observadas hasta el año 2013 en la boya del puerto de Santa Cruz de Tenerife (Puertos del Estado)	53
Figura 34. Diámetros nominales de las tuberías de PRFV de Flowtite	56
Figura 35. Valores máximos de velocidad para redes de distribución (L.A. Facorro Ruiz: Curso de Hidráulica, Ed. Alsina, 1960)	56
Figura 36. Viscosidad cinemática del agua de mar (MIT)	58
Figura 37. Curvas características de la bomba Z10220 2/2A-L8W de Lowara. 64	
Figura 38. Curvas características de la bomba SP 160-4-A-200203A4 de Grundfos.....	64
Figura 39. Curvas características de la bomba UPA 250C-150 de KSB	65
Figura 40. Recorrido de la tubería de distribución.....	67
Figura 41. Elevación del terreno entre los depósitos regulador y de cabecera (Goolzoom).....	68
Figura 42. Curvas características de la bomba 8X15WXH-DS de Flowserve ..	69
Figura 43. Curvas características de la bomba Multitec A125 de KSB	70
Figura 44. Curvas características de la bomba MPA150A de Lowara	70
Figura 45. Curvas características de la bomba MC 200-450	71
Figura 46. Profundidad del fondo marino en las cercanías del polígono industrial de Güímar (Instituto Español de Oceanografía)	73

Figura 47. Ubicación de los aerogeneradores de la estación desaladora (Visor del IDECanarias).....	79
Figura 48. Calificación del suelo donde se ubica el parque eólico de Abades (Visor del IDECanarias).....	80
Figura 49. Calificación del suelo donde se ubica el parque eólico de Teno (Visor del IDECanarias).....	80
Figura 50. Coordenadas de la parcela donde se sitúan los aerogeneradores (IDECanarias).....	81
Figura 51. Detalles numéricos del recurso eólico en la parcela donde se sitúan los aerogeneradores (ITC)	82
Figura 52. Valores medios de la velocidad del viento, factor de escala, C, y factor de forma, k (Visor del IDECanarias).....	82
Figura 53. Distribución de Weibull de la frecuencia de la velocidad del viento en la zona donde se sitúa el sistema eólico	83
Figura 54. Curvas de potencia de los aerogeneradores para vientos medios y bajos V90 de Vestas	85
Figura 55. Energía producida por el aerogenerador V90-2.0MW de acuerdo con los resultados obtenidos con la herramienta del ITC.....	87
Figura 56. Curva de potencia del aerogenerador S111 de Suzlon.....	89
Figura 57. Valor futuro de la inversión inicial para la construcción de la estación desaladora e ingresos por la venta del agua desalada	95

Índice de tablas

Tabla 1. Composición química del agua de alimentación (EMMASA).....	14
Tabla 2. Análisis de las condiciones de trabajo de las membranas de desalación de agua de mar de SUEZ.....	19
Tabla 3. Parámetros indicadores del agua permeada.....	20
Tabla 4. Variación de las condiciones de operación con el aumento de tubos de membranas AD-440	21
Tabla 5. Comparativa de consumos específicos al incorporar a la EDAM recuperadores de energía	27
Tabla 6. Parámetros afectados por la incorporación de intercambiadores de presión	28
Tabla 7. Datos requeridos para el dimensionado del intercambiador de presión	30
Tabla 8. Efecto del aumento del número de intercambiadores de presión en el consumo específico.....	32
Tabla 9. Comparación de la variación de los parámetros indicadores del agua permeada con la incorporación al sistema de desalación de intercambiadores de presión	32
Tabla 10. Densidades y pesos específicos de los flujos de la planta desaladora	37
Tabla 11. Rendimientos de las bombas de alta presión seleccionadas	40
Tabla 12. Presión de saturación de los flujos de la planta desaladora.....	42
Tabla 13. Rendimientos de las bombas booster seleccionadas.....	45
Tabla 14. Ventajas y desventajas de los métodos de captación de agua de mar	50
Tabla 15. Viscosidad cinemática de los flujos de la planta desaladora	58
Tabla 16. Proceso iterativo para el cálculo del coeficiente de fricción en la tubería de captación.....	59
Tabla 17. Proceso iterativo para el cálculo del coeficiente de fricción en la tubería colectora de captación	59
Tabla 18. Proceso iterativo para el cálculo del coeficiente de fricción en la tubería de alimentación	60
Tabla 19. Resumen de las pérdidas de carga en el sistema de captación.....	62

Tabla 20. Elevación del terreno entre los pozos y la nave de procesos de la EDAM (Goolzoom)	63
Tabla 21. Rendimientos de las bombas sumergibles seleccionadas	65
Tabla 22. Rendimientos de las bombas de distribución seleccionadas.....	71
Tabla 23. Potencias eléctricas consumidas y consumos específicos de los equipos y total de la EDAM	78
Tabla 24. Resultados de la aplicación del método numérico para calcular la energía producida por el aerogenerador V90-2.0MW en un año tipo.....	87
Tabla 25. Comportamiento de un aerogenerador en función del factor de carga (Villarrubia López, 2012)	88
Tabla 26. Energía anual producida y factor de carga para cada modelo de aerogenerador.....	88
Tabla 27. Parámetros de operación del aerogenerador seleccionado	89
Tabla 28. Presupuesto de los equipos dimensionados en el trabajo.....	93
Tabla 29. Costes de construcción de las estaciones de desalación de Santa Cruz de Tenerife, Fonsalía y Telde II.....	94

ANEXO I

DIMENSIONADO DEL BASTIDOR DE MEMBRANAS

1. DIMENSIONADO DEL BASTIDOR DE MEMBRANAS

La base del proceso de desalación de agua de mar por ósmosis inversa lo constituye la membrana semipermeable. Por ello es fundamental la elección de un modelo de membrana con el que se consiga tanto un bajo consumo energético como unas condiciones de agua permeada que se ajusten a la normativa vigente. En ese sentido se procede a estudiar una serie de combinaciones de parámetros determinantes en el diseño del núcleo, como lo son el número de membranas por tubo de presión, el número de tubos de presión, el modelo de membrana, etc.

El estudio que se realiza se hace con la ayuda del programa que el fabricante de las membranas, SUEZ, pone a disposición del diseñador.

1.1. PROGRAMA DE DIMENSIONADO

SUEZ Water Technologies & Solutions, que es la división centrada en tecnologías de tratamiento de aguas de General Electric, facilita el software de diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa denominado Winflows, en concreto se ha hecho uso de la versión 3.3.2.



Figura 1. Software de dimensionado de membranas Winflows

Este programa permite al usuario diseñar un sistema de desalación por ósmosis inversa con membranas del catálogo de SUEZ y simularlo. De esta manera se obtienen los parámetros de operación del sistema en las condiciones que se establezcan, así como la composición tanto del agua permeada como de la concentrada al final del proceso.

1.2. ANÁLISIS DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN

El punto de partida para el diseño de la instalación desaladora lo constituye la composición del agua que se va a tratar. Por ello, es necesario hacer un análisis de las características físicas y químicas de una muestra del agua de alimentación de la planta desaladora.

En este caso se recurre a un análisis (tabla 1) facilitado por EMMASA de una muestra del agua de mar con la que se alimenta la desaladora de Santa Cruz de Tenerife.

Por último, para definir totalmente el agua de alimentación falta por conocer la temperatura de ésta. Para ello se consulta los datos históricos de los que dispone Puertos del Estado, en concreto los recogidos por la Boya de Santa Cruz de Tenerife. Con estos datos se calcula los valores medios mínimos y máximos de temperatura superficial de agua y se toma como temperatura del agua de alimentación un valor dentro de dicho rango, aunque más cercano al mínimo que al máximo ya que la captación no se hace en la superficie y cuanto mayor sea la profundidad, menor es la temperatura, mayor es la viscosidad del agua y, por tanto, menor es la difusión a través de la membrana y mayor es la presión de funcionamiento de ésta, lo que requiere una mayor potencia por parte de la bomba de alta presión y supone un aumento del consumo específico.

Boya de Sta. C. de Tenerife 2009 - 2018					Boya de Sta. C. de Tenerife 2009 - 2018				
Mes/Month	Ts Min./Min. Ts	Año/Year	Día/Day	Hora/Hour	Mes/Month	Ts Max./Max. Ts	Año/Year	Día/Day	Hora/Hour
Enero/January	18.6	2012	31	23	Enero/January	21.9	2010	18	15
Febrero/February	17.5	2012	24	07	Febrero/February	22.1	2010	23	13
Marzo/March	17.7	2012	08	12	Marzo/March	21.3	2017	09	18
Abril/April	17.8	2014	02	23	Abril/April	22.8	2010	28	16
Mayo/May	18.4	2012	01	09	Mayo/May	23.1	2017	07	16
Junio/June	19.6	2014	01	11	Junio/June	24.1	2009	29	18
Julio/July	21.0	2013	04	03	Julio/July	24.9	2009	31	15
Agosto/August	22.0	2010	03	11	Agosto/August	25.2	2017	26	16
Septiembre/September	23.0	2013	13	09	Septiembre/September	26.9	2015	22	17
Octubre/October	22.4	2011	31	22	Octubre/October	26.1	2009	07	16
Noviembre/November	21.1	2011	30	08	Noviembre/November	24.6	2009	01	17
Diciembre/December	19.6	2011	31	23	Diciembre/December	23.0	2009	06	15

Figura 2. Registro histórico de temperaturas mínimas y máximas mensuales (Puertos del Estado)

Temperatura mínima media (°C):	19,9
Temperatura máxima media (°C):	23,8
Temperatura del agua de alimentación	21

Finalmente se supondrá un valor de 21°C para la temperatura del agua de mar de alimentación de la desaladora.

Cationes		mg/L
Calcio		431
Magnesio		1470
Sodio		11870
Potasio		451
Amoniaco		0,000
Bario		0,017
Estroncio		0,000
Hierro		0,025
Manganeso		0,003
Aniones		mg/L
Sulfato		3148
Cloruro		21353
Fluoruro		0,862
Nitrato		0,700
Bromo		0,500
Fosfato		0,000
Boro		5,230
Sílice		1,100
Sulfuro de hidrógeno		0,000
Bicarbonato		139,20
Dióxido de carbono		0,88
Carbonato		2,23
Parámetros físico-químicos de importancia		
TDS a 25°C (mg/L)		38873
pH		8
Sólidos en suspensión, SDI		4

Tabla 1. Composición química del agua de alimentación (EMMASA)

Winflows RO Element Design Guidelines															
Water Source			RO Permeate	Brackish Well Water	Brackish Surface Water		Seawater Well	Surface Seawater		Tertiary Treated Wastewater		MBR Permeate	HERO		
Pre-Treatment			RO		MF/UF	Conventional		MF/UF	Conventional	MF/UF	Conventional	MBR	City/Well	Waste Water	2nd Pass
Parameters	Condition	Unit													
SDI15	Max		1	3	3	5	3	3	5	3	5	2			
Permeate Flux	Max Avg.	m/sec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Typical Range	m/sec	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0			
Lead Element Flux	Max	m/sec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Element Recovery	Max(flux >18 ...	%	35	15	15	15	15	15	15	15	15	15	40	33	50
	Max(flux <12 ...	%	35	22	20	20	20	20	20	20	20	20	40	33	50
Flux, % annual des	Default Value	%	2	3	3	5	4	5	7	10	15	5	3	5	2
Salt Passage, % at	Default Value	%	2	5	5	7	5	5	7	10	15	5			
Max Feed Flow	16" elem	m3/day	1635,3	1635,3	1417,3	1308,2	1635,3	1417,3	1308,2	1199,2	1090,2	1417,3	0,0	0,0	0,0
	8" elem	m3/day	408,8	408,8	354,3	327,1	408,8	354,3	327,1	299,8	272,5	354,3	0,0	0,0	0,0
	4" elem	m3/day	87,2	87,2	76,3	70,9	87,2	76,3	70,9	65,4	60,0	76,3	0,0	0,0	0,0
	2.5" elem	m3/day	32,7	32,7	27,3	21,8	32,7	27,3	21,8	21,8	21,8	27,3	0,0	0,0	0,0
Min Conc. Flow	16" elem	m3/day	174,4	174,4	218,0	218,0	218,0	218,0	218,0	218,0	218,0	218,0	305,3	436,1	218,0
	8" elem	m3/day	43,6	43,6	54,5	54,5	54,5	54,5	54,5	54,5	54,5	54,5	76,3	109,0	54,5
	4" elem	m3/day	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	21,8	27,3	10,9
	2.5" elem	m3/day	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	0,0	0,0	0,0

Figura 3. Guía de diseño de elementos de Winflows

Estos datos se introducen en el software de diseño, donde es necesario señalar que la captación del agua de mar se realiza con pozos cerrados, por lo que el valor de sólidos en suspensión no es el dato de la tabla 1 sino menor, en torno a 3 según las guías de diseño de Winflows (figura 3). Además, se debe indicar que la selección del tipo de agua es definida por el usuario.

Feed Water Analysis

Select Water Source: Sea Wellwater
 Select Water Type: User Defined

Ion	mg/l	meq/l	ppm as CaCO3
Calcium (Ca)	431,04	21,5081	1076,34
Magnesium (Mg)	1470,00	120,9628	6063,40
Sodium (Na)	11870,01	516,3117	25838,04
Potassium (K)	451,00	11,5351	577,26
Ammonia - N (NH4)	0,00	0,0000	0,00
Barium (Ba)	0,00	0,0000	0,00
Strontium (Sr)	0,00	0,0000	0,00
Iron (Fe)	0,00	0,0000	0,00
Manganese (Mn)	0,00	0,0001	0,01
Total Cations	14222,01	670,3177	33545,04
Sulfate (SO4)	3148,00	65,5396	3279,83
Chloride (Cl)	21353,96	602,3174	30142,07
Fluoride (F)	0,86	0,0453	2,26
Nitrate (NO3)	0,70	0,0113	0,56
Bromide (Br)	0,50	0,0063	0,31
Phosphate (PO4)	0,00	0,0000	0,00
Boron (B)	5,23	0,0411	2,06
Silica (SiO2)	1,00	0,0003	0,01
Hydrogen Sulfide (H2S)	0,00	0,0000	0,00
Bicarbonate (HCO3)	139,20	2,2813	114,16
Carbon Dioxide (CO2)	0,88	0,0000	0,00
Carbonate (CO3)	2,23	0,0742	3,71
Total Anions	24651,67	670,3177	33545,05

Parameters

Total Alkalinity (ppm CaCO3): 120,00
 TDS (mg/l): 38873,68
 pH: 8,00
 Temperature (C): 21
 SDI: 3,00
 Recovery (%): 45

Saturation Data (Feed Water)

BaSO4: 0,00 %
 CaF2: 7,48 %
 CaSO4: 24,91 %
 SiO2: 0,79 %
 SrSO4: 0,00 %
 Struvite: 0,000 %
 LSI: 0,54
 Stiff-Davis Index: 0,08
 Osmotic Pressure: 27,77 bar
 Conductivity at 25C: 56274 µS/cm
 Density: 1025,1 kg/m3

Figura 4. Introducción de datos del agua de alimentación en Winflows

1.3. PRODUCCIÓN DE AGUA DESALADA

Una vez definidas las características del agua de alimentación se introduce la información relativa a la producción deseada de agua permeada, que es de 10.000 m³/día. Sin embargo, siguiendo las recomendaciones de la literatura consultada (Medina San Juan, 2000) para instalaciones que funcionan de forma continua, el núcleo de membranas se diseña de forma modular, disponiendo de dos líneas de producción idénticas de 5.000 m³/día cada una, de esta forma es posible compartir equipos de repuesto y reducir así los gastos de mantenimiento.

Además, se debe especificar el número de etapas del proceso, que es 1 y, por tanto, el porcentaje de reciclado de concentrado es 0%, así como el porcentaje de conversión, cuyo valor a utilizar se discute en el apartado 1.4.

Figura 5. Introducción de datos de los flujos del proceso de desalación

1.4. ELECCIÓN DE LAS MEMBRANAS

El fabricante SUEZ comercializa dos tipos de membranas, ambas de arrollamiento en espiral, para desalación de agua de mar: uno de alto rechazo de sales (AD Series) y uno de bajo consumo (AE Series). La elección de un modelo de uno de los dos tipos de membranas depende, además de la consecución de un mínimo consumo energético, de su coste económico (dato que no se facilita sin un interés firme por adquirirlas) y en la calidad del agua permeada, que debe estar lo más próxima posible a las condiciones que exige el RD 140/2003 para el agua de consumo humano.

Membrane Characteristics	Product Name	Membrane Type
Brackish		
Brackish	AG Series	RO
Low Fouling	AG LF Series	RO
Low Energy	AK Series	RO
Low Pressure	AP Series	RO
Seawater	AD & AE Series	RO
Chlorine Resistant	C Series	RO
Other Pure Water Applications		
Hot Water Sanitization	Duratherm* HWS	UF, NF and RO
Water Softening	HL Series	NF
NSF-61 Certified	BEV & MUNI Series	RO / NF
	Select AG / AK / AP Products	RO

Figura 6. Oferta de membranas de SUEZ para tratamientos de agua

Con el objetivo de realizar las simulaciones necesarias con Winflows es necesario determinar el número de membranas a utilizar. Para ello se consulta el dato del flujo de funcionamiento típico de la membrana en la ficha técnica y, conociendo el dato de la producción de permeado (5000 m³/día por cada línea

de producción), se calcula el área de membrana necesaria. Hay que decir que el fabricante facilita un rango aceptable de flujo de funcionamiento típico (figura 7), por lo que se utilizará un valor promedio (15,5 LMH).

Una vez conocido el área de membrana necesaria se calcula el número mínimo de membranas por medio del cociente de dicho valor y el área activa de la membrana, que también es un dato facilitado por el fabricante (figura 8).

$$N^{\circ} \text{ membranas} = \frac{\text{Producción/Flujo típico de funcionamiento}}{\text{Área activa de la membrana}} \quad (1.1)$$

Table 2: Operating and CIP parameters

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

Figura 7. Parámetros de operación de las membranas AD Series y AE Series

Model	Active area ft ² (m ²)	Outer wrap	Part number
AD-90	90 (8.4)	Fiberglass	3056651
AD-365	365 (33.9)	Fiberglass	3056652
AD-400,34	400 (37.2)	Fiberglass	3056654
AD-440	440 (40.9)	Fiberglass	3056655
Model	Active area ft ² (m ²)	Outer wrap	Part number
AE-90	90 (8.4)	Fiberglass	3056660
AE-400, 34	400 (37.2)	Fiberglass	3056662
AE-440	440 (40.9)	Fiberglass	3056663

Figura 8. Especificaciones constructivas de las membranas AD Series y AE Series

Haciendo uso de la ecuación 1.1 y recurriendo a la información facilitada por el fabricante (figuras 7 y 8), se calcula como ejemplo el número de membranas AE-440 mínimas para conseguir una producción de 5000 m³/día con las membranas trabajando dentro del rango de operación típico. El resultado es 329 membranas.

$$N^{\circ} \text{ membranas AE440} = \frac{5000 \frac{m^3}{día} \cdot \frac{1000 L}{1 m^3} \cdot \frac{1 día}{24 h}}{15,5 \frac{L}{m^2 h}} \cdot \frac{1}{40,9 m^2} = 328,63 \rightarrow 329$$

En segundo lugar, se calcula el número de tubos de presión en los que se alojan las membranas. Normalmente estos tubos son de capacidad para 6 o 7 membranas.

$$\text{Tubos de presión (6 membranas c/u)} = 329/6 = 54,83 \rightarrow 55$$

$$\text{Tubos de presión (7 membranas c/u)} = 329/7 = 47,00 \rightarrow 47$$

Por último, se debe seleccionar una edad de la membrana, que no debe ser la inicial de funcionamiento (0 años) ya que la membrana desde su puesta en marcha empieza a perder caudal y capacidad de rechazo de sales. Por ello se recomienda que dicho valor esté comprendido entre los 3 y 5 años para realizar predicciones fiables. Por el mismo motivo también es necesario definir un porcentaje de reducción tanto de caudal como de rechazo, que en el caso de un sistema de desalación de agua de mar con captación por pozos la guía de diseño de Winflows establece en 4% y 5% (figura 3), respectivamente.

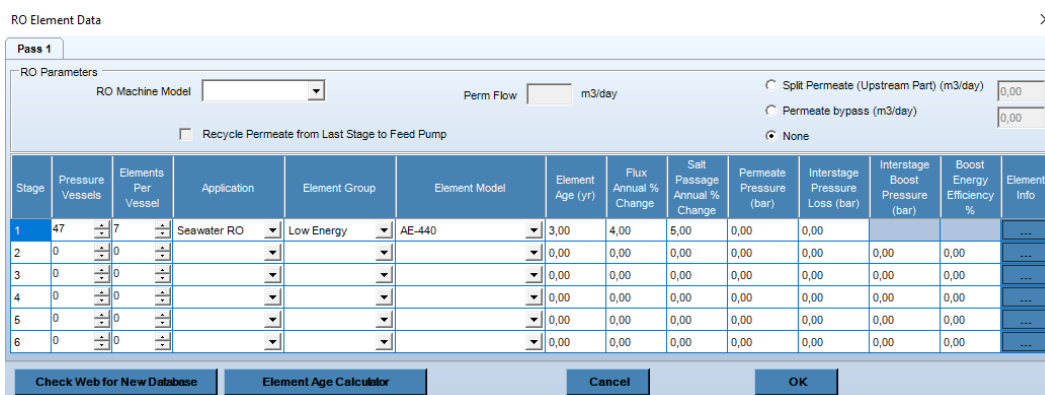


Figura 9. Introducción de datos del bastidor de membranas

A continuación, se realizan una serie de simulaciones con diferentes configuraciones y conversiones del sistema, que en instalaciones de agua de mar se sitúa entre 40% y 50%. Además, se considerará un rendimiento de la bomba de alta presión de 81,74%, un valor recomendado por Winflows y representativo ya que debido al elevado consumo de dicho equipo este valor debe ser alto y en torno al 80%.

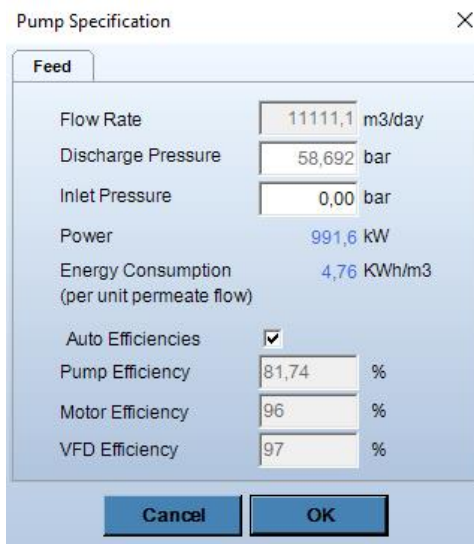


Figura 10. Propiedades de la bomba con los valores de eficiencias por defecto

Serie	Modelo	Flujo típico de funcionamiento (L/m ² -h)			Área activa (m ²)	Nº de membranas	Nº de tubos (6 membranas por tubo)	Nº de tubos (7 membranas por tubo)	Consumo específico (kWh/m ³) / Presión de entrada membrana (bar)	
		Mín.	Media	Máx.					Nº de tubos (6 membranas por tubo)	Nº de tubos (7 membranas por tubo)
Conversión de 40%										
AD Series	AD-90	12	15,5	19	8,4	1600	267	229	5,75 / 63,47	5,74 / 63,40
AD Series	AD-365	12	15,5	19	33,9	396	66	57	5,45 / 60,23	5,43 / 59,94
AD Series	AD-400,34	12	15,5	19	37,2	361	60	52	5,49 / 60,62	5,46 / 60,26
AD Series	AD-440	12	15,5	19	40,9	329	55	47	5,47 / 60,41	5,48 / 60,51
AE Series	AE-90	12	15,5	19	8,4	1600	267	229	5,04 / 55,69	5,04 / 55,65
AE Series	AE-400,34	12	15,5	19	37,2	361	60	52	5,01 / 55,42	4,99 / 55,15
AE Series	AE-440	12	15,5	19	40,9	329	55	47	5,02 / 55,44	5,03 / 55,50
Conversión de 45%										
AD Series	AD-90	12	15,5	19	8,4	1600	267	229	5,41 / 66,61	5,39 / 66,47
AD Series	AD-365	12	15,5	19	33,9	396	66	57	5,15 / 63,49	5,12 / 63,14
AD Series	AD-400,34	12	15,5	19	37,2	361	60	52	5,18 / 63,83	5,14 / 63,37
AD Series	AD-440	12	15,5	19	40,9	329	55	47	5,15 / 63,55	5,15 / 63,51
AE Series	AE-90	12	15,5	19	8,4	1600	267	229	4,78 / 58,96	4,78 / 58,87
AE Series	AE-400,34	12	15,5	19	37,2	361	60	52	4,76 / 58,72	4,74 / 58,41
AE Series	AE-440	12	15,5	19	40,9	329	55	47	4,76 / 58,69	4,76 / 58,69
Conversión de 50%										
AD Series	AD-90	12	15,5	19	8,4	1600	267	229	5,19 / 70,62	5,17 / 70,37
AD Series	AD-365	12	15,5	19	33,9	396	66	57	4,97 / 67,53	4,93 / 67,09
AD Series	AD-400,34	12	15,5	19	37,2	361	60	52	4,99 / 67,83	4,95 / 67,33
AD Series	AD-440	12	15,5	19	40,9	329	55	47	4,96 / 67,41	4,95 / 67,41
AE Series	AE-90	12	15,5	19	8,4	1600	267	229	4,64 / 63,15	4,63 / 62,98
AE Series	AE-400,34	12	15,5	19	37,2	361	60	52	4,63 / 62,95	4,60 / 62,57
AE Series	AE-440	12	15,5	19	40,9	329	55	47	4,62 / 62,87	4,62 / 62,80

Tabla 2. Análisis de las condiciones de trabajo de las membranas de desalación de agua de mar de SUEZ

De la tabla 2 se puede concluir que a mayor conversión menor es el consumo específico del sistema ya que para alcanzar la producción se necesita menos caudal de alimentación y, por tanto, la bomba de alta presión consume menos energía. Sin embargo, una mayor conversión implica una mayor presión de operación de la membrana. Esto último tiene un efecto negativo a largo plazo sobre la productividad pues se produce una compactación de la membrana, lo que supone una disminución del caudal. Por ello se opta por una solución intermedia, con una conversión del 45%. Con esta recuperación se consiguen presiones próximas a los 800 psi (55,17 bar) de presión típica de operación (figura 7) y en cualquier caso se está por debajo de los 1.200 psi (82,76 bar) de presión máxima de operación (figura 7).

Para un mejor aprovechamiento de la superficie de la que se dispone y para facilitar posibles ampliaciones de la producción se opta por una solución que suponga disponer del menor número de tubos de presión posible. Ello se consigue tanto con el modelo AD-440 como con el AE-440. La elección de uno u otro se debe basar no sólo en el consumo específico, sino además en la calidad del agua producto.

Parámetro	AD-440	AE-440	RD 140/2003
pH	8	8	6,5 – 9,5
TDS (mg/L)	203,39	256,85	< 1600
Amonio (mg/L)	0,00	0,00	< 0,5
Boro (mg/L)	0,75	1,49	< 1
Cloruro (mg/L)	108,70	137,95	< 250
Fluoruro (mg/L)	0,01	0,01	< 1,5
Nitrato (mg/L)	0,01	0,01	< 50
Sodio (mg/L)	72,59	90,63	< 200
Sulfato (mg/L)	2,21	2,82	< 250

Tabla 3. Parámetros indicadores del agua permeada

En la tabla 3 se comparan los parámetros indicadores del agua permeada, tanto la obtenida con membranas AD-440 como con AE-440, con los valores que establece el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. El análisis se realiza tras el postratamiento químico con sosa cáustica con el que se regula el pH. Los resultados muestran que un modelo de membrana, el AE-440, supera el límite de 1 mg/L de boro que se establece en la normativa. En cambio, la

membrana AD-440 cumple con todas las restricciones, por lo que éste será el modelo de membrana que se utilice en el sistema de desalación.

Por último, habiendo establecido el modelo a utilizar, se valora la posibilidad de aumentar el número de tubos con el objetivo de reducir el consumo específico.

Nº. Tubos (7 c/u)	Nº. memb.	C.E. (kWh/m ³)	P. BAP (bar)
47	329	5,15	63,51
48	336	5,11	63,03
49	343	5,08	62,58
50	350	5,04	62,14
51	357	5,01	61,73
52	364	4,98	61,34
53	371	4,95	61,01
54	378	4,92	60,65
55	385	4,89	60,31

Tabla 4. Variación de las condiciones de operación con el aumento de tubos de membranas AD-440

En la tabla 4 se ilustran los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas. De ella se concluye que con el aumento del número de tubos de presión se consigue reducir el consumo específico gracias a que la presión de descarga de la bomba disminuye. Sin embargo, ello se consigue en detrimento de un aumento del número de membranas y, por tanto, del coste no sólo de la inversión inicial, sino del de mantenimiento a lo largo de los años de operación de la estación desaladora. Aun así, el gasto energético de la estación desaladora, en el que el consumo eléctrico de las bombas de alta presión supone la mayor parte, es mucho mayor al del mantenimiento de los bastidores de membranas. Por ello, se optará por aumentar el número de tubos hasta igualar la cantidad que se conseguiría de haber optado por la disposición de 6 membranas por tubo de presión (55). De este modo el consumo específico, que en un principio era de 5,15 kWh/m³, pasa a ser de 4,89 kWh/m³, que es un valor incluso menor que el que se conseguiría con una conversión de 50% y un bastidor de 55 tubos de presión con membranas del mismo modelo.

El aumento de la inversión inicial y de los gastos asociados al mantenimiento de las membranas puede ser estimado teniendo en cuenta que en la actualidad el precio de una membrana de alto rechazo está en torno a los

700 € y suponiendo que en un periodo de 10 años éstas han tenido que ser sustituidas dos veces y que los gastos asociados a su limpieza suponen un 20% de la inversión inicial.

$$\text{Aumento inversión memb.} = (385 - 329) \text{ memb.} \cdot \frac{700 \text{ €}}{1 \text{ memb.}} \cdot (1 + 2 + 0,20) = 137.200 \text{ €}$$

Por otro lado, la reducción del consumo específico conseguida, que puede parecer poco significativa en un principio, resulta ser notablemente positiva a largo plazo ya que permite conseguir un ahorro en el consumo eléctrico, y por tanto en los gastos totales, muy importante a lo largo de los años de operación de la estación desaladora. Este ahorro también puede ser estimado teniendo en cuenta la producción de la planta, que es de 10.000 m³/día, considerando un periodo de operación (se supondrá 10 años) y teniendo en cuenta el precio del kWh de electricidad, que en la actualidad tiene un valor medio de 0,126 €/kWh.

$$\text{Ahorro} = (5,15 - 4,89) \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 10.000 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot 3650 \text{ días} \cdot 0,126 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 1.195.740 \text{ €}$$

La cantidad obtenida ha sido calculada considerando un abastecimiento total de la red eléctrica, que sería el caso más desfavorable e hipotético. Se debe tener en cuenta que el consumo energético anual de la planta es cubierto con los aerogeneradores instalados.

En cualquier caso, esto contribuye a visualizar el efecto de la reducción del consumo específico, por pequeña que sea, en los gastos de la estación desaladora y justifica la solución adoptada.

1.5. RESUMEN DE LA CONFIGURACIÓN DEL BASTIDOR DE MEMBRANAS

La estación desaladora de agua de mar queda diseñada de forma modular, contando con dos líneas de producción de idénticas características. Cada una produce 5000 m³/día de agua permeada y para ello cuentan con un bastidor de 55 tubos de presión que suman 385 membranas de arrollamiento en espiral AD-440, de SUEZ Water Technologies and Solutions. Con esta configuración la presión de descarga de la bomba de alta presión es de 60,31 bar y el consumo específico de las líneas de producción resulta ser de 4,89 kWh/m³, que es un valor muy alejado de lo aceptable en una planta moderna de desalación de agua de mar (entre 2,8 y 4 kWh/m³) ya que todavía no se ha

incluido en el sistema los intercambiadores de presión, que son ampliamente utilizados en el sector debido a la mejora en la eficiencia energética que con ellos se consigue.

De esta manera se consigue que el agua producto cuente con unas características (figura 11) que, a falta del postratamiento con el que poder solucionar el problema de su agresividad (LSI = -2,44), se encuentran dentro de los límites que establece el Real Decreto 140/2003 para el agua de consumo humano.

Ions, mg/l		Product	Concentrate
Calcium		0.61	782.67
Magnesium		1.60	2669.80
Sodium		84.40	21504.58
Potassium		4.34	815.96
Ammonia - N (NH4)		0.00	0.00
Barium		0.00	0.00
Strontium		0.00	0.00
Iron		0.00	0.00
Manganese		0.00	0.01
Sulfate		2.59	5744.87
Chloride		127.93	38697.25
Fluoride		0.01	1.55
Nitrate		0.01	1.26
Bromide		0.00	0.90
Phosphate		0.00	0.00
Boron		0.85	8.81
Silica		0.01	1.81
Hydrogen Sulfide		0.00	0.00
Bicarbonate		16.67	229.37
Carbon Dioxide		0.27	11.14
Carbonate		0.09	0.43
TDS, mg/l		239.11	70459.27
Flow	m3/day	5002.36	6114.81
Temperature	C	21.00	21.00
Pressure	bar	2.00	59.43
Osm. Pressure	bar	0.19	52.20
pH		8.00	6.95
Conductivity at 25C	µS/cm	472.00	93026.00
Saturation Data			
BaSO4	%	0.00	0.00
CaF2	%	0.00	34.54
CaSO4	%	0.00	52.09
SiO2	%	0.01	1.43
SrSO4	%	0.00	0.00
Struvite	%	0.00	0.00
LSI		-2.44	-0.10
S&DI		-2.85	-0.62

Figura 11. Composición química del agua permeada (product) y la salmuera (concentrate)

ANEXO II

DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA Y SELECCIÓN DE LAS BOMBAS DEL NÚCLEO DE DESALACIÓN

2. DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA Y SELECCIÓN DE LAS BOMBAS DEL NÚCLEO DE DESALACIÓN

En la actualidad no se contempla una planta de desalación por ósmosis inversa sin un sistema de recuperación de energía que aproveche la energía de la salmuera de alta presión. Con ello se consigue una mejora en la eficiencia energética del proceso de desalación que reduce el consumo de la bomba de alta presión, aunque ello implica la introducción de una bomba auxiliar (booster) cuando se hace uso de intercambiadores de presión.

En este anexo se realiza el dimensionado de dicho sistema y se seleccionan las bombas de alta presión y booster.

2.1. SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

En el campo de la desalación por ósmosis inversa se han ido incorporando tecnologías, que con el tiempo han ido mejorando e imponiéndose a sus predecesoras, para el aprovechamiento de la energía de presión del rechazo. Cuatro tecnologías son las que se han implantado a lo largo de los años en el sector: la turbina Francis (la primera en utilizarse y en desuso por su baja eficiencia), la turbina Pelton, el conjunto bomba-turbina (o turbocharger) y el intercambiador de presión, siendo esta última la de uso más extendido en los últimos años.

2.1.1. COMPARACIÓN DE RECUPERADORES DE ENERGÍA

Se seleccionará la tecnología más conveniente con el apoyo del programa Winflows, que permite incorporar al sistema una turbina Pelton, un turbocharger o intercambiadores de presión y realizar una simulación del proceso.

Sistema de recuperación de energía	Rendimiento equipo (%)	C.E. (kWh/m ³)
Sin recuperador de energía	-	4,89
Turbina Pelton	85	3,02
Turbocharger	80	2,62
Intercambiador de presión	94	2,33

Tabla 5. Comparativa de consumos específicos al incorporar a la EDAM recuperadores de energía

En la tabla 5 se muestran los resultados de las simulaciones realizadas y de ellos podemos concluir que con la incorporación de intercambiadores de presión al sistema de desalación se consigue el menor consumo específico, por lo que será ésta la tecnología que se incluirá en la planta.

Es necesario considerar que con la introducción de intercambiadores de presión cambian ligeramente las condiciones de trabajo de la planta desaladora bajo estudio debido a que una pequeña parte de la salmuera se mezcla con el agua de alimentación durante el proceso de recuperación de energía, lo que implica un incremento de la salinidad de este último flujo y, por tanto, de su presión osmótica. Los parámetros que se ven afectados por la incorporación de estos equipos de recuperación de energía se especifican en la tabla 6. En el caso del TDS del permeado, se indican los valores correspondientes a dicho flujo antes de la aplicación del postratamiento químico con sosa cáustica ya que son esos los necesarios en los apartados siguientes. Debido a ello el valor referido a la situación en la que no se incluyen intercambiadores de presión (tabla 6) es inferior que el detallado en la figura 11 (anexo I).

Parámetro	Sin int. de presión	Con int. de presión
Incremento de salinidad (%)	-	2,7
TDS del agua de alimentación (mg/L)	38.874	39.952
Presión de alimentación de las membranas (bar)	60,31	61,79
TDS del permeado (mg/L)	218.12	225,75
Presión de la salmuera (bar)	59,43	60,91

Tabla 6. Parámetros afectados por la incorporación de intercambiadores de presión

2.1.2. SELECCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE PRESIÓN

Son varios los fabricantes de cámaras isobáricas y cada uno comercializa una línea de productos patentados diferentes, aunque de características similares ya que comparten el mismo principio de funcionamiento. En este apartado se estudiarán tres gamas de intercambiadores de presión: los iSave ERDs de Danfoss, el Calder DWEER de Flowserve y los PX Pressure Exchanger de Energy Recovery Inc.

Un artículo de la revista iAgua (Peñate Suarez y Arenas, 2016) sobre la importancia de los sistemas de recuperación de energía en la desalación de

aguas en Canarias incorpora un estudio de las ventajas y desventajas que presenta cada tecnología según la opinión de gestores y operarios de distintas plantas de las islas. Esos datos se incluyen en la figura 12 y de ellos se concluye que el Calder DWEER no es la mejor opción puesto que ocupa mucho espacio, suele presentar problemas de soldaduras mal acabadas y requiere de un mayor mantenimiento que las otras dos opciones. Por otro lado, tanto los ERI PXs y los iSave ERDs reciben buenas críticas y se destaca de ellos su modularidad, el poco espacio que ocupan, la facilidad tanto de su montaje como de su desmontaje y la idealidad de éstos para plantas de pequeña y mediana escala.

	Mantenimiento rutinario	Desventajas	Ventajas
Turbinas Francis	Cambio de aceite, cambio de retenes, cambio de junta tórica, sellos, engrasado motor.	Ya es una tecnología obsoleta. No alcanza valores de consumo específico deseables. Rendimientos relativamente bajos.	Simplicidad de tuberías. Se adapta bien a la variación de condiciones. Nos permite ajustar la producción, modificando los caudales de inyección de la turbina y ajustando la válvula de descarga de la bomba.
Turbinas Pelton	Cambio de aceite, cambio de retenes, cambio de junta tórica, sellos.	Ha sido desplazada casi en su totalidad por las cámaras isobáricas. Rendimientos relativamente bajos.	Simplicidad de tuberías. Se adapta bien a la variación de condiciones. Tiene un consumo específico menor que la turbinas Francis.
ERI-PX / ERI-PQ	Ver que no hay obstrucción en los ERIs, asegurar flujo de lubricación, biofouling	No tolera objetos extraños. Alta emisión de ruido: > 92 dB (PXQ < 81). Problemas teóricos de mezcla y atoramiento, aunque en la práctica ningún operador de planta se quejó de estos problemas. En tomas abiertas puede generar problemas	Robusto, de fácil mantenimiento y poco gasto de mantenimiento. Ligero lo cual facilita su montaje/desmontaje y mantenimiento. Es modular y ocupa poco espacio. Capacidad máxima ERI-PXQ 300 (68 m ³ /h)
Calder DWEER	En muelles de válvulas de retención, juntas de los pistones y válvulas LINX, picaduras por corrosión..	Problemas de soldaduras mal acabadas. Fallos en bomba de aceite y en la válvula solenoide del sistema hidráulico. Se ha procedido a cambiar el sistema de regulación hidráulico por uno eléctrico. Ocupa mucho espacio. El equipo debe estar controlado por un sistema de control y todos los equipos deben estar funcionando de forma secuencial.	Flexibilidad operacional, capaz de tolerar fluctuaciones de caudal y presión sin degradación del rendimiento o daño del equipo. Los materiales son en súper-dúplex. Hace poco ruido < 80 dB respecto a otros equipos. Capacidad mínima de salmuera 200 m ³ /d y máxima 500 m ³ /h.
iSave ERDs	Reponer aceite, cambio de retenes, sello, juntas tóricas, revisar que no hay obstrucción en el rotor, asegurar flujo de lubricación.	Está muy condicionado por el tamaño de la planta. El dispositivo con mayor capacidad de salmuera es el iSave 70 con 52 m ³ /h. Requiere exigencia en el pretratamiento. Ruido a tener en cuenta > 80 dB	El único control que necesita es un variador de frecuencia. Es muy compacto sin necesidad de muchas conexiones. Ocupa poco espacio. Ideal para pequeña y mediana escala.
Bomba Danfoss	Cambio de aceite, cambio de retenes, cambio de junta tórica, sellos, engrasado motor.	Está muy condicionado por el tamaño de la planta, ya que su capacidad máxima de producción es de 1,1 m ³ /h a 3.000 rpm. Alto coste de inversión para pequeñas capacidades.	Es un sistema robusto hecho con súper-dúplex, de poco mantenimiento, ocupa poco espacio, con pocas conexiones, detectadas pocas averías y alta eficiente. Ideal para pequeña escala.
RO-KINETIC	Cambio de los retenes, sellos de gomas, reparación válvulas servo-comandadas e inerciales.	Complejo de desarmar por la válvula reductora. Tendencia al fallo por el carácter artesanal de la fabricación. Ha requerido cambios de acero del 904 L al Dúplex por corrosión intersticial, cambio de los retenes de las mancuernas por pérdida de agua. Ocupa mucho espacio. Capacidad máxima de salmuera conocida 166,67 m ³ /h.	Evita el innecesario consumo de energía cinética que aparece en las paradas en la operación. Permite regular los tiempos de cambio de cámara mediante la gestión del variador de accionamiento de las levas del sistema.

Figura 12. Datos cualitativos obtenidos de la recaudación de información durante las entrevistas a operarios y jefes de varias plantas desaladoras de Canarias (iAgua)

La decisión de incorporar ERI PXs o iSave ERDs se deberá basar en el consumo específico que con ellos se pueda conseguir. Para ello es necesario

hacer uso de las hojas Excel de dimensionado que los fabricantes facilitan. Es necesario para ello la introducción de algunos datos establecidos en el anexo I, además de los que han variado por la incorporación de intercambiadores de presión y que se detallan en la tabla 6. Asimismo, se mantiene la opción activada por defecto de autoselección de eficiencias de las bombas de alta presión y booster por no conocerse en un primer momento estos valores.

TDS del agua de alimentación (ppm)	38.874
Presión del agua de alimentación (bar)	2
Temperatura del agua de alimentación (°C)	21
Presión de alimentación de las membranas (bar)	61,79
Conversión (%)	45
TDS del permeado (ppm)	225,75
Presión del permeado (bar)	2
Caudal de permeado por línea de producción (m ³ /día / m ³ /h)	5000 / 208,3
Presión de la salmuera (bar)	60,91

Tabla 7. Datos requeridos para el dimensionado del intercambiador de presión

Tras introducir los datos requeridos (tabla 7) y solicitar la auto selección del modelo más favorable se obtienen los parámetros de operación del sistema, siendo los del PX-Q300 (figura 14) los más favorables ya que con éste se consigue un consumo específico de 2,24 kWh/m³, mientras que con el iSave50 (figura 13) se consigue uno superior de 2,50 kWh/m³. Además, serían necesarias como mínimo 4 unidades de PX-Q300, mientras que haciendo uso del iSave50 serían necesarias 5.

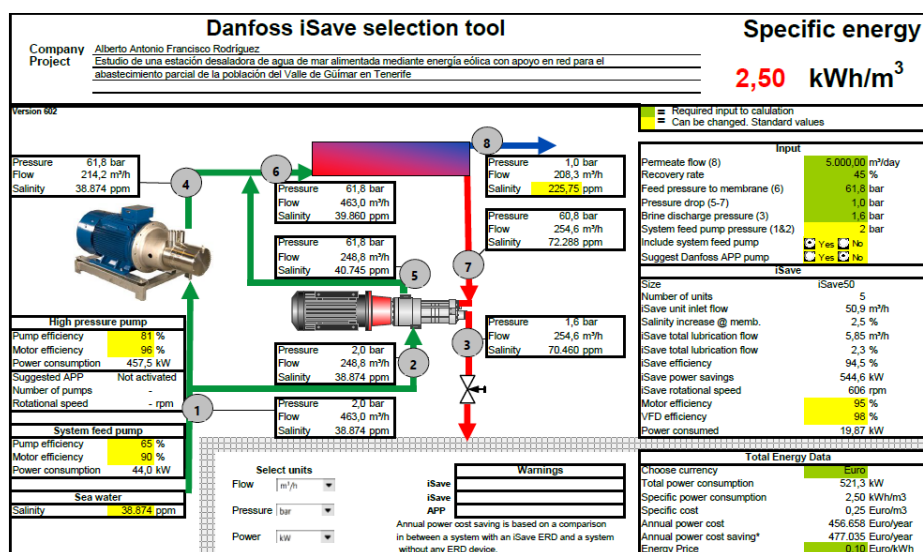


Figura 13. Hoja Excel de dimensionado del sistema de intercambio de presión con equipos iSave de Danfoss.

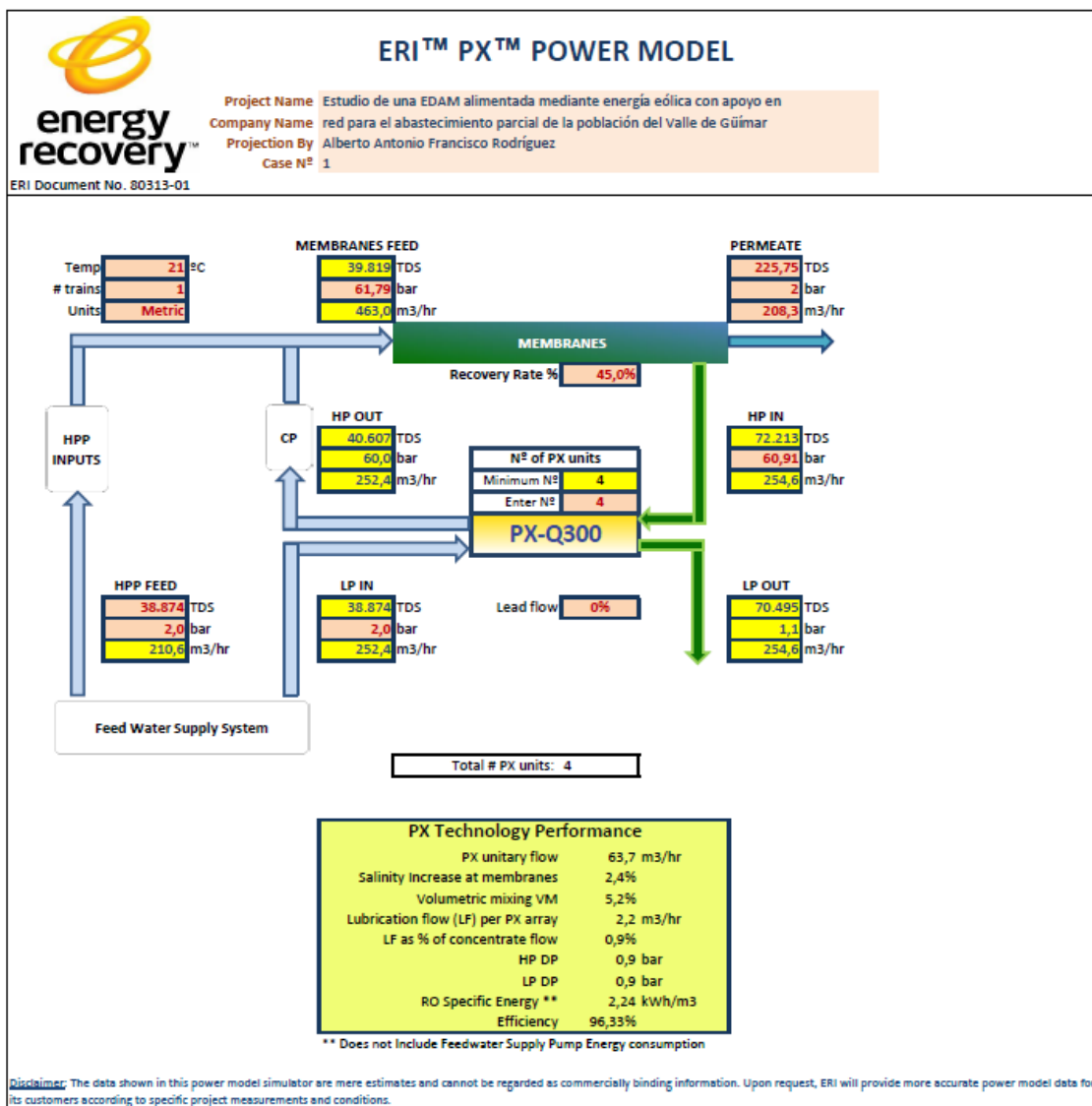


Figura 14. Hoja Excel de dimensionado del sistema de intercambio de presión con equipos PX de ERI.

2.1.3. DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE INTERCAMBIO DE PRESIÓN Y COMPROBACIÓN DE LA CALIDAD DEL PERMEADO

Tras la selección del modelo PX-Q300 para su uso en el sistema de recuperación de energía, se valora la posibilidad de aumentar el número de intercambiadores de presión en el sistema para reducir aún más el consumo específico. Ello se hará haciendo uso de la hoja Excel del ERI PX, donde se puede introducir manualmente el número de unidades deseadas.

La tabla 8 muestra los resultados obtenidos y de ellos podemos concluir que el aumento del número de equipos no ofrece una gran reducción del consumo específico. Aun así, como se ha visto en el anexo I toda reducción de

éste, por pequeña que sea, resulta muy favorable por el ahorro energético que se consigue a largo plazo, aunque ello implique el aumento de la inversión inicial por la compra de dos equipos extra (uno para cada línea de producción).

Unidades	C.E. (kWh/m ³)	Alertas
4	2,24	-
5	2,23	-
6	2,22	Flujo por equipo inferior a lo recomendado.

Tabla 8. Efecto del aumento del número de intercambiadores de presión en el consumo específico

Teniendo en cuenta lo anterior, se opta por la incorporación de 5 intercambiadores de presión PX-Q300 en cada línea de producción, por lo que el total de éstos en la planta desaladora es de 10. Con ellos se consigue pasar de un consumo específico de 4,89 kWh/m³ a 2,23 kWh/m³, un valor razonable pues a falta de los valores de consumo específico de las bombas de captación y distribución se consigue un valor inferior a 3 kWh/m³.

Por último, es necesario comprobar que a pesar del ligero aumento de la salinidad del agua de alimentación de las membranas se siga cumpliendo con lo que establece el Real Decreto 140/2003 sobre la calidad del agua de consumo humano. La información relativa al permeado la obtenemos de las simulaciones con Winflows, cuyos resultados se incluyen en la tabla 9. Estos datos son los correspondientes del análisis al agua producto tras el postratamiento químico con sosa cáustica con el que se regula el pH.

Parámetro	AD-440 (Sin PXs)	AD-440 (Con PXs)	RD 140/2003
pH	8	8	6,5 – 9,5
TDS (mg/L)	239,11	246,76	< 1600
Amonio (mg/L)	0,00	0,00	< 0,5
Boro (mg/L)	0,85	0,87	< 1
Cloruro (mg/L)	127,93	132,42	< 250
Fluoruro (mg/L)	0,01	0,01	< 1,5
Nitrato (mg/L)	0,01	0,01	< 50
Sodio (mg/L)	84,40	87,17	< 200
Sulfato (mg/L)	2,59	2,67	< 250

Tabla 9. Comparación de la variación de los parámetros indicadores del agua permeada con la incorporación al sistema de desalación de intercambiadores de presión

Los resultados del análisis del agua producto que se detallan en la tabla 9 indican que se produce un pequeño aumento de las concentraciones de los

parámetros indicadores, aunque en ningún caso se supera el límite que establece la normativa.

Finalmente, habiendo realizado la comprobación anterior, se indican en la figura 15 los parámetros de operación del sistema de intercambio de presión dimensionado.

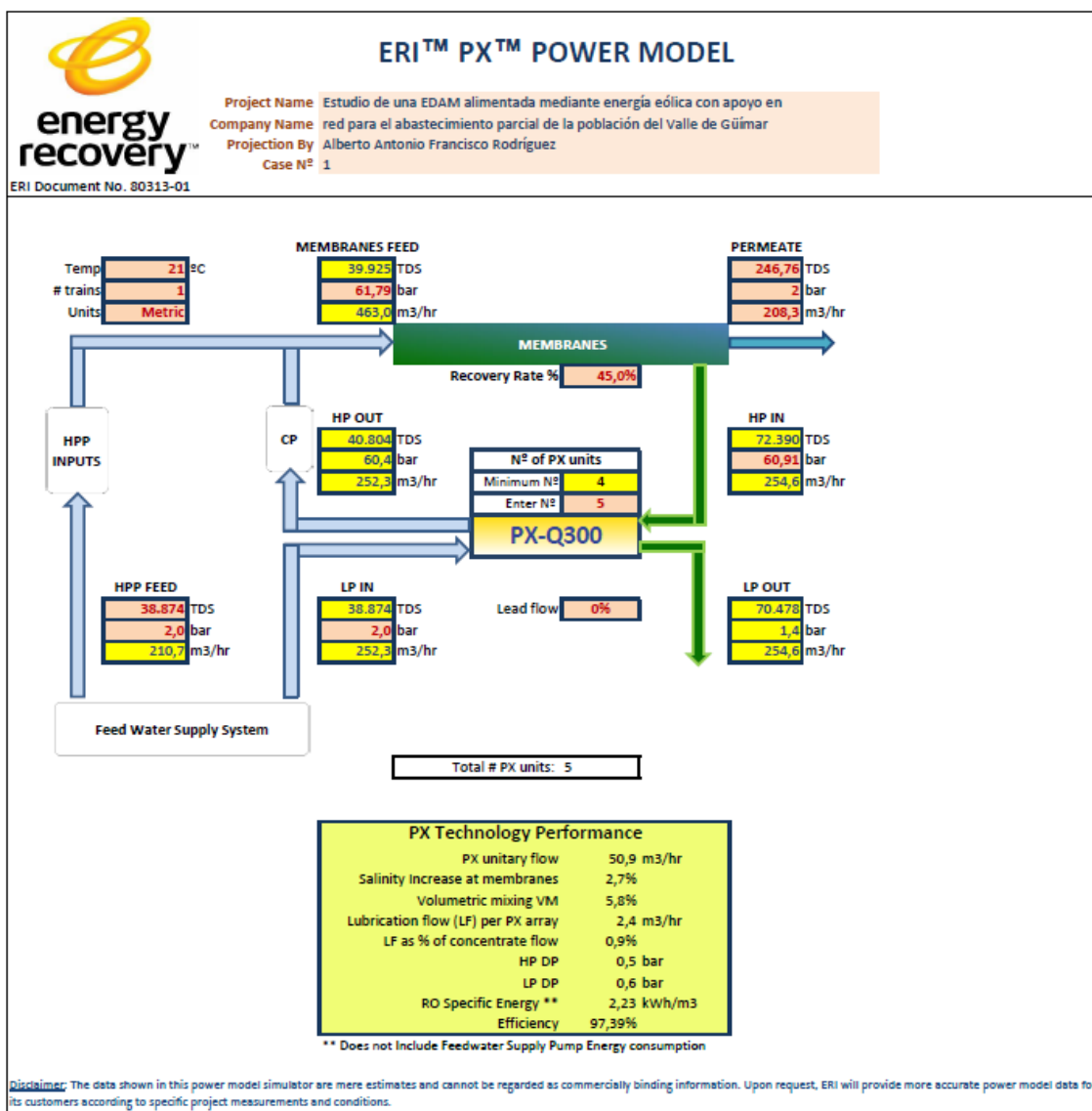


Figura 15. Sistema de intercambio de presión instalado en la planta desaladora por ósmosis inversa

2.2. SELECCIÓN DE LA BOMBA DE ALTA PRESIÓN

La energía, carga o altura que una bomba hidráulica aporta a un flujo, así como la eficiencia de ésta, varía en función del caudal. Dicha variación, que se determina experimentalmente, es característica de cada bomba y es facilitada

por los fabricantes en gráficas, donde la función parabólica representada recibe el nombre de curva motriz característica de la bomba.

Ecuación de la curva motriz característica de la bomba:

$$H(Q) = c + b \cdot Q + a \cdot Q^2 \quad (2.1)$$

Por otro lado, el sistema hidráulico en el que se incluye la bomba también tiene una curva característica, la curva del sistema, en la que se representa la variación de las pérdidas de cargas del sistema de tuberías en función del caudal. La ecuación de dicha curva se determina aplicando un balance de energía entre los puntos inicial y final que delimitan el tramo de tubería bajo estudio.

Expresando la energía del flujo en términos de altura de columna de líquido el balance de energía en el tramo de tubería sería:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + H_B = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \sum H_{r12} \quad (2.2)$$

Donde,

$$\frac{V^2}{2g} = \text{altura cinética}$$

$$\frac{P}{\gamma} = \text{altura de presión}$$

$$Z = \text{altura de cota respecto de un plano de referencia}$$

$$H_B = \text{altura útil proporcionada por la bomba}$$

$$H_r = \text{pérdidas de carga en la instalación}$$

Se distinguen dos pérdidas de cargas: las principales (producidas en los tramos de tubería) y las secundarias (producidas en los accesorios). Teniendo en cuenta que en tuberías circulares H_r viene dada por la ecuación de Darcy-Weissbach:

$$H_{r,tub.} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2g} \cdot \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \right)^2 = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot Q^2 = r_{tub.} \cdot Q^2 \quad (2.3)$$

Donde,

$$f = \text{coeficiente de fricción en tuberías}$$

$L =$ Longitud del tramo de tubería

$g =$ aceleración de la gravedad

$D =$ diámetro de la tubería

$r =$ resistencia hidráulica

$Q =$ caudal

Por otro lado, las pérdidas de carga debidas a los accesorios presentes en el tramo de tubería (válvulas, codos, ensanchamientos o estrechamiento de sección, etc.) se obtienen multiplicando la altura cinética por un coeficiente adimensional de pérdida, K:

$$H_{r,acc.} = K \cdot \frac{V^2}{2g} = K \cdot \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4} \cdot Q^2 = r_{acc.} \cdot Q^2 \quad (2.4)$$

Finalmente, la ecuación de la curva del sistema sería:

$$H_B = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + (Z_2 - Z_1) + \left(\sum r_{tub.} + \sum r_{acc.} \right) \cdot Q^2 \quad (2.5)$$

Al superponer las curvas del sistema y característica de la bomba se da una intersección entre ellas que representa el punto de operación de la bomba en el sistema de tuberías en el que se instala, es decir, la carga útil aportada por la bomba y el caudal que ésta debe desplazar con los que se satisfacen las necesidades de carga del sistema.

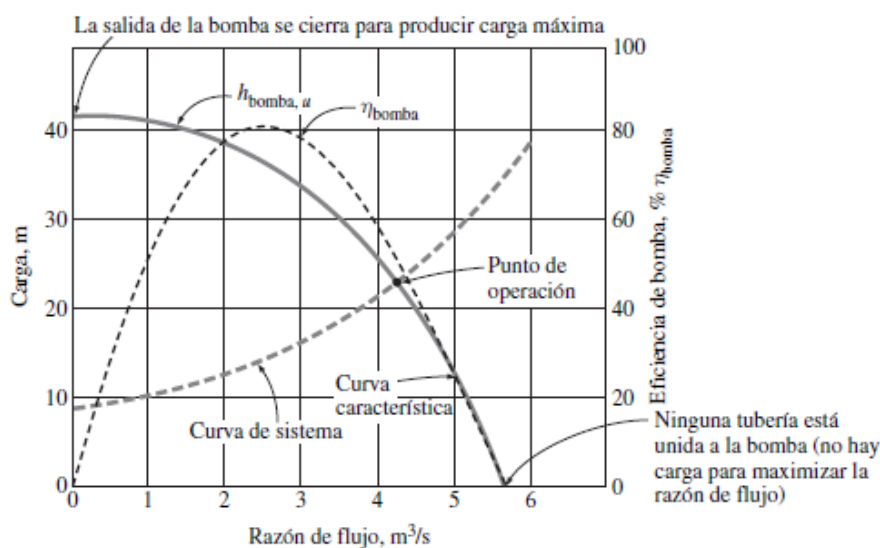


Figura 16. Curva característica para bombas centrífugas, curva del sistema para un sistema de tuberías y punto de operación (Çengel y Cimbala, 2012)

El hecho de que una bomba pueda suministrar la carga y el caudal necesarios no es suficiente para determinar que ésta es adecuada para un sistema hidráulico, pues es necesario además que el rendimiento (o eficiencia) de la bomba en dichas condiciones sea lo suficientemente alta. Esto es especialmente importante en la bomba de alta presión ya que se trata del equipo de mayor consumo de la instalación. En este caso la eficiencia de la bomba debe ser un valor cercano al 80%.

Los fabricantes facilitan herramientas de selección de bombas en las que con la introducción del caudal y la carga útil que ésta debe proporcionar, normalmente expresada en términos de altura manométrica, se determina el punto de operación y se presentan aquellas que tienen un mayor rendimiento. Por ello, conocido el caudal que debe desplazar la bomba de alta presión (210,7 m³/h), se debe calcular la carga útil que la bomba debe aportar al agua de alimentación de las membranas.

Teniendo en cuenta que a la entrada de la BAP la presión se ha fijado en 2 bar para prevenir que se produzca cavitación en la bomba y que se debe descargar el agua de alimentación a 61,79 bar en las membranas, se aplica la ecuación 2.5 entre estos puntos considerando que:

- Las variaciones de la altura cinética y la altura de cota entre dichos puntos son de orden inferior al término dominante (altura de presión) y, por tanto, se desprecian.
- La longitud del tramo de la tubería de impulsión que va hasta las membranas es pequeña, por lo que las pérdidas de carga producidas son despreciables.
- Las pérdidas de cargas de los accesorios aparecen distantes unas de otras y las válvulas presentes se encuentran abiertas, por lo que dichas pérdidas tienen poca importancia y se desprecian.

Por tanto,

$$H_B = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} \quad (2.6)$$

Donde γ es el peso específico del agua de alimentación, que resulta del producto de su densidad y la aceleración de la gravedad. La densidad del agua

de alimentación, así como la del resto de los flujos, se obtiene de la aplicación web *Water Density Calculator* elaborada por la Universidad de Michigan y la Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos. En ella es necesario la introducción de dos datos: la temperatura del flujo (21°C) y su salinidad. En la tabla 10 se indican los resultados y, como era de esperar, los flujos con un mayor número de sales disueltas son aquellos que presentan una mayor densidad.

Figura 17. Herramienta web *Water Density Calculator*

Flujo	TDS (mg/L)	Densidad (kg/m ³)	γ (N/m ³)
Agua alimentación BAP	38.874	1.027,475	10.079,53
Agua alimentación booster	40.804	1.028,949	10.093,99
Permeado	246,8	998,210	9.792,44
Salmuera	70.478	1.051,841	10.318,56

Tabla 10. Densidades y pesos específicos de los flujos de la planta desaladora

Teniendo en cuenta la densidad del agua de alimentación de la BAP, la carga útil que esta bomba debe aportar a dicho flujo resulta ser de 593,18 m.

$$H_{BAP} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} = \frac{(61,79 - 2) \text{ bar} \cdot \frac{100.000 \text{ N/m}^2}{1 \text{ bar}}}{10.079,53 \text{ N/m}^3} = 593,18 \text{ m}$$

Una vez se ha determinado la altura útil de la bomba, ya se cuenta con todos los datos que solicitan los fabricantes. En concreto se estudiarán las bombas que ofrecen cuatro fabricantes: Flowserve, KSB, Lowara y Sulzer, siendo sus herramientas de selección de bombas Affinity, KSB Easy Select, Xylect y Sulzer Select, respectivamente.

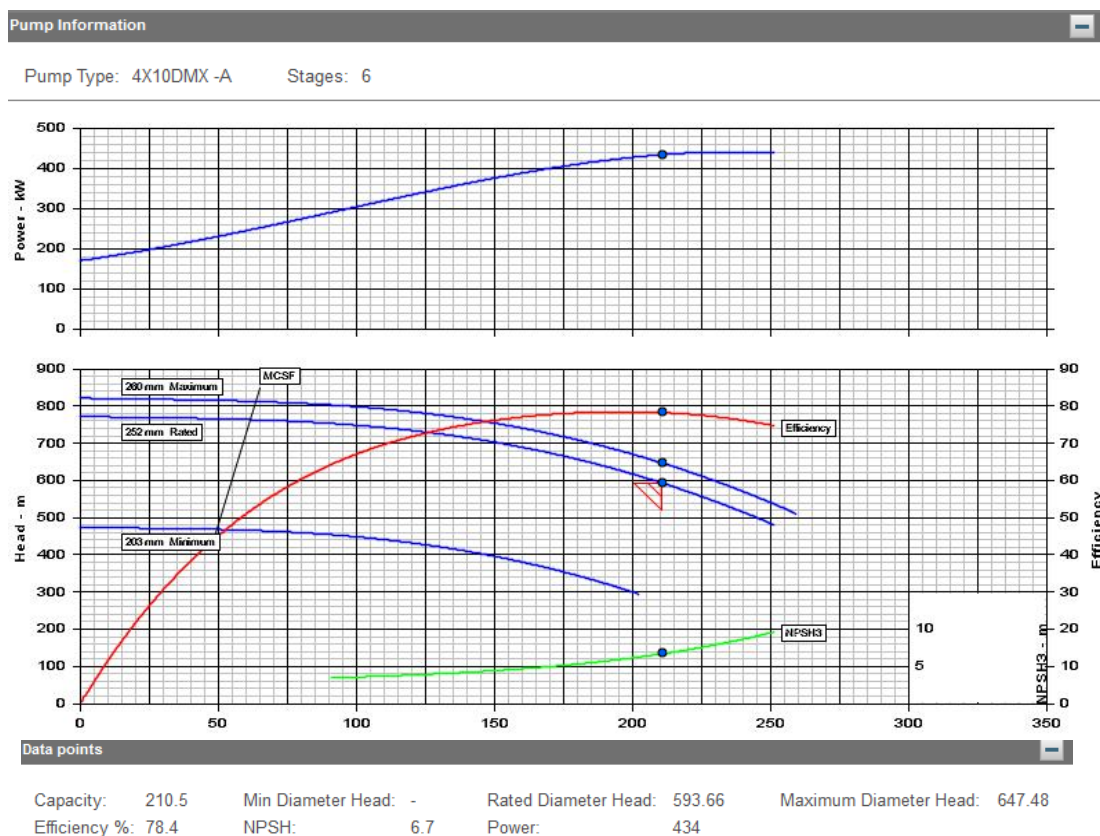


Figura 18. Curvas características de la bomba 4x10DMX-A de Flowserve

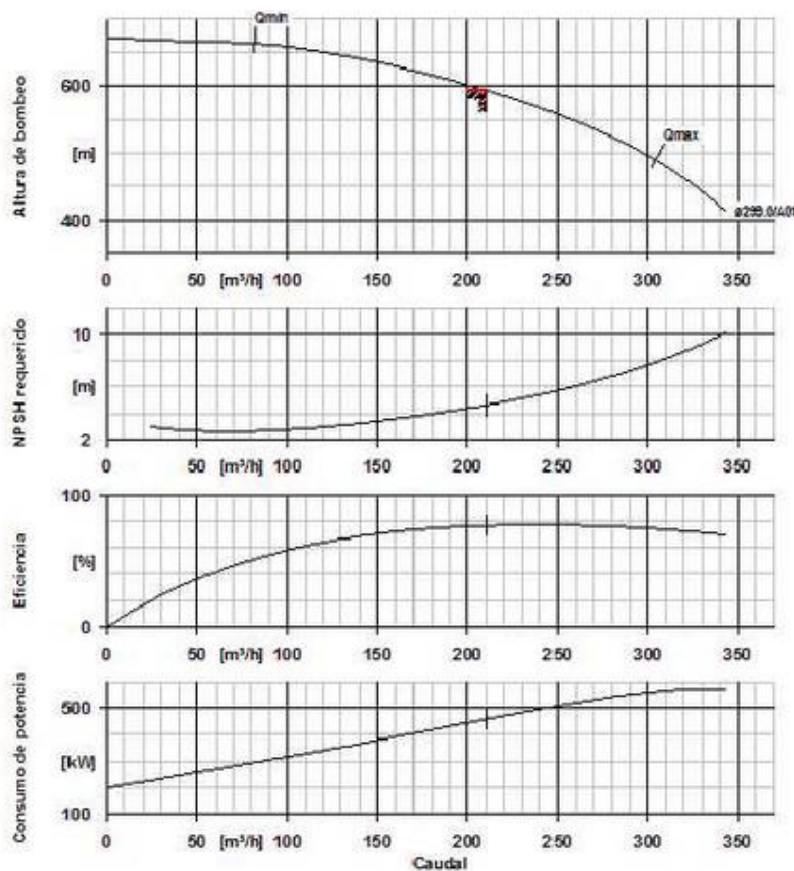


Figura 19. Curvas características de la bomba Multitec CA 125-9.1 de KSB

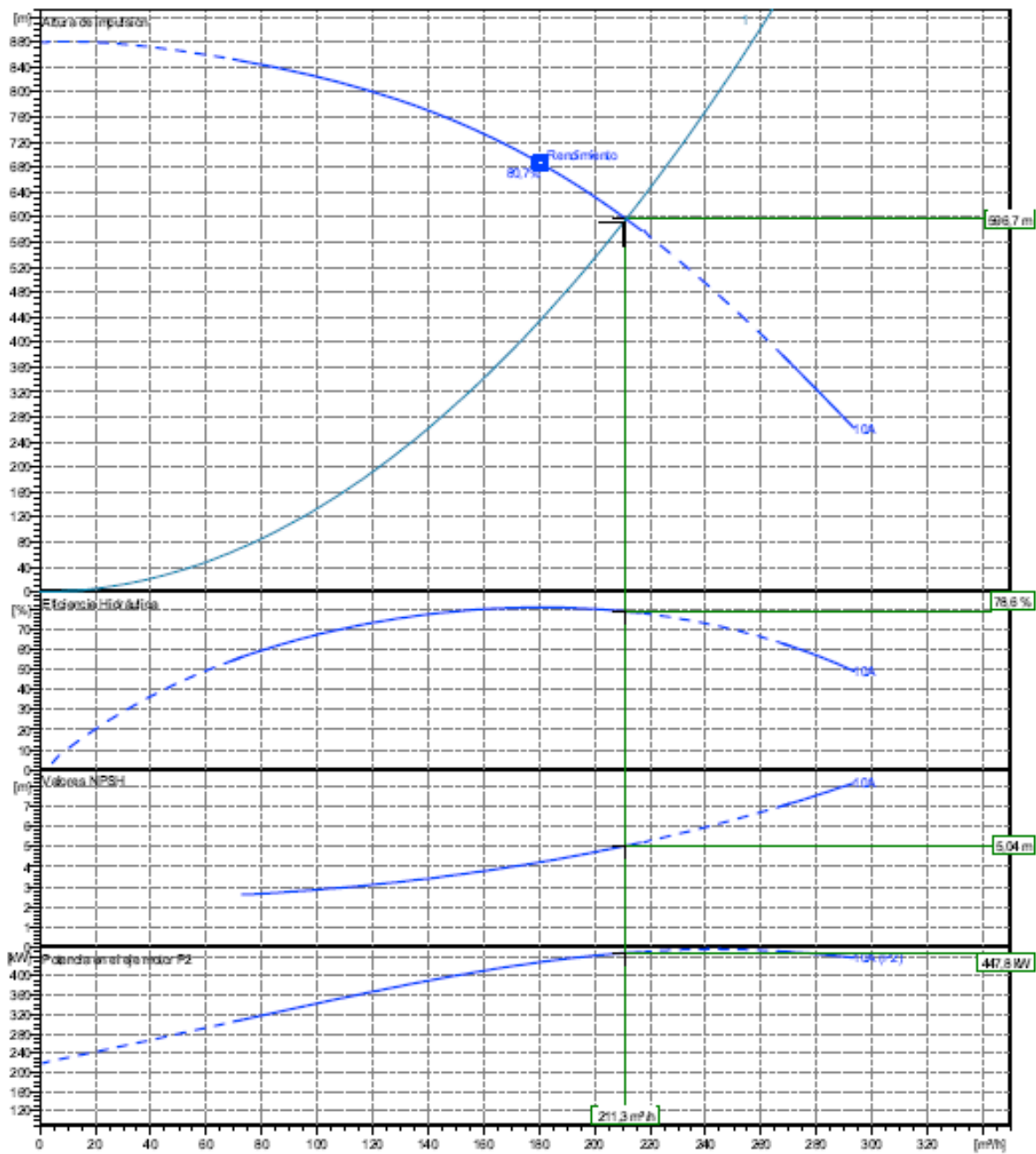


Figura 20. Curvas características de la bomba MPAE100B/10A de Lowara

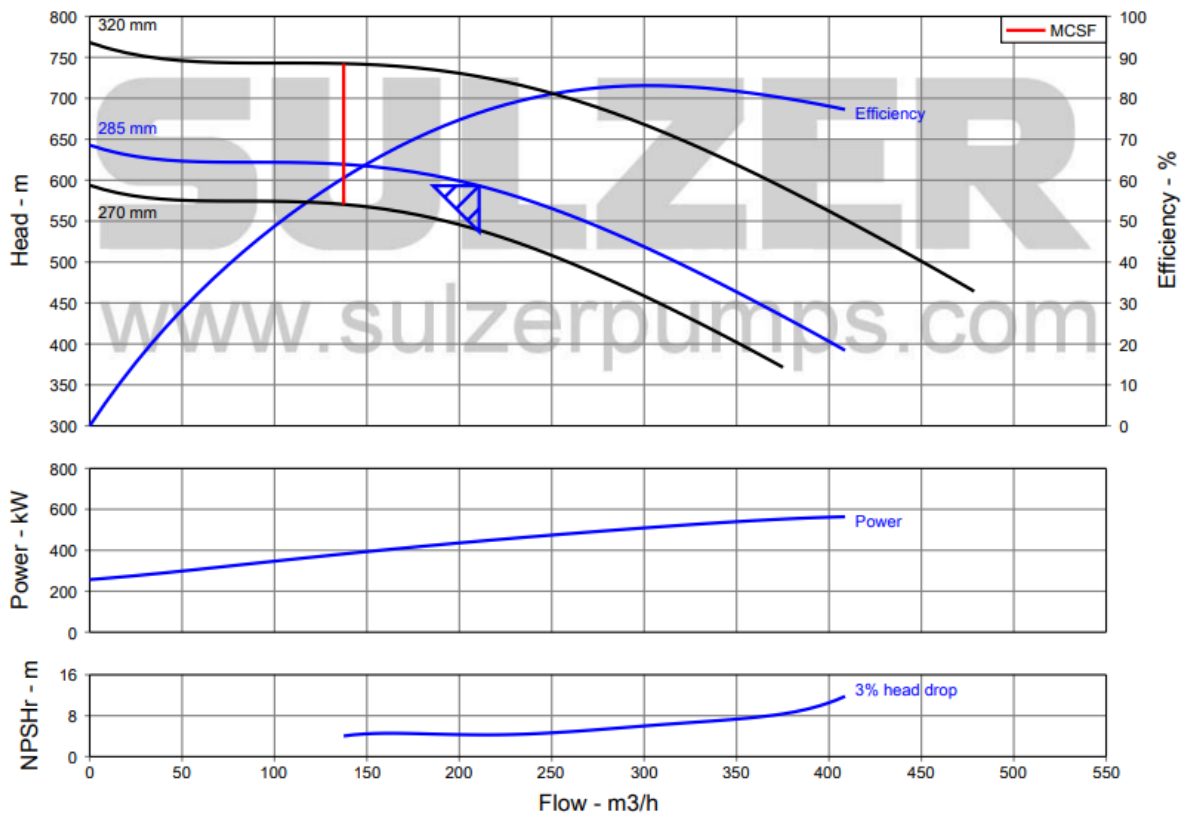


Figura 21. Curvas características de la bomba MBN RO 150-320 E de Sulzer

Modelo de la bomba	Fabricante	Eficiencia (%)
4x10DMX-A	Flowserve	78,4
Multitec CA 125-9.1	KSB	76,5
MPAE100B/10A	Lowara	78,6
MBN RO 150-320 E	Sulzer	76,5

Tabla 11. Rendimientos de las bombas de alta presión seleccionadas

En la tabla 11 se resumen los rendimientos de cada modelo. Como se puede ver, el valor más favorable se consigue con la bomba centrífuga multietapa (10) MPAE100B/10A de la e-MPA Series de Lowara, por lo que será esta la bomba de alta presión que se instalará en la planta desaladora. Sin embargo, y como suele ocurrir, la bomba opera en unas condiciones ligeramente desviadas a las requeridas, pues no aporta la altura útil calculada sino una mayor (596,7 m) y ello lo hace desplazando un caudal también mayor (211,3 m3/h). Esto no supone un problema para el diseño del núcleo de desalación dimensionado porque en cualquier caso la producción de permeado no sería inferior a lo establecido y la presión de alimentación de la membrana no aumenta tanto ($\Delta P = 0,35$ bar) como para suponer un riesgo de reducción de la

productividad prevista por el aumento de la compactación de la membrana a largo plazo.

Asimismo, la bomba de alta presión seleccionada requiere de una potencia de 447 kW, que es suministrada por un motor eléctrico WEG W22 IE3 de 450 kW al que se acopla. Éste motor tiene una eficiencia del 96%, por lo que el consumo del motor de la bomba resulta ser 469 kW. Por otro lado, se debe tener en cuenta que la altura neta de entrada requerida (NPSH_r) por la bomba es de 5,04 m, valor que debe ser comparado con la altura neta de entrada disponible (NPSH_d).

$$NPSH_d = \frac{V_E^2}{2g} + \frac{P_E}{\gamma} - \frac{P_S}{\gamma} > NPSH_r \quad (2.7)$$

Donde,

$$\frac{V_E^2}{2g} = \text{altura cinética a la entrada de la bomba}$$

$$\frac{P_E}{\gamma} = \text{altura de presión a la entrada de la bomba}$$

$$\frac{P_S}{\gamma} = \text{altura de presión de saturación del flujo}$$

La presión de saturación del agua de mar depende, además de su temperatura, de su salinidad. Esta presión se determinará con el uso de unas tablas de propiedades del agua de mar realizadas por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), siendo necesario para entrar en ellas la temperatura del agua (21°C) y su salinidad en g/kg, que se calcula con el cociente del TDS y la densidad.

En el caso del agua de alimentación de la bomba de alta presión:

$$\text{Salinidad} = \frac{38.874 \frac{mg}{L} \cdot \frac{1000 L}{1 m^3} \cdot \frac{1 g}{1000 mg}}{1.027,475 \frac{kg}{m^3}} = 37,83 \text{ g/kg}$$

Aproximando las propiedades del agua de mar a 20°C, se interpola entre los valores para 30 g/kg y 40 g/kg (figura 22):

$$P_s = \frac{(2,289 - 2,303) \text{ kPa}}{(40 - 30) \text{ g/kg}} \cdot (37,83 - 30) \frac{g}{kg} + 2,303 \text{ kPa} = 2,292 \text{ kPa}$$

Vapor (saturation) pressure of seawater, kPa

Temp. °C	Salinity, g/kg												
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
0	0.611	0.608	0.605	0.602	0.598	0.594	0.590	0.586	0.582	0.577	0.572	0.567	0.562
10	1.228	1.222	1.216	1.209	1.202	1.194	1.186	1.177	1.168	1.159	1.149	1.139	1.129
20	2.339	2.328	2.316	2.303	2.289	2.274	2.259	2.242	2.225	2.207	2.189	2.170	2.149
30	4.246	4.226	4.204	4.180	4.155	4.129	4.101	4.071	4.040	4.008	3.974	3.939	3.902
40	7.383	7.348	7.310	7.269	7.226	7.179	7.131	7.079	7.025	6.969	6.910	6.849	6.786
50	12.350	12.291	12.227	12.159	12.086	12.009	11.927	11.841	11.751	11.656	11.558	11.456	11.350
60	19.944	19.849	19.746	19.635	19.518	19.393	19.261	19.122	18.976	18.824	18.665	18.500	18.329
70	31.198	31.049	30.888	30.715	30.531	30.336	30.129	29.912	29.684	29.446	29.198	28.940	28.672
80	47.412	47.185	46.941	46.678	46.399	46.102	45.788	45.457	45.111	44.749	44.372	43.980	43.573
90	70.180	69.845	69.483	69.095	68.681	68.241	67.776	67.287	66.775	66.239	65.681	65.100	64.499
100	101.419	100.934	100.411	99.850	99.252	98.616	97.945	97.239	96.498	95.723	94.916	94.078	93.208
110	143.384	142.699	141.960	141.166	140.320	139.422	138.473	137.474	136.426	135.332	134.191	133.005	131.776
120	198.665	197.736	196.712	195.613	194.440	193.195	191.880	190.496	189.045	187.528	185.947	184.304	182.601

Figura 22. Presión de saturación del agua de mar (MIT)

Flujo	TDS (mg/L)	Densidad (kg/m³)	Salinidad (g/kg)	Ps (kPa)
Agua alimentación BAP	38.874	1.027,475	37,83	2,292
Agua alimentación booster	40.804	1.028,949	39,66	2,289
Permeado	246,8	998,210	0,25	2,339
Salmuera	70.478	1.051,841	67,00	2,247

Tabla 12. Presión de saturación de los flujos de la planta desaladora

Dado que el fabricante nos indica que el diámetro nominal de aspiración de la bomba es de 150 mm y la presión a la entrada se ha fijado en 2 bar (200 kPa) haciendo uso de la ecuación 2.7 el NPSHd sería:

$$NPSH_d = \frac{V_E^2}{2g} + \frac{P_E}{\gamma} - \frac{P_S}{\gamma} = \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4} \cdot Q^2 + \frac{P_E - P_S}{\gamma}$$

$$NPSH_d = \frac{8 \cdot \left(211,3 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s}\right)^2}{9,81 m/s^2 \cdot \pi^2 \cdot 0,150^4 m^4} + \frac{(200 - 2,292) kN/m^2}{10,079 kN/m^3} = 20,18 m > 5,04 m$$

Como se puede ver, al fijar la presión de entrada en 2 bar se evita el riesgo de cavitación en la bomba con un buen margen de seguridad ya que el NPSHd es cuatro veces mayor que el NPSHr.

2.3. SELECCIÓN DE LA BOMBA BOOSTER

El caudal del agua de alimentación que pasa por los intercambiadores de presión no sale de ellos a la presión de alimentación de las membranas, sino que es un tanto menor. Esta bomba debe elevar la presión de dicho caudal (252,3 m³/h) de 60,4 bar a 61,79 bar.

Se calcula la altura útil que debe proporcionar esta bomba auxiliar haciendo uso de la ecuación 2.6 y manteniéndose las mismas consideraciones que se usaron para llegar a dicha expresión:

$$H_{aux.} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} = \frac{(61,79 - 60,40) \text{ bar} \cdot \frac{100.000 \text{ N/m}^2}{1 \text{ bar}}}{10.093,99 \text{ N/m}^3} = 13,77 \text{ m}$$

Se estudian las bombas que ofrecen los fabricantes Flowserve, KSB, Sulzer y Grundfos para este tipo de propósitos. En el caso de este último fabricante, su herramienta de selección de bombas se llama Grundfos Product Center.

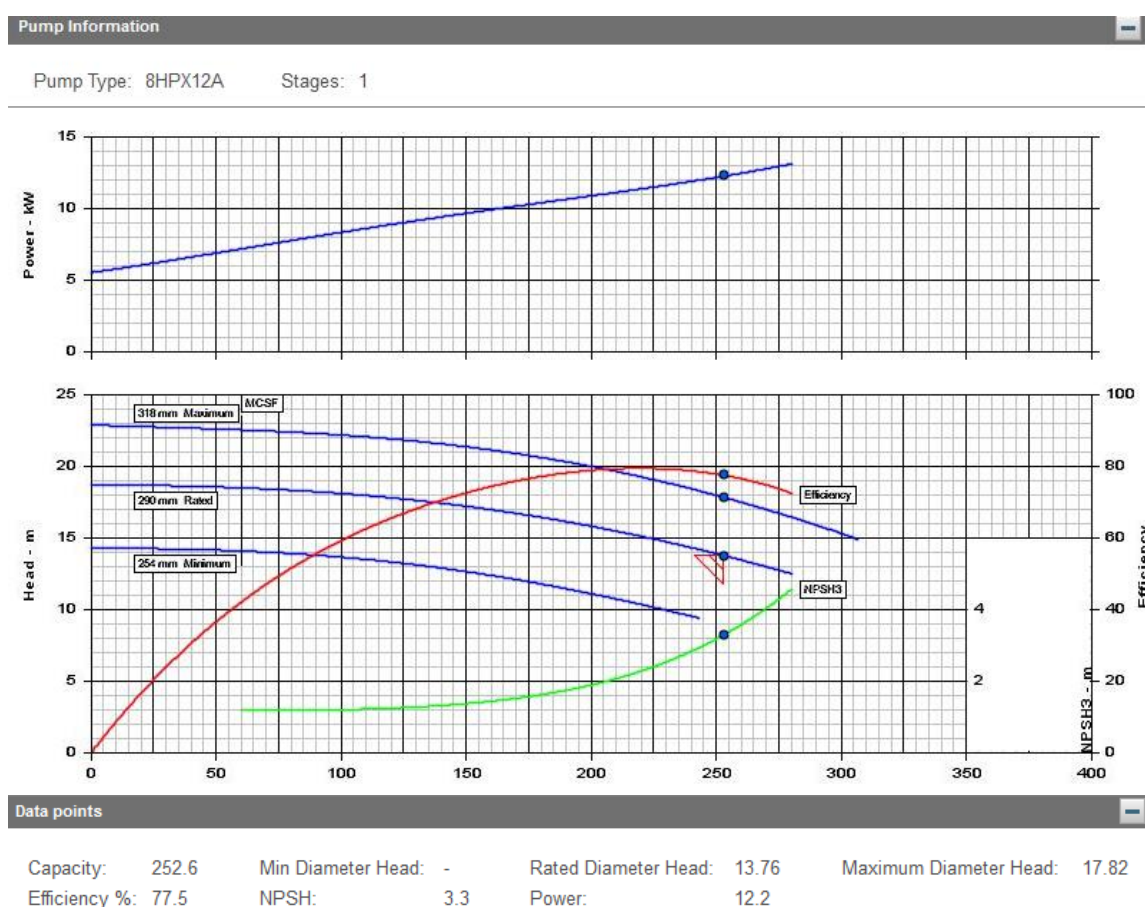


Figura 23. Curvas características de la bomba 8HPX12A de Flowserve

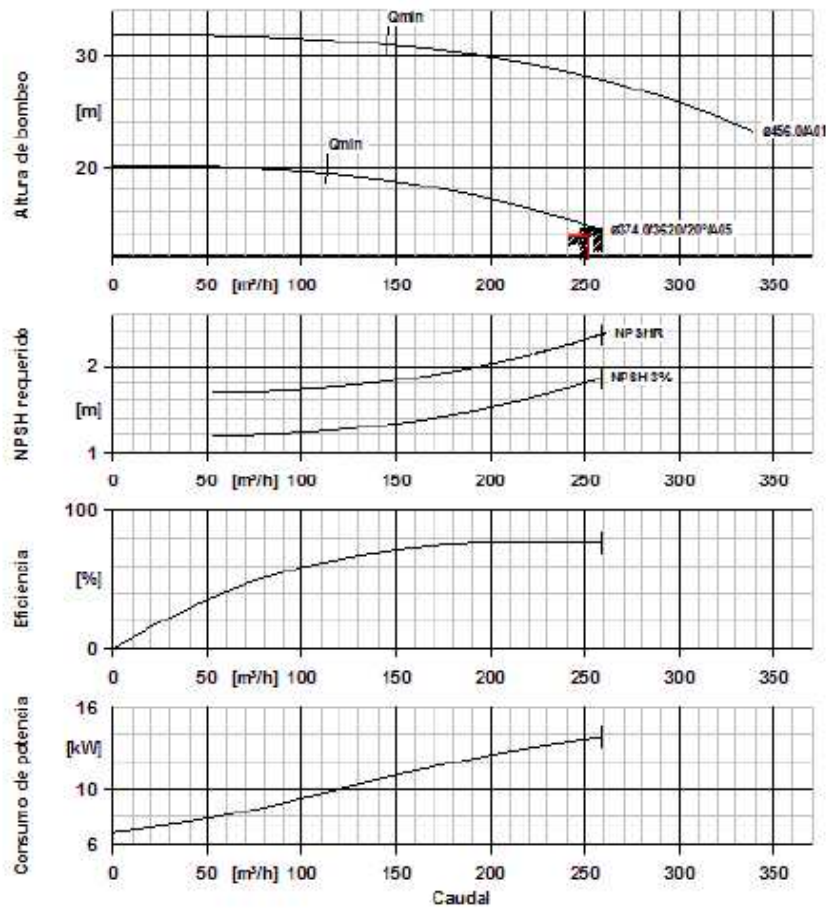


Figura 24. Curvas características de la bomba RPH 200-450A de KSB

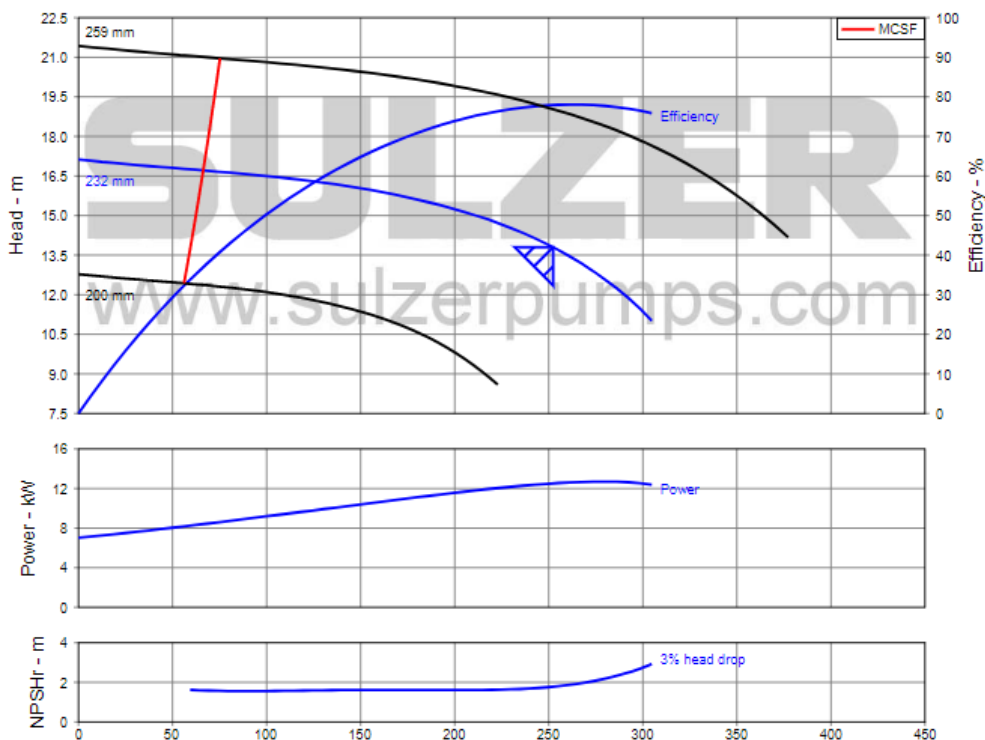


Figura 25. Curvas características de la bomba ZE 200-250 de Sulzer

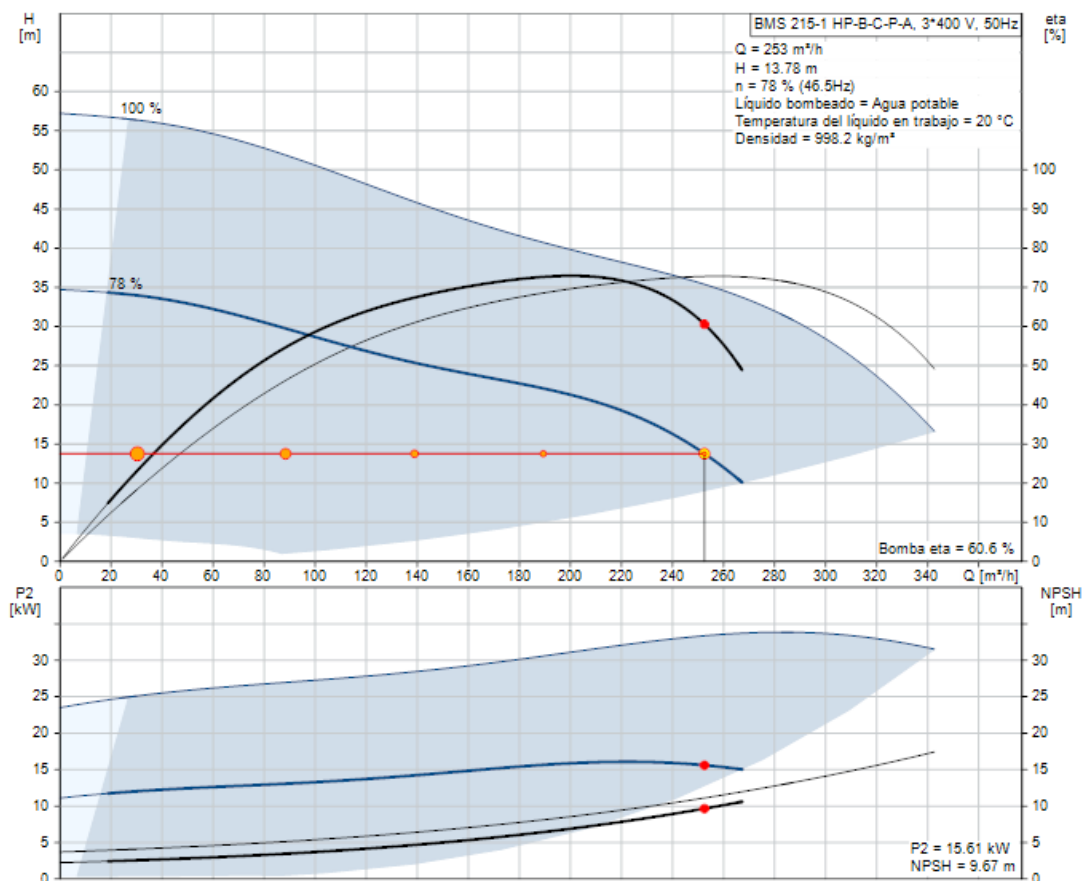


Figura 26. Curvas características de la bomba BMS 215-1 HP-B-C-P-A de Grundfos

Modelo de la bomba	Fabricante	Eficiencia (%)
8HPX12A	Flowserve	77,5
RPH 200-450A	KSB	76,2
ZE 200-250	Sulzer	77,9
BMS 215-1 HP-B-C-P-A	Grundfos	60,6

Tabla 13. Rendimientos de las bombas booster seleccionadas

En la tabla 13 se resumen todos los rendimientos de las bombas auxiliares seleccionadas, de las cuales la bomba centrífuga monoetapa ZE 200-250 de Sulzer es la que presenta el valor más alto, por lo que es esta la que instalará en la planta desaladora. La bomba aporta una altura útil de 13,8 m a un flujo de 252,3 m³/h. Para ello consume una potencia de 12,52 kW que es proporcionada por un motor eléctrico, cuyo modelo no se especifica ni se incluye en la ficha técnica, aunque sí se recomienda que sea de 15 kW. Teniendo en cuenta el mismo rendimiento para este motor que el de la bomba de alta presión (96%), el consumo del motor de la bomba auxiliar resulta ser de 16 kW. Asimismo, la altura neta de entrada requerida por la bomba es de 1,78 m, siendo un valor muy

pequeño en comparación con la disponible debido a la altísima presión a la entrada, por lo que no existe riesgo alguno de cavitación en la bomba.

2.4. RECÁLCULO DEL CONSUMO ESPECÍFICO DEL NÚCLEO DE DESALACIÓN

Conocidos los valores reales de los rendimientos de las bombas instaladas en el núcleo de desalación de la planta desaladora, así como sus puntos de operación, se procede a introducir dichos valores en la hoja Excel de dimensionado de los intercambiadores de presión PX de ERI.

HIGH PRESSURE PUMP FIGURES	
<input type="radio"/> Use Auto Efficiencies	<input checked="" type="radio"/> Manual Efficiencies
Pump efficiency	79%
Motor Efficiency	96%
Q (Flowrate)	211,0 m3/hr
Diff. Pressure	59,8 bar
Electrical Power	464,4 kW
OK	

Figura 27. Introducción de los rendimientos de la BAP seleccionada

CIRCULATION PUMP FIGURES	
<input type="radio"/> Use Auto Efficiencies	<input checked="" type="radio"/> Manual Efficiencies
Pump efficiency	77,9%
Motor Efficiency	96,0%
VFD Efficiency	96%
Q (Flowrate)	252,6 m3/hr
Diff. Pressure	1,4 bar
Electrical Power	14,0 kW
OK	

Figura 28. Rendimientos de la bomba auxiliar seleccionada

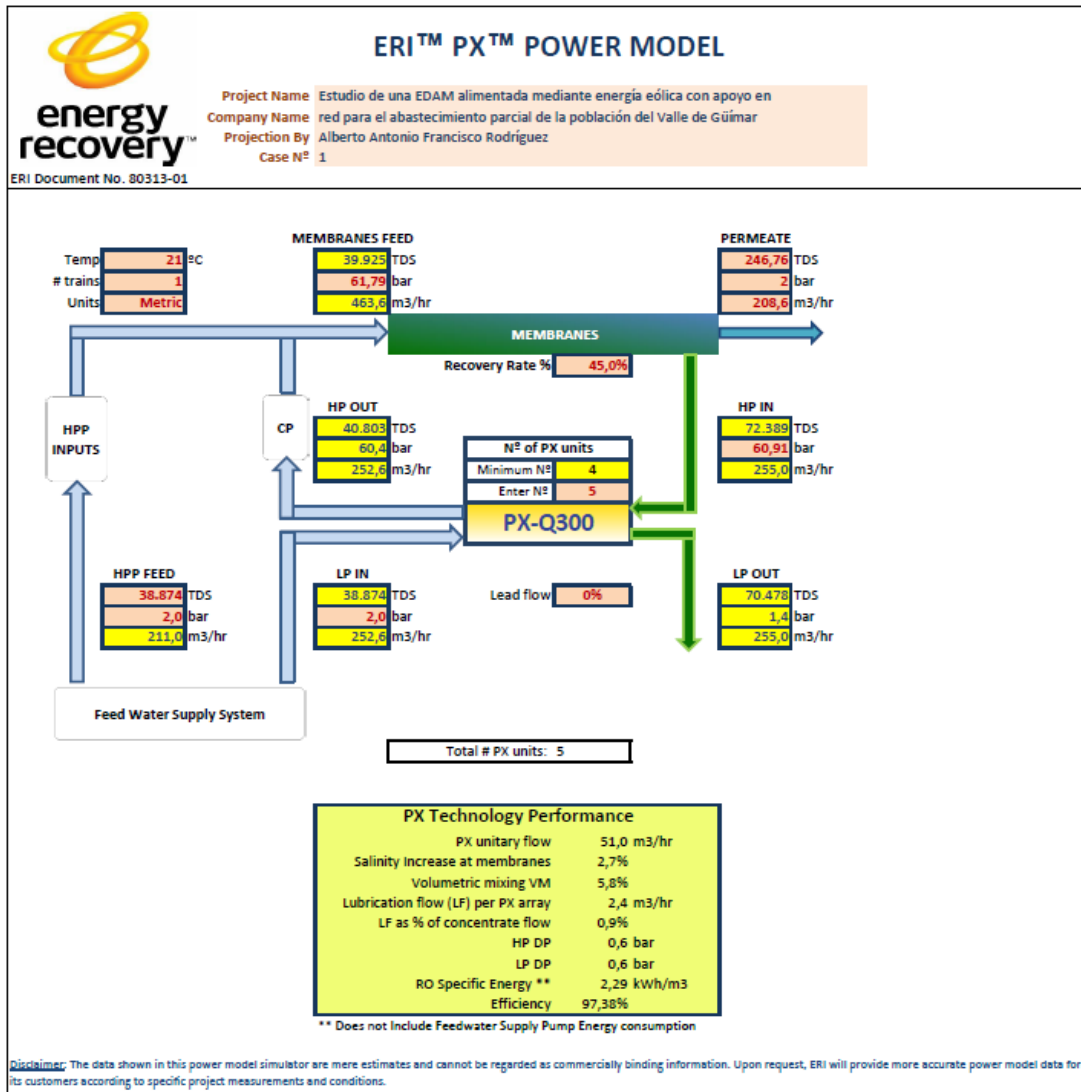


Figura 29. Parámetros de operación recalculados del sistema de intercambio de presión

Finalmente, el consumo específico del núcleo de desalación de la estación desaladora de agua de mar por ósmosis inversa estudiada en este trabajo queda establecido en 2,29 kWh/m³, lo que supone un aumento del 3% en comparación con lo obtenido en el apartado 2.1.3 debido a la reducción de los rendimientos de las bombas de alta presión y auxiliar con respecto a los supuestos inicialmente, cuyos valores se habían establecido en 81% y 80%, respectivamente.

ANEXO III

DIMENSIONADO DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y EVACUACIÓN DE LA SALMUERA

3. DIMENSIONADO DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y EVACUACIÓN DE LA SALMUERA

3.1. SISTEMA DE CAPTACIÓN

El proceso de desalación de agua de mar se inicia con el aprovisionamiento de este recurso, que puede hacerse mediante tomas abiertas o bien mediante tomas cerradas con pozos de captación.

La toma abierta consiste en la captación del agua de mar a una determinada distancia de la costa. El agua se recoge en un depósito, que no es siempre necesario, desde el cual se impulsa con el uso de las correspondientes bombas hasta la planta desaladora. Este método de captación puede realizarse con tomas en canal (toma superficial) o con emisarios submarinos (toma profunda). El primero se caracteriza por tener una toma notablemente afectada por la acción del oleaje, la presencia de algas y demás contaminantes, mientras que con el segundo se reducen estos problemas.

Por otro lado, en la toma cerrada el aprovisionamiento del agua de mar se hace desde un pozo situado en una zona costera que se llena gracias a la permeabilidad del terreno, que actúa como un filtro natural.

Tipo de captación	Ventajas	Desventajas
Toma abierta	<ul style="list-style-type: none"> - Caudal asegurado incluso para posibles ampliaciones. - Bajo mantenimiento. Sólo requiere inspección y limpieza anual de las rejillas del filtro colador. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contenido de sólidos en suspensión y actividad tanto orgánica como biológica importante. - Mayores condicionantes ambientales (ej. Amplio margen de variación de temperaturas). - Es necesaria la ejecución de costosas obras marinas.
Toma cerrada	<ul style="list-style-type: none"> - Baja contaminación. - Bajos índices de turbidez (NTU) y de colmatación (SDI). - Ausencia de actividad orgánica y biológica. - Temperaturas estables. - Bajo contenido de oxígeno disuelto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contenido importante de elementos secundarios como Fe, Al, Si, F, entre otros. - Reducción de caudales con el paso del tiempo por la obstrucción debida a elementos finos que arrastra el flujo de agua.

Tabla 14. Ventajas y desventajas de los métodos de captación de agua de mar

Haciendo un balance de las ventajas y desventajas que ofrecen estos métodos (tabla 14) se llega a la conclusión de que la captación por pozos es la más conveniente ya que favorece la estabilidad de la temperatura del agua de alimentación y se consigue reducir la inversión del pretratamiento necesario gracias al filtrado natural que estos ofrecen. Además, la captación cerrada resulta ser el sistema elegido por las plantas de pequeña y mediana producción, siendo el implantado en las desaladoras de Santa Cruz y Granadilla.

3.1.1. POZOS DE CAPTACIÓN

Habiéndose establecido la toma cerrada como el sistema de captación elegido, se ha de determinar en primer lugar el número de pozos que requiere la estación desaladora. Para ello es necesario la realización de un estudio geotécnico del terreno donde se pretende situar los pozos para analizar la capacidad de permeabilidad de éste. Sin embargo, dicho estudio no forma parte del alcance de este trabajo, por lo que el número de pozos se estimará analizando los que tienen las desaladoras de Santa Cruz y Granadilla para conseguir sus producciones de permeado.

Dado que la desaladora de Santa Cruz cuenta con 8 pozos de captación para alcanzar una producción de 20.000 m³/día, y la de Granadilla cuenta con 7 para una producción de 14.000 m³/día, se determina que esta estación desaladora de 10.000 m³/día de producción debe contar con 5 pozos. Además, se introduce un pozo más de reserva, que entraría en funcionamiento en caso de mantenimiento de alguno de los otros pozos, una avería de alguna de sus bombas de captación o por no alcanzarse el caudal previsto con los otros pozos. Este pozo de reserva se rota con el objetivo de facilitar las operaciones de mantenimiento y repartir la carga de trabajo entre todas las bombas de captación.

Estos pozos se deciden ubicar, tal y como se recoge en el Plan Hidrológico de Tenerife (figura 30), a un lado de la actual EDAM portátil y paralelos a la costa, tal y como se puede ver en la figura 31. Se distribuyen en dos grupos de tres pozos, que se sitúan a los lados de un barranco que discurre por las proximidades de la estación desaladora. El caudal de los pozos de cada grupo se recoge en una tubería colectora de captación (azul), y a su vez los caudales de estas dos tuberías se recogen en una tubería de alimentación (verde) que

suministra el caudal requerido por la planta desaladora, establecido en 927,2 m³/h.

La distancia entre el punto de entrada de caudales del colector y los pozos de cada grupo es de 20 m. Asimismo, la longitud de cada tramo de tubería colectora de captación es de 75 m y la longitud del tramo de tubería de alimentación es de 390 m.



Figura 30. Infraestructuras del Valle de Güímar para el suministro de agua de mar desalada (Consejo Insular de Aguas de Tenerife)



Figura 31. Ubicación de los pozos de captación y representación de las redes de tuberías de alimentación de la EDAM del Valle de Güímar

En segundo lugar, se ha de determinar la profundidad mínima del pozo de captación, para lo que se ha de tener en cuenta una serie de factores:

- La diferencia de cota entre el punto más alto de la parcela en la que se construyen los pozos y el nivel del mar. Para ello se hace uso de la herramienta web de información geográfica Goolzoom, con la que obtenemos el perfil de elevación del terreno. De esta manera se ha podido determinar que dicha elevación con respecto al nivel del mar resulta ser de 4,18 m.



Figura 32. Elevación máxima del terreno donde se van a construir los pozos de captación (Goolzoom)

- El menor nivel del mar que puede haber. Para ello se toma el máximo nivel de bajamar registrado en la boya del Puerto de Santa Cruz de Tenerife, información que se puede consultar en la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado. La bajamar máxima registrada es de 1,40 m.

Estadística Bajamares	
Mínima (m):	-0.03
Máxima (m):	1.40
Media (m):	0.74
Desv.Est. (m):	0.25
Moda (m):	0.72
Mediana (m):	0.74
Sesgo:	0.02
Curtosis:	-0.56

Figura 33. Estadística de bajamares observadas hasta el año 2013 en la boya del puerto de Santa Cruz de Tenerife (Puertos del Estado)

- La pérdida de altura como consecuencia de la permeabilidad de los terrenos que el agua de mar tiene que atravesar hasta alcanzar el pozo. Se estima dicha pérdida de altura por filtración en 1 m.
- La disminución del nivel de la superficie libre del líquido debido al cono que se forma por la succión del agua de mar. Dicha disminución de altura se estima en 1 m.

Teniendo en cuenta todo lo anterior el nivel mínimo de la superficie libre del líquido, que debe ser la profundidad mínima del pozo, resulta ser de 7,58 m, que se aproxima por conveniencia a 8 m. A continuación, se debe determinar la profundidad necesaria, que no debe ser menor de 8 m, para que los pozos capturen los caudales necesarios para alcanzar la demanda de la planta desaladora, para lo que sería necesario el estudio geotécnico mencionado anteriormente. Nuevamente esto se estimará a partir de las dimensiones de los pozos de otras desaladoras cercanas, en concreto se decide por asignar la misma profundidad que la de los pozos de la desaladora de Santa Cruz de Tenerife, que son de 30 m.

Los pozos se recubrirán interiormente con tuberías plásticas de PVC de diámetro adecuado a la perforación para evitar así riesgos de derrumbamientos del terreno y tendrán en su tramo inferior ranuras para facilitar la entrada del agua y actuar a modo de rejillas. En estos pozos se instalarán bombas sumergibles ya que con éstas se elimina todo riesgo de cavitación en la bomba y no se hace necesario en este caso el procedimiento de cebado. Para asegurar la alimentación de la bomba es necesario que ésta se encuentre sumergida a una profundidad mucho mayor a la mínima calculada (8 m), por ello se decide situarla a 25 m.

3.1.2. TUBERÍAS

Las tuberías del sistema estarán hechas de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) del fabricante Flowtite, pues es el que facilita más información sobre su producto (diámetros nominales, rugosidad absoluta y velocidad máxima del flujo recomendada). La elección de este material se debe a las siguientes ventajas que ofrece:

- Alta resistencia a la corrosión, por lo que se consigue una larga vida útil, bajos costes de mantenimiento y propiedades hidráulicas que se mantienen constantes con el paso del tiempo.
- Es un material ligero, suponiendo tan sólo, a igualdad de diámetro y longitud, un 25% del peso de la fundición y un 10% del peso del hormigón. De esta manera se reducen los costes de transporte y no son necesarios costosos equipos para su manipulación.
- Superficie interior con un acabado excelente, con lo que se dan bajas pérdidas por rozamiento y, por tanto, las exigencias de bombeo y los costes operativos son menores.
- Material flexible que facilita el montaje, con lo que se reduce los tiempos de instalación, y admite pequeños cambios de dirección sin necesidad de accesorios.

3.1.2.1. LONGITUDES Y DIÁMETROS

En el sistema de tuberías de la captación se distinguirán, como ya se ha mencionado anteriormente, tres tramos de longitudes y diámetros diferentes: la tubería de captación, la tubería colectora de captación y la tubería de alimentación que lleva el caudal de alimentación a la etapa de pretratamiento.

- Tubería de captación.

Esta tubería presenta dos tramos, uno vertical que se sumerge en el pozo hasta la bomba de captación (25 m) y otro horizontal que va hasta el punto en el que convergen los caudales del resto de pozos del grupo (20 m). De este modo, la longitud de este tramo de tubería queda establecido en 45 m.

Por otro lado, el diámetro del tramo de tubería se debe determinar teniendo en cuenta que cada pozo debe proporcionar un quinto del caudal de alimentación, esto es 185,44 m³/h. Además, se debe comprobar que la velocidad del flujo se encuentre dentro del rango de velocidades límites aconsejadas en la bibliografía consultada (Agüera Soriano, 1996).

En cuanto a la velocidad mínima, se recomienda que no sea inferior a 0,6 m/s para evitar la decantación de partículas sólidas en suspensión y, por tanto, el riesgo de obstrucción. Asimismo, se debe tener en cuenta que velocidades

muy superiores dan lugar a mayores pérdidas de carga, fuertes golpes de ariete, erosiones y ruidos en la tubería, pero cuanto mayor es el diámetro de la tubería, mayor puede ser dicha velocidad límite. El criterio de Bonnet (ec. 3.1) estima el diámetro mínimo de la tubería con el que se conseguiría estar por debajo de la velocidad máxima para el diámetro calculado, estimación que deja de ser aceptable si éste es un valor inferior a 150 mm. En dicha ecuación se debe introducir el caudal en m³/s y el resultado se obtiene en m.

$$D \geq 0,835 \cdot Q^{2/5} \quad (3.1)$$

Introduciendo en la ecuación 3.1 el caudal de la tubería de captación se obtiene un valor mínimo para su diámetro de 255 mm, por lo que se selecciona el diámetro nominal inmediatamente superior de 300 mm.

$$D \geq 0,835 \cdot \left(\frac{185,44}{3600}\right)^{2/5} = 0,255 \text{ m} = 255 \text{ mm}$$

Diámetros

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

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

Para otros diámetros consulte con el fabricante.

Figura 34. Diámetros nominales de las tuberías de PRFV de Flowtite

D mm	50	70	100	150	200	250	300	350	400	450
V m/s	0,60	0,70	0,75	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,25	1,30
D mm	500	600	700	800	900	1000	1200	1600	2000	2500
V m/s	1,40	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,20	2,50	2,75	3,00

Figura 35. Valores máximos de velocidad para redes de distribución (L.A. Facorro Ruiz: Curso de Hidráulica, Ed. Alsina, 1960)

- Tubería colectora de captación.

Esta tubería recoge los caudales del grupo de pozos y los conduce hasta la entrada de la tubería de alimentación. La longitud de la tubería es de 75 m y el caudal que conduce es tres veces el de captación, es decir, 556,32 m³/h. Se calcula el diámetro mínimo de la tubería como lo hecho anteriormente y éste resulta ser de 396 mm, pero con una tubería de 400 mm diámetro se alcanzaría

una velocidad del flujo de 1,25 m/s, que es igual a la velocidad límite (figura 35). Por ello, se selecciona una tubería de 450 mm de diámetro nominal.

- Tubería de alimentación.

Esta tubería recoge los caudales de los colectores de captación y conduce el caudal de alimentación (927,2 m³/h) hasta la etapa de pretratamiento. La longitud de la tubería es de 390 m y el diámetro mínimo resulta ser de 485 mm, por lo que se selecciona una tubería de 500 mm de diámetro nominal.

3.1.2.2. PÉRDIDAS DE CARGA

Teniendo en cuenta que el fabricante asegura una rugosidad absoluta de las tuberías de PRFV de 0,029 mm, se procede a calcular en este apartado las pérdidas de carga en las tuberías del sistema, las pérdidas de carga en los accesorios y las pérdidas de carga en la etapa de pretratamiento, que son fundamentales para el cálculo de la altura útil que la bomba de captación debe proporcionar al flujo para que éste llegue a la entrada de la bomba de alta presión con la presión adecuada.

En primer lugar, se determinan las pérdidas de carga principales, que son las que se producen en los tramos de tuberías. Para ello se hace uso de la ecuación de Darcy-Weissbach introducida en el anexo II:

$$H_{r,tub.} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2g} \cdot \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \right)^2 = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot Q^2 = r_{tub.} \cdot Q^2 \quad (2.3)$$

Como se puede ver la única incógnita que queda por determinar es el coeficiente de fricción, f . La expresión que se ha de utilizar para su cálculo dependerá de si el régimen es laminar o turbulento, para lo que se hace necesario calcular el número de Reynolds, Re_D , que es un coeficiente adimensional que depende de la viscosidad del fluido (ν), la velocidad media del flujo (V) y, en el caso de tuberías de sección circular, de su diámetro (D).

$$Re_D = \frac{D \cdot V}{\nu} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \nu} \quad (3.2)$$

La viscosidad cinemática del fluido se determina recurriendo nuevamente a las tablas de propiedades del agua de mar del MIT. Para ello se vuelve a

aproximar la temperatura a 20°C y se interpola entre los valores de salinidad más cercanos.

Kinematic viscosity of seawater x 10⁷, m²/s P = P0 (1 atm for t <=100°C, Seawater vapor pressure for t > 100 °C) 3

Temp, °C	Salinity, g/kg													
	0	10	20	30	35	40	50	60	70	80	90	100	110	120
0	17.92	18.06	18.23	18.43	18.54	18.65	18.90	19.16	19.46	19.77	20.11	20.46	20.84	21.24
10	13.07	13.20	13.35	13.51	13.60	13.69	13.89	14.10	14.33	14.57	14.82	15.09	15.38	15.67
20	10.04	10.16	10.29	10.43	10.50	10.58	10.75	10.92	11.10	11.30	11.50	11.71	11.93	12.17
25	8.93	9.04	9.17	9.30	9.37	9.44	9.59	9.75	9.92	10.09	10.28	10.47	10.67	10.87
30	8.01	8.12	8.23	8.36	8.42	8.49	8.63	8.77	8.93	9.09	9.25	9.43	9.61	9.80
40	6.58	6.68	6.78	6.89	6.95	7.00	7.12	7.25	7.38	7.52	7.66	7.81	7.96	8.11
50	5.53	5.62	5.71	5.81	5.86	5.91	6.02	6.13	6.24	6.36	6.48	6.61	6.74	6.87
60	4.74	4.82	4.91	4.99	5.04	5.08	5.18	5.28	5.38	5.48	5.59	5.70	5.81	5.93
70	4.13	4.20	4.28	4.36	4.40	4.44	4.52	4.61	4.70	4.79	4.89	4.98	5.08	5.19
80	3.65	3.71	3.78	3.85	3.89	3.93	4.00	4.08	4.16	4.24	4.33	4.42	4.51	4.60
90	3.26	3.32	3.38	3.45	3.48	3.51	3.58	3.65	3.73	3.80	3.88	3.96	4.04	4.12
100	2.94	3.00	3.05	3.11	3.14	3.17	3.24	3.30	3.37	3.44	3.51	3.58	3.65	3.73
110	2.68	2.73	2.78	2.83	2.86	2.89	2.95	3.01	3.07	3.13	3.20	3.26	3.33	3.40
120	2.46	2.51	2.55	2.60	2.63	2.65	2.71	2.76	2.82	2.87	2.93	3.00	3.06	3.12

Figura 36. Viscosidad cinemática del agua de mar (MIT)

Flujo	TDS (mg/L)	Densidad (kg/m ³)	Salinidad (g/kg)	v x 10 ⁷ (m ² /s)
Agua de mar	38.874	1.027,475	37,83	10,55
Permeado	246,8	998,210	0,25	10,04
Salmuera	70.478	1.051,841	67,00	11,05

Tabla 15. Viscosidad cinemática de los flujos de la planta desaladora

Si el número de Reynolds resulta ser menor de 2300 (número crítico de Reynolds), entonces se está en régimen laminar y f sólo depende de Re_D:

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (3.3)$$

Si por el contrario el número de Reynolds es un valor superior a 2300, se está en régimen turbulento y f depende además de la rugosidad, k, de la tubería. El coeficiente de fricción se calcula en este caso aplicando la fórmula de Colebrook (3.4), para lo que hay que suponer un valor inicial de f (entre 0,015 y 0,02) e iterar hasta que el valor de f se establezca.

$$\frac{1}{\sqrt{f_{n+1}}} = -2 \cdot \log \left(\frac{k/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re_D \cdot \sqrt{f_n}} \right) \quad (3.4)$$

- Tubería de captación.

Considerando los datos mencionados anteriormente en este apartado y en el 3.1.2.1 se calcula el número de Reynolds:

$$Re_D = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot v} = \frac{4 \cdot \frac{185,44}{3600} \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot 0,300 \text{ m} \cdot 10,55 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}} = 207.223 > 2.300$$

Se está en régimen turbulento, por lo que se aplica la fórmula de Colebrook para determinar el coeficiente de fricción. Se supondrá un valor inicial de f de 0,015 con el que empezar el proceso iterativo. Además, k/D es en este caso $9,67 \cdot 10^{-5}$.

Iteración	f
0	0,015
1	0,016411
2	0,016283
3	0,016294
4	0,016293
5	0,016293

Tabla 16. Proceso iterativo para el cálculo del coeficiente de fricción en la tubería de captación

El proceso iterativo finaliza en la quinta iteración, en la que el coeficiente de fricción se estabiliza en 0,016293. Con este dato ya es posible determinar las pérdidas de carga en el tramo de tubería de captación aplicando la ecuación 2.3:

$$H_{r,cap.} = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot Q^2 = \frac{8 \cdot 0,016293 \cdot 45 \text{ m}}{\pi^2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,300^5 \text{ m}^5} \cdot \left(\frac{185,44}{3600}\right)^2 \text{ m}^6/\text{s}^2 = 0,066 \text{ m}$$

- Tubería colectora de captación.

En este caso el número de Reynolds es 414.445, por lo que se vuelve a estar en régimen turbulento y se realiza el proceso iterativo que implica el uso de la fórmula de Colebrook. En este caso k/D es $6,44 \cdot 10^{-5}$.

Iteración	f
0	0,015
1	0,014344
2	0,014394
3	0,014390
4	0,014390

Tabla 17. Proceso iterativo para el cálculo del coeficiente de fricción en la tubería colectora de captación

El proceso iterativo finaliza en la cuarta iteración, en la que el coeficiente de fricción se estabiliza en 0,014390. Con este valor y teniendo en cuenta el resto de los parámetros de esta tubería las pérdidas de carga resultan ser de 0,115 m.

$$H_{r,col.} = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot Q^2 = \frac{8 \cdot 0,014390 \cdot 75 \text{ m}}{\pi^2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,450^5 \text{ m}^5} \cdot \left(\frac{556,32}{3600}\right)^2 \text{ m}^6/\text{s}^2 = 0,115 \text{ m}$$

Hay que tener en cuenta que, en condiciones normales, uno de los colectores no estará recibiendo caudal de todos los pozos, sino de solo dos. Por ello, en esta situación las pérdidas de carga serían menores (0,055 m) y las bombas de estos pozos tendrían que aportar una altura útil ligeramente inferior. Además, por el hecho de transportar un caudal inferior, el diámetro de esta tubería podría ser menor. Sin embargo, se realiza el dimensionado en las condiciones más desfavorables, que se dan cuando esta tubería recibe caudal de los tres pozos.

- Tubería de alimentación.

En este caso el número de Reynolds es 621.668, por lo que se vuelve a estar en régimen turbulento y se realiza el proceso iterativo que implica el uso de la fórmula de Colebrook. En este caso k/D es $5,80 \cdot 10^{-5}$.

Iteración	f
0	0,015
1	0,013440
2	0,013542
3	0,013535
4	0,013535

Tabla 18. Proceso iterativo para el cálculo del coeficiente de fricción en la tubería de alimentación

El proceso iterativo finaliza en la cuarta iteración, en la que el coeficiente de fricción se estabiliza en 0,013535. Con este valor y teniendo en cuenta el resto de los parámetros de esta tubería las pérdidas de carga resultan ser de 0,926 m.

$$H_{r,alim.} = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot Q^2 = \frac{8 \cdot 0,013535 \cdot 390 \text{ m}}{\pi^2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,500^5 \text{ m}^5} \cdot \left(\frac{927,2}{3600}\right)^2 \text{ m}^6/\text{s}^2 = 0,926 \text{ m}$$

En segundo lugar, se calculan las pérdidas de cargas debidas a los accesorios del sistema de tuberías de captación. Se calculan cuatro pérdidas carga debida a accesorios, siendo tres de ellas debidas a codos de 90° y una debida a una unión en T. Dicho cálculo se realiza aplicando la ecuación 2.4 introducida en el anexo II. Los valores de los coeficientes de pérdidas, K, se extraen de las tablas del libro Agüera Soriano, 1996.

$$H_{r,acc.} = K \cdot \frac{V^2}{2g} = K \cdot \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4} \cdot Q^2 = r_{acc.} \cdot Q^2 \quad (2.4)$$

- Pérdidas de cargas secundarias debidas a los codos de 90°.

Teniendo en cuenta que el coeficiente de pérdidas correspondiente a un codo de 90° normal es de 0,9, se calculan las pérdidas de cargas debido a ello teniendo en cuenta que la altura cinética varía en las tres situaciones:

$$H_{r,codo1} = 0,9 \cdot \frac{8}{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \pi^2 \cdot 0,300^4 \text{ m}^4} \cdot \left(\frac{195,44}{3600}\right)^2 \text{ m}^6/\text{s}^2 = 0,027 \text{ m}$$

$$H_{r,codo2} = 0,9 \cdot \frac{8}{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \pi^2 \cdot 0,450^4 \text{ m}^4} \cdot \left(\frac{556,32}{3600}\right)^2 \text{ m}^6/\text{s}^2 = 0,043 \text{ m}$$

$$H_{r,codo3} = 0,9 \cdot \frac{8}{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \pi^2 \cdot 0,500^4 \text{ m}^4} \cdot \left(\frac{927,2}{3600}\right)^2 \text{ m}^6/\text{s}^2 = 0,079 \text{ m}$$

- Pérdidas de cargas secundarias debidas al empalme en T.

Teniendo en cuenta que el coeficiente de pérdidas correspondiente a un empalme en T es de 1,8, se calculan las pérdidas de carga debido a ello considerando que la altura cinética por la que se multiplica dicho coeficiente es la que se da en la tubería de alimentación, pues es con esta altura con la que se daría la mayor pérdida de carga.

$$H_{r,T} = 1,8 \cdot \frac{8}{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \pi^2 \cdot 0,500^4 \text{ m}^4} \cdot \left(\frac{927,2}{3600}\right)^2 \text{ m}^6/\text{s}^2 = 0,158 \text{ m}$$

Por último, se ha de tener en cuenta que la presión del fluido se reduce a su paso por el pretratamiento. Se estima en 1 bar la reducción de presión tanto en la etapa con filtros de arena como en la de filtros de cartuchos, por lo que la reducción de presión en el pretratamiento resulta ser de 2 bar, que es un valor conservador pues se trata de una reducción importante de la presión, que es lo adecuado ante la falta de información detallada al respecto.

$$H_{r,pret.} = \frac{\Delta P}{\gamma_{A.M.}} = \frac{2 \text{ bar} \cdot \frac{100 \text{ KN/m}^2}{1 \text{ bar}}}{10,079 \text{ KN/m}^3} = 19,843 \text{ m}$$

	Hr (m)
Pérdidas de carga tuberías	
Captación	0,066
Colector de captación	0,115
Alimentación	0,926
Total pérdidas primarias	1,107
Pérdidas de carga accesorios	
Codo 1	0,027
Codo 2	0,043
Codo 3	0,079
Empalme en T	0,158
Total pérdidas secundarias	0,307
15% de pérdidas primarias	0,166
Pérdidas de carga en el pretratamiento	19,843
Total pérdidas de carga	21,423

Tabla 19. Resumen de las pérdidas de carga en el sistema de captación

En la tabla 19 se resumen las pérdidas de cargas calculadas en este apartado que tendrán que considerarse a la hora de calcular la altura útil que la bomba de captación debe proporcionar al agua de mar de los pozos de captación. Se puede ver que las pérdidas secundarias son aproximadamente el 30% de las principales, por lo que en adelante estas pérdidas se estimarán con esta información teniendo en cuenta que dicho porcentaje está asociado a una longitud total del sistema de tuberías de captación de 510 m. Además, se consideran unas pérdidas de carga adicionales que suponen un 15% de las primarias para tener en cuenta las pérdidas debidas a las válvulas y otros accesorios que pueda tener la instalación.

3.1.3. SELECCIÓN DE LA BOMBA DE CAPTACIÓN

Conocido el caudal que debe desplazar la bomba sumergible de captación (185,44 m³/h), queda por determinar la altura útil que ésta debe proporcionar al flujo. Para ello se debe realizar un balance de energía entre los dos puntos de estudio, situándose el primero en la superficie libre de líquido en el pozo de captación y el segundo a la entrada de la bomba de alta presión. De esta forma se aplica la ecuación 2.5 introducida en el anexo II teniendo en cuenta lo siguiente:

- El plano de referencia se sitúa en la SLL en el pozo de captación, por lo que Z_1 es nula.
- La diferencia de cota entre el nivel del terreno donde se sitúan los pozos y el nivel del terreno donde se sitúa la nave de procesos de la desaladora es de 24 m. Por lo que Z_2 sería la suma de esa diferencia de cota y la profundidad a la que se encuentra la SLL, que se estableció en el apartado 3.1.1 en 8 m. De este modo la cota en el punto 2 resulta ser de 32 m.



Tabla 20. Elevación del terreno entre los pozos y la nave de procesos de la EDAM (Goolzoom)

- La velocidad a la que desciende la SLL en el pozo es muy reducida, por lo que la altura cinética en el punto 1 se desprecia.
- La presión del punto 1 corresponde con la atmosférica, que es 1,01325 bar. Esta presión se aproxima por conveniencia a 1 bar.
- La presión del punto 2, como se ha explicado en el anexo II, se fija en 2 bar.

Por lo tanto,

$$H_{B,cap.} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2 - P_1}{\gamma_{A.M.}} + Z_2 + \sum H_{r,1-2} = \frac{8 \cdot Q_2^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D_2^4} + \frac{P_2 - P_1}{\gamma_{A.M.}} + Z_2 + \sum H_{r,1-2}$$

$$H_{B,cap.} = \frac{8 \cdot \left(\frac{927,2}{3600}\right)^2 m^6/s^2}{\pi^2 \cdot 9,81 m/s^2 \cdot 0,500^4 m^4} + \frac{(2 - 1) bar \cdot \frac{100 KN/m^2}{1 bar}}{10,079 KN/m^3} + 32 m + 21,423 m = 63,43 m$$

A continuación, se estudian las bombas sumergibles que ofrecen los fabricantes Lowara, Grundfos y KSB.

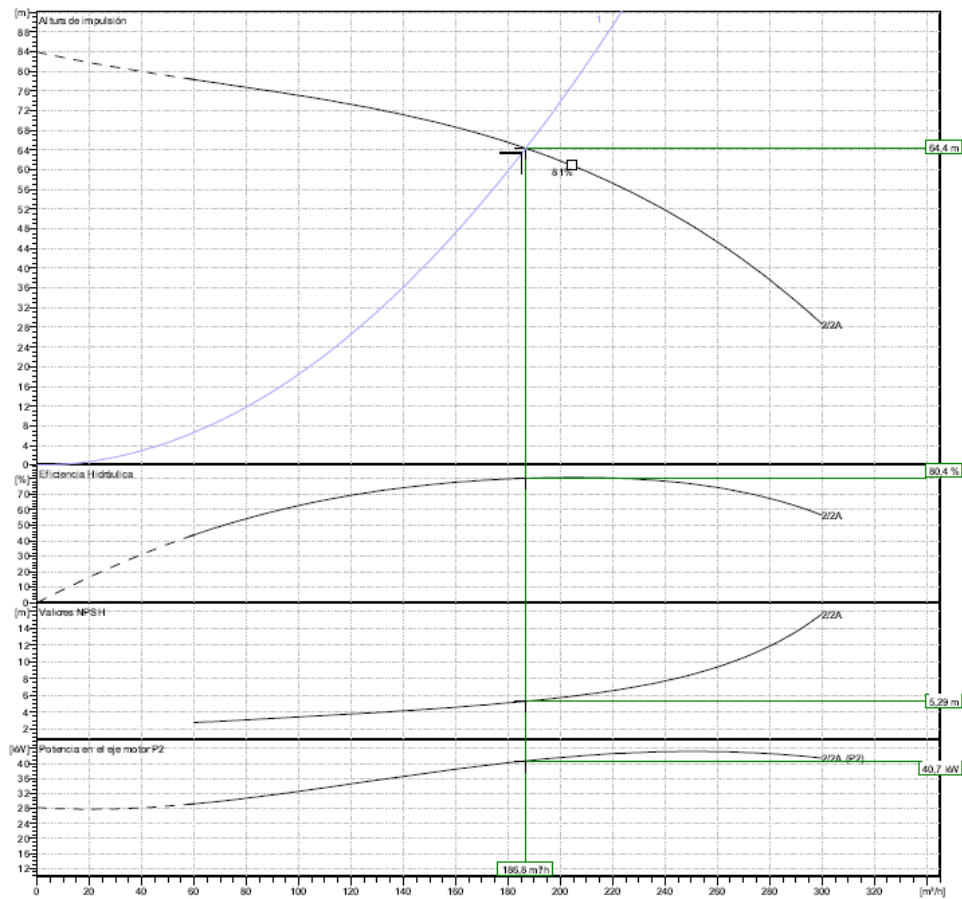


Figura 37. Curvas características de la bomba Z10220 2/2A-L8W de Lowara

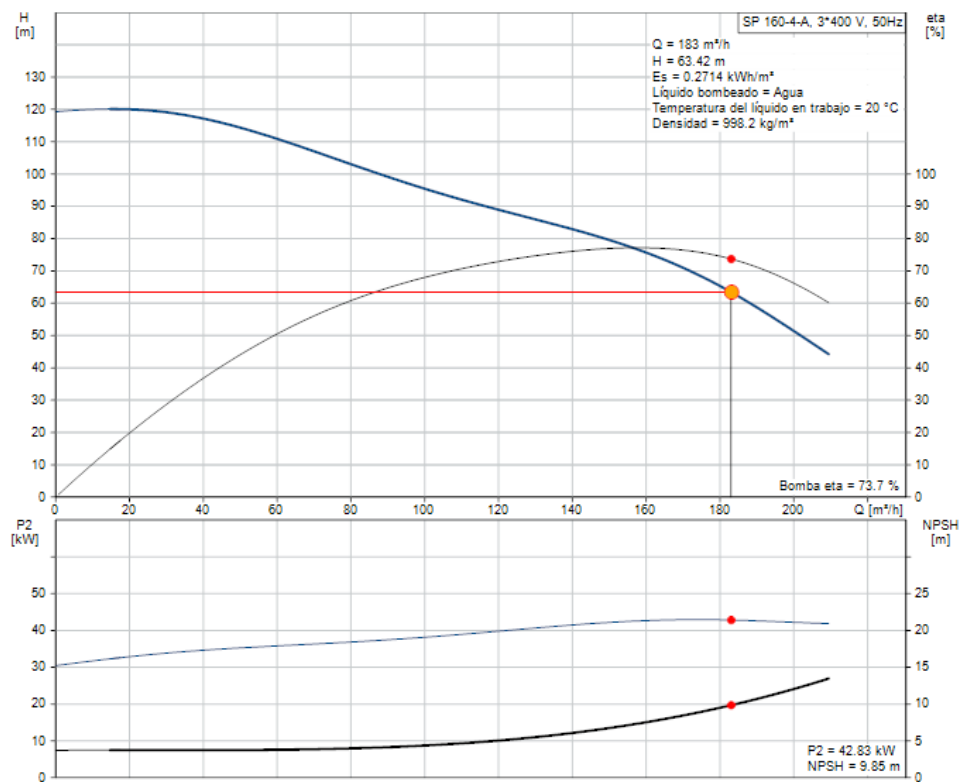


Figura 38. Curvas características de la bomba SP 160-4-A-200203A4 de Grundfos

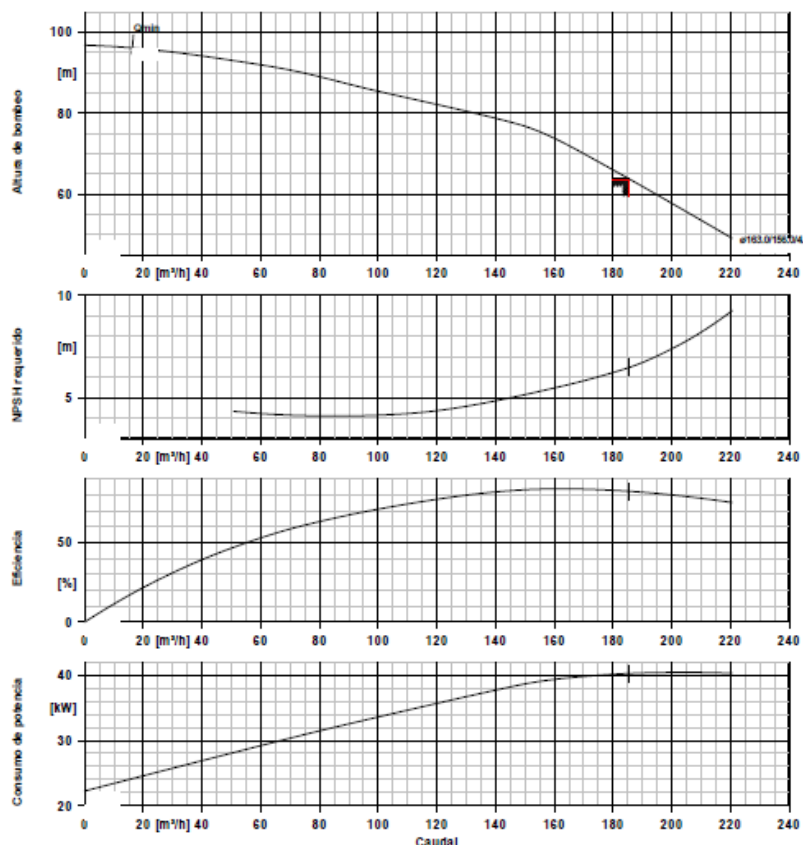


Figura 39. Curvas características de la bomba UPA 250C-150 de KSB

Modelo de la bomba	Fabricante	Eficiencia (%)
Z10220 2/2A-L8W	Lowara	80,4
SP 160-4-A-200203A4	Grundfos	73,7
UPA 250C-150	KSB	82,2

Tabla 21. Rendimientos de las bombas sumergibles seleccionadas

Como se puede ver en la tabla 21 donde se resumen los rendimientos de las bombas recomendadas por los fabricantes en sus herramientas de selección de bombas, la bomba con el mayor rendimiento es la UPA 250C-150 de KSB, por lo que será esta la bomba que se instalará en los pozos de captación. Con esta bomba sumergible se aporta una altura manométrica de 63,43 m para un caudal de 185,44 m³/h, para lo que es necesario una potencia de 40,28 kW. Esta potencia la suministra un motor eléctrico UMA 200D de 42 kW del mismo fabricante. Dicho motor tiene un rendimiento del 86%, por lo que el consumo energético del equipo resulta ser de 49 kW. Además, el NPSH requerido por la bomba es de 6,47 m, por lo que no hay riesgo de cavitación ya que se ha decidido instalar la bomba a 25 m de profundidad y se estima que en esta situación la

mínima columna de líquido que puede haber es de 17 m (25 m – 8 m), a lo que habría que sumarle además la altura de presión atmosférica (10 m).

3.2. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

El permeado que se obtiene de los bastidores de membranas de la estación desaladora se conduce, tras su postratamiento, a un depósito regulador y, a continuación, pasa a una sala de bombeo donde se procede a impulsar el agua producto hasta el depósito de cabecera.

El depósito regulador se ubica en las instalaciones de la estación desaladora, al lado de la planta de procesos. En cuanto al depósito de cabecera, según lo establecido en el Plan Hidrológico de Tenerife (figura 30), éste se sitúa a 2 km de distancia, en la localidad de La Hidalga (Arafo). Por otro lado, sus capacidades se estiman analizando las de los depósitos de la desaladora de Granadilla, aunque realmente sería necesario para ello realizar un estudio del consumo diario de agua de las poblaciones a las que se les pretende prestar servicio. La EDAM de Granadilla, que tiene una producción de 14.000 m³/día, cuenta con un depósito regulador de 7.000 m³ y un depósito de cabecera de 10.000 m³, por lo que se calcula que las capacidades de estos depósitos en el caso de la estación desaladora que se proyecta en este trabajo, de 10.000 m³/día de producción, deben ser de 5.000 m³ y 8.000 m³.

El agua producto se transporta de un depósito a otro a través de una tubería de distribución que, junto a la bomba necesaria para su impulsión, se calcula en esta sección.

3.2.1. LONGITUD Y DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE DISTRIBUCIÓN

La tubería de distribución, que también será de PRFV del fabricante Flowtite, tiene un trazado que se representa en la figura 40 y cuya longitud es de 2.630 m. Por ella se transportará la producción de la desaladora (0,116 m³/s) desde el depósito regulador hasta el de cabecera. El diámetro mínimo que debe tener dicha tubería se calcula con el criterio de Bonnet y resulta ser de 352 mm, por lo que se selecciona el diámetro nominal inmediatamente superior que oferta el fabricante, que es de 400 mm.



Figura 40. Recorrido de la tubería de distribución

3.2.2. PÉRDIDAS DE CARGA

En primer lugar, se calculan las pérdidas primarias, para lo que es necesario determinar el número de Reynolds. Hay que tener en cuenta que en este caso la viscosidad cinemática del fluido (permeado) es de $10,04 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Así, el número de Reynolds resulta ser de 366.949, por lo que se está en régimen turbulento y se calcula f con la fórmula de Colebrook, teniendo en cuenta que k/D es en este caso $7,25 \cdot 10^{-5}$. El resultado es un coeficiente de fricción de 0,014732 y unas pérdidas de carga en la tubería de distribución de 4,20 m, un valor muy alto debido a la gran longitud de esta tubería.

$$H_{r,dist.} = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot Q^2 = \frac{8 \cdot 0,014732 \cdot 2630 \text{ m}}{\pi^2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,400^5 \text{ m}^5} \cdot 0,116^2 \text{ m}^6/\text{s}^2 = 4,20 \text{ m}$$

En segundo lugar, se calculan las pérdidas de carga secundarias. Que se estimarán de acuerdo con los resultados obtenidos en el sistema de captación, teniendo en cuenta que cuanto mayor es la longitud de una tubería menor es la relación de las pérdidas secundarias con las primarias. En el caso del sistema de captación, las pérdidas secundarias suponían un 30% de las primarias para una longitud de tubería de 510 m. En este caso la longitud es de 2630 m, por lo que se calcula que las pérdidas secundarias suponen un 6% de las primarias. Además, se suman unas pérdidas de carga adicionales de un 3% de las

primarias para considerar otros accesorios que no se tuvieron en cuenta para la determinación de esa relación de pérdidas primarias y secundarias. Finalmente, las pérdidas de cargas secundarias en el sistema de distribución se estiman en 0,38 m, de modo que las pérdidas de carga totales resultan ser de 4,58 m.

3.2.3. SELECCIÓN DE LA BOMBA DE DISTRIBUCIÓN

La altura útil que la bomba de distribución debe proporcionar al flujo (417,2 m³/h) se determina realizando un balance de energía entre los dos puntos de estudio, situándose el primero en la superficie libre de líquido en el depósito regulador y el segundo en la superficie libre de líquido en el depósito de cabecera. De esta forma se aplica la ecuación 2.5 introducida en el anexo II teniendo en cuenta lo siguiente:

- El plano de referencia se sitúa en la SLL del depósito regulador, por lo que Z_1 es nula.
- La diferencia de cota entre el nivel del terreno donde se sitúa el depósito regulador y el nivel del terreno donde se sitúa el depósito de cabecera es de 162 m (190 m - 28 m), que es aproximadamente la cota de la SLL en el depósito de cabecera (Z_2).



Figura 41. Elevación del terreno entre los depósitos regulador y de cabecera (Goolzoom)

- La velocidad a la que desciende la SLL en el depósito regulador y a la que asciende la SLL en el depósito de cabecera es pequeña y aproximadamente igual, por lo que la diferencia de altura cinética se desprecia.

- La presión tanto en el punto 1 como en el 2 corresponde con la atmosférica, por lo que la diferencia de altura de presión es aproximadamente cero ya que el punto 2 no se encuentra a una cota lo suficientemente alta como para ser significativa la reducción de la presión atmosférica.

Por lo tanto,

$$H_{B,dist.} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + \frac{P_2 - P_1}{\gamma_{perm.}} + (Z_2 - Z_1) + \sum H_{r,1-2} = Z_2 + \sum H_{r,1-2}$$

$$H_{B,dist..} = 162 \text{ m} + 4,58 \text{ m} = 166,58 \text{ m}$$

A continuación, se estudian las bombas que ofrecen los fabricantes Flowserve, KSB, Lowara y Sulzer.

Hay que decir que en el caso de la bomba que nos propone Lowara sería necesario dividir el caudal e incluir en el sistema dos de estas bombas para aportarle la altura necesaria al caudal de permealdo.

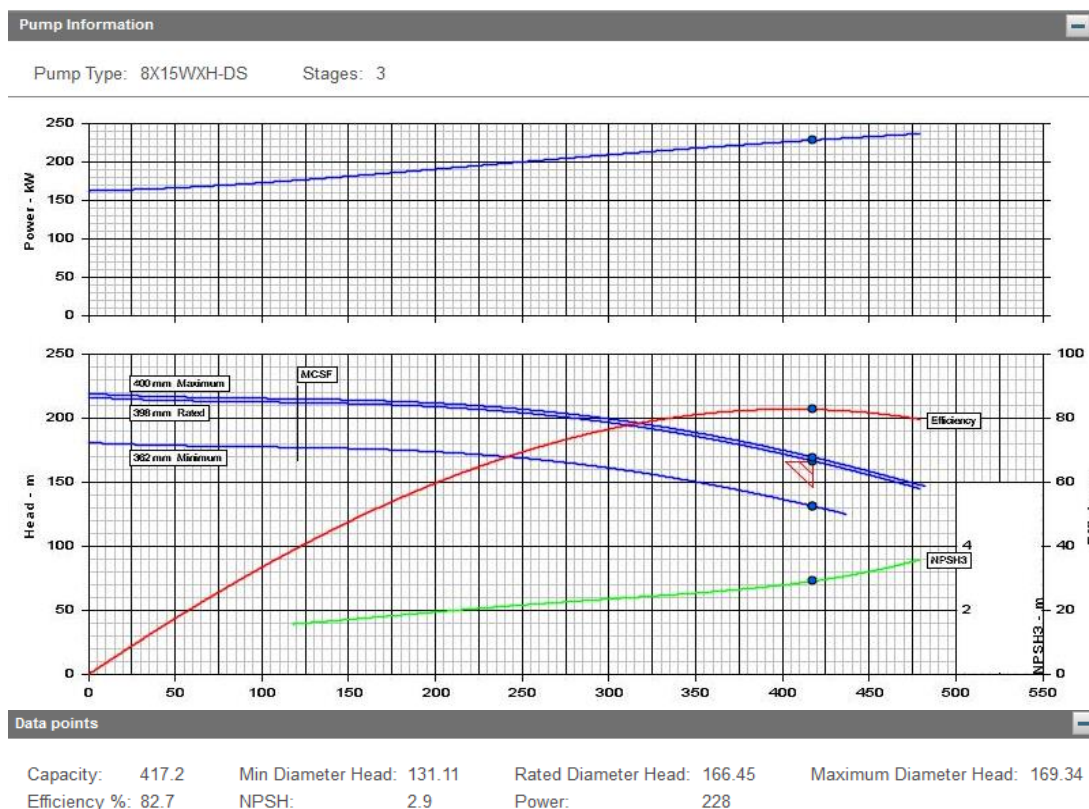


Figura 42. Curvas características de la bomba 8X15WXH-DS de Flowserve

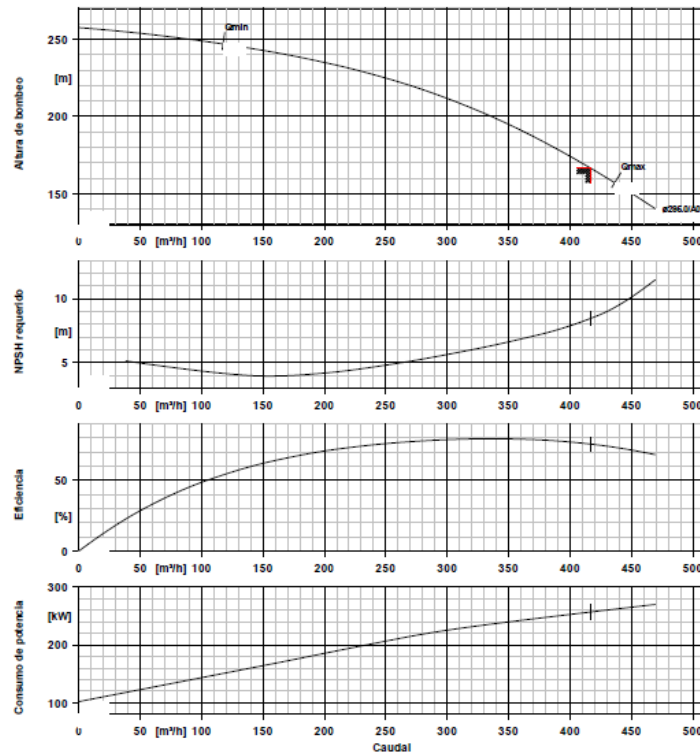


Figura 43. Curvas características de la bomba Multitec A125 de KSB

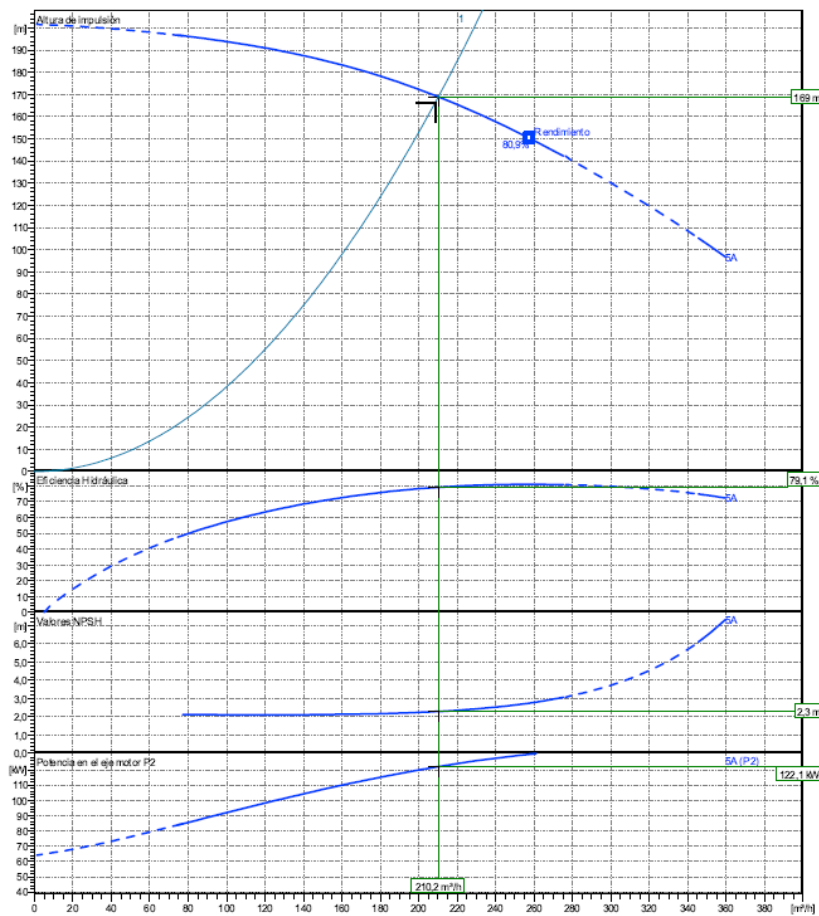


Figura 44. Curvas características de la bomba MPA150A de Lowara

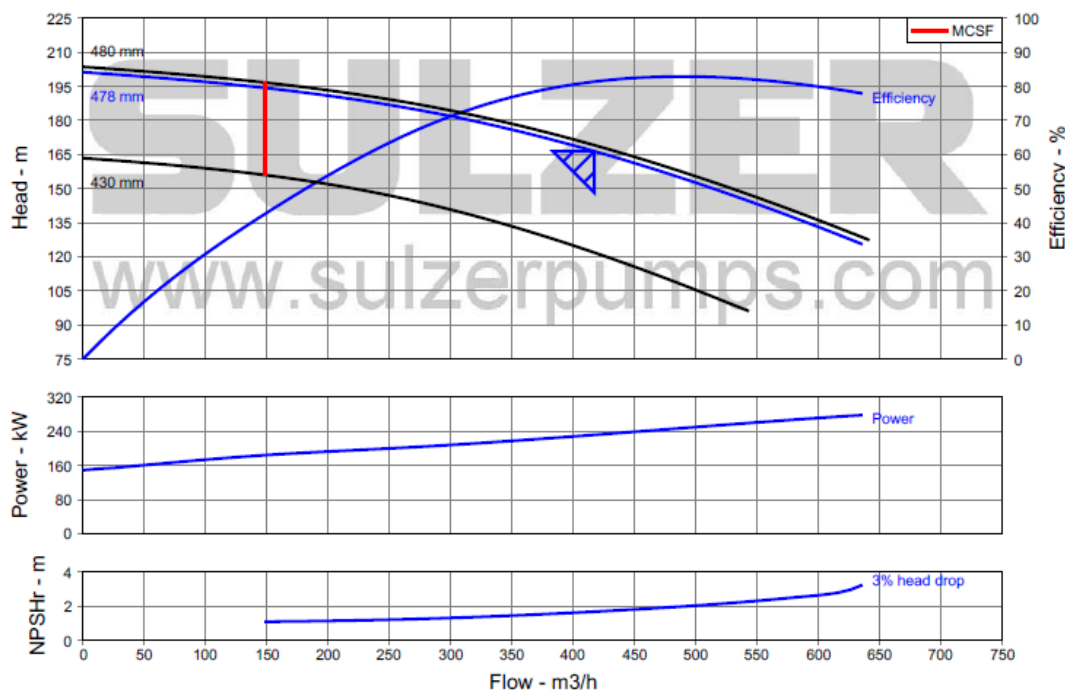


Figura 45. Curvas características de la bomba MC 200-450

Modelo de la bomba	Fabricante	Eficiencia (%)
8X15WXH-DS	Flowserve	82,7
Multitec A125	KSB	75,7
MPA150A	Lowara	79,1
MC 200-450	Sulzer	81,4

Tabla 22. Rendimientos de las bombas de distribución seleccionadas

En la tabla 22 se resumen los rendimientos de cada modelo. Como se puede ver, el valor más favorable se consigue con la bomba de sección anular multietapa (3) 8X15WXH-DS de Flowserve, por lo que será esta la bomba que se instalará en la sala de bombeo del sistema de distribución. Con esta bomba se aporta una altura manométrica de 166,45 m para un caudal de 417,2 m³/h, para lo que es necesario una potencia de 228 kW que es proporcionada por un motor eléctrico de 261 kW. El rendimiento de dicho motor no se facilita, por lo que se supondrá de 96%, siendo entonces el consumo energético de 272 kW. Además, el NPSH requerido por la bomba es de 2,9 m, por lo que se calculará la diferencia de cota mínima entre la SLL en el depósito regulador y la bomba de distribución para que no haya riesgo de cavitación en ella. Para ello se hace un balance de energía entre la SLL y la entrada de la bomba considerando que:

- La velocidad a la que desciende la SLL en el depósito regulador es pequeña, por lo que la altura cinética en este punto se desprecia.

- La longitud del tramo de aspiración es pequeña, por lo que las pérdidas de carga producidas son despreciables.
- La presión del punto 1 corresponde con la atmosférica, que es 1,01325 bar. Esta presión se aproxima por conveniencia a 1 bar.
- El plano de referencia se sitúa en el eje de la bomba, por lo que Z_2 es nula.

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 - H_{r12}$$

$$\frac{P_1}{\gamma_{perm.}} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma_{perm.}} = H_E$$

El NPSH disponible sería la diferencia de la altura a la entrada de la bomba de distribución y la altura de presión de saturación del agua permeada a 21°C (tabla 12). Esta diferencia debe ser mayor a la requerida:

$$NPSH_d = H_E - \frac{P_{s,perm.}}{\gamma_{perm.}} = Z_1 + \frac{P_1 - P_{s,perm.}}{\gamma_{perm.}} > NPSH_r$$

$$Z_1 + \frac{1 \text{ bar} \cdot \frac{100 \text{ kN/m}^2}{1 \text{ bar}} - 2,339 \text{ kN/m}^2}{9,792 \text{ kN/m}^3} = Z_1 + 9,97 \text{ m} > 2,9 \text{ m}$$

Siempre que la bomba no se sitúe a una cota de 7 m por encima de la SLL en el depósito regulador no hay riesgo de cavitación ya que solo con la altura atmosférica se aseguraría una altura del flujo a la entrada de la bomba superior a la requerida para que no se produzca este fenómeno indeseado.

3.3. SISTEMA DE EVACUACIÓN DE LA SALMUERA

La salmuera que se obtiene de los bastidores de membranas de la estación desaladora se recoge en un colector por el que se conduce de vuelta al mar. Esta tubería de evacuación de la salmuera (emisario) se diseña de tal forma que se consiga una dilución adecuada del rechazo, de alta concentración de sales, con la que se preserven las condiciones medioambientales del entorno natural submarino. Para ello el emisario debe extenderse cierta longitud mar adentro y debe descargar el caudal progresivamente en una dirección adecuada para que las corrientes marinas no arrastren la salmuera hacia las cercanías de la zona de la costa donde se sitúan los pozos de captación.

El emisario se extenderá 225 m mar adentro desde la línea de costa, lo mismo que en el caso de las desaladoras de Fonsalía y Granadilla, aunque tiene una longitud total de 625 m ya que el tramo que va desde la nave de procesos hasta la costa tiene una longitud de 400 m. A esta distancia no se tienen datos de la profundidad del suelo marino, por lo que se estimará con el dato de la isóbata más cercana, a 940 m de la costa, que nos facilita el Visor de Información Marina Base del Instituto Español de Oceanografía. De este modo se estima que a una distancia de 225 m de la costa se alcanza una profundidad de 12 m.

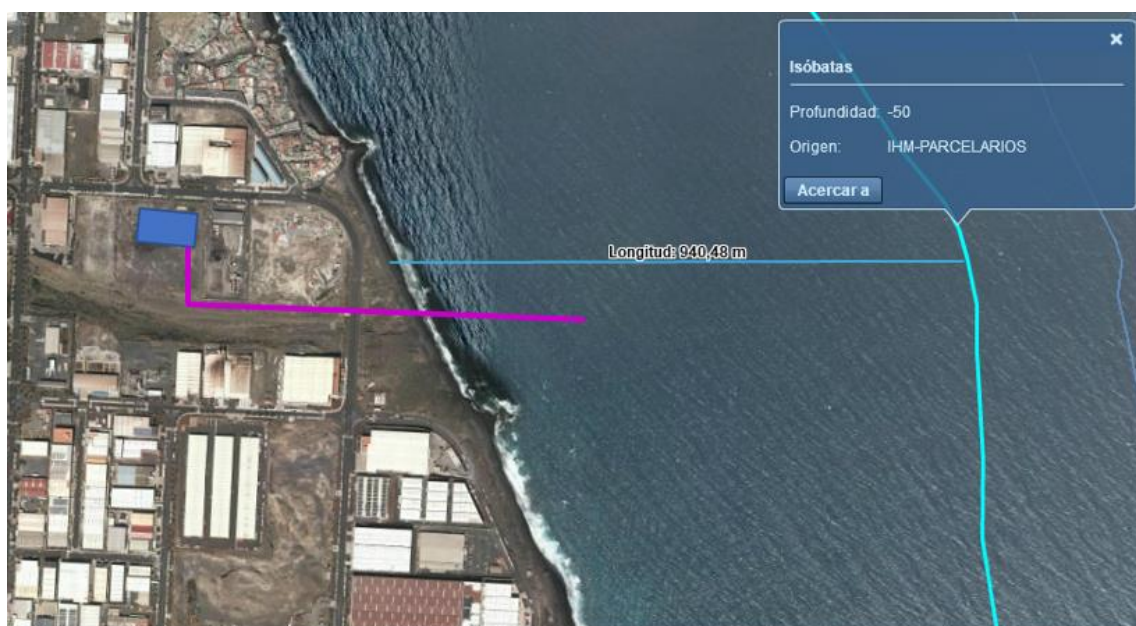


Figura 46. Profundidad del fondo marino en las cercanías del polígono industrial de Güímar (Instituto Español de Oceanografía)

3.3.1. LONGITUD Y DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE EVACUACIÓN

La tubería de evacuación del rechazo, que también será de PRFV del fabricante Flowtite, tiene un trazado que se representa en la figura 46 y cuya longitud es de 625 m. Por ella se transportará la salmuera de las dos líneas de producción de la desaladora, por lo que el caudal que se conduce por el emisario es de 12.240 m³/día (0,142 m³/s). El diámetro mínimo que debe tener dicha tubería se calcula con el criterio de Bonnet y resulta ser de 382 mm, por lo que se selecciona el diámetro nominal inmediatamente superior que oferta el fabricante, que es de 400 mm.

3.3.2. PÉRDIDAS DE CARGA

En primer lugar, se calculan las pérdidas primarias, para lo que es necesario determinar el número de Reynolds. Hay que tener en cuenta que en este caso la viscosidad cinemática del fluido (salmuera) es de $11,05 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Así, el número de Reynolds resulta ser de 408.090, por lo que se está en régimen turbulento y se calcula f con la fórmula de Colebrook, teniendo en cuenta que k/D es en este caso $7,25 \cdot 10^{-5}$. El resultado es un coeficiente de fricción de 0,014510 y unas pérdidas de carga en la tubería de evacuación de 1,47 m.

$$H_{r, \text{evac.}} = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot Q^2 = \frac{8 \cdot 0,014510 \cdot 625 \text{ m}}{\pi^2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,400^5 \text{ m}^5} \cdot \frac{0,142^2 \text{ m}^6}{\text{s}^2} = 1,47 \text{ m}$$

Por último, las pérdidas de carga secundarias se estiman de acuerdo con los resultados obtenidos en el sistema de captación, teniendo en cuenta que cuanto mayor es la longitud de una tubería menor es la relación de las pérdidas secundarias con las primarias. En el caso del sistema de captación, las pérdidas secundarias suponían un 30% de las primarias para una longitud de tubería de 510 m. En este caso la longitud es de 625 m, por lo que se calcula que las pérdidas secundarias suponen un 24% de las primarias. Además, se suman unas pérdidas de carga adicionales de un 12% de las primarias para considerar otros accesorios que no se tuvieron en cuenta para la determinación de esa relación de pérdidas primarias y secundarias. Finalmente, las pérdidas de cargas secundarias en el sistema de distribución se estiman en 0,53 m, de modo que las pérdidas de carga totales resultan ser de 2 m.

3.3.3. SELECCIÓN DE LA BOMBA DE EVACUACIÓN

La altura útil que la bomba de evacuación del rechazo tendría que aportarle al flujo para impulsarlo hasta el punto de descarga a 225 m de la costa y 12 m de profundidad se determina realizando un balance de energía entre los puntos de entrada, en la planta de procesos de la desaladora, y salida del flujo del emisario, en el punto de descarga mar adentro. De esta forma se aplica la ecuación 2.5 introducida en el anexo II teniendo en cuenta lo siguiente:

- El plano de referencia se sitúa en el punto de descarga, a 12 m de profundidad, por lo que Z_1 es dicho valor más la cota a la que se sitúa

la planta desaladora, que corresponde a 28 m sobre el nivel del mar. Por tanto, Z_1 es 40 m y Z_2 es 0 m.

- La presión a la entrada de la tubería de evacuación de la salmuera se estima aproximadamente igual a la que tiene este flujo a la salida del intercambiador de presión, por lo que P_1 es igual a 1,4 bar.
- La presión del flujo a la salida del emisario debe ser igual a la debida por la columna de agua en ese punto, que es de 12 m, más la presión atmosférica. Aproximando la presión atmosférica a 10 metros de columna de agua, se tiene que la altura de presión en el punto 2 es igual a 22 m.
- El diámetro de la tubería es el mismo a la entrada y salida del emisario, por lo que la velocidad del flujo es la misma y la variación de la altura cinética es nula.

$$H_{B,salm.} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma_{A.M.}} - Z_1 + \sum H_{r,1-2}$$

$$H_{B,salm.} = 22 \text{ m} - \frac{1,4 \text{ bar} \cdot \frac{100 \text{ KN/m}^2}{1 \text{ bar}}}{10,318 \text{ KN/m}^2} - 40 \text{ m} + 2 \text{ m} = -29,57 \text{ m}$$

El hecho de que el resultado sea negativo quiere decir que no es necesario la incorporación de una bomba al sistema ya que con la presión que tiene la salmuera a la salida del intercambiador de presión y la altura de cota es suficiente para su conducción hasta el punto de descarga.

ANEXO IV

CÁLCULOS ENERGÉTICOS Y DIMENSIONADO DEL SISTEMA EÓLICO

4. CÁLCULOS ENERGÉTICOS Y DIMENSIONADO DEL SISTEMA EÓLICO

Una vez se han seleccionado las bombas hidráulicas de la planta desaladora y se conocen sus consumos eléctricos se pasa a calcular el consumo específico de la planta, que es un parámetro característico de cada instalación desaladora, y su consumo energético anual, que será cubierto por un sistema eólico.

4.1. CONSUMO ESPECÍFICO DE LA DESALADORA

El consumo específico de una estación desaladora es un parámetro que indica su consumo energético por volumen de producción y que se suele expresar en kWh/m³.

Equipo	P (kW)	Q (m ³ /h)	Uds.	Consumo (kW)	C.E. (kWh/m ³)
BAP	469	211,3	2	938	2,2
B. Booster	16	252,3	2	32	0,1
B. Captación	49	185,4	5	245	0,6
B. Distribución	272	417,2	1	272	0,7
Total bombas				1.487	3,6
Otros				42	0,1
Total EDAM				1.529	3,7

Tabla 23. Potencias eléctricas consumidas y consumos específicos de los equipos y total de la EDAM

En la tabla 23 se resumen las potencias eléctricas consumidas por los equipos de la planta desaladora. El principal consumo de este tipo de instalaciones es debido a las bombas hidráulicas del núcleo de desalación, de captación y de distribución, cuyo consumo total en este caso resulta ser de 1.487 kW. Esta potencia se divide por la capacidad de producción de la desaladora (10.000 m³/día) y se obtiene un consumo específico de 3,6 kWh/m³, al que se le suma 0,1 kWh/m³ de otros consumos (sistemas de instrumentación y control, válvulas motorizadas, bombas dosificadoras, etc.) para obtener un consumo específico total de la estación desaladora de agua de mar de 3,7 kWh/m³, que entra dentro del rango de consumos específicos de desaladoras modernas por ósmosis inversa (entre 2,8 y 4 kWh/m³). Por otro lado, la potencia consumida por la planta resulta ser de 1.529 kW, que es un valor elevado debido a la producción establecida para la desaladora.

Finalmente, se calcula la necesidad energética anual de la planta desaladora considerando una disponibilidad anual del 95%.

$$\text{Energía anual} = 0,95 \cdot 1.529 \text{ kW} \cdot 365 \text{ días} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{1 \text{ MW}}{1000 \text{ kW}} = 12.722 \text{ MWh/año}$$

4.2. DIMENSIONADO DEL SISTEMA EÓLICO

Se pretende cubrir las necesidades energéticas de la estación desaladora con un grupo de aerogeneradores, que se situarán en una parcela a 8 km de distancia de la estación desaladora, en la zona de La Pasada (Güímar). El suelo de esta parcela, según el Plan General de Ordenación de Güímar publicado el 5 de julio del 2005, está catalogado como suelo rústico. Esta ha sido la localización elegida dado que es la zona con un recurso eólico favorable más cercana a la estación desaladora, tal y como puede verse en la figura 47.

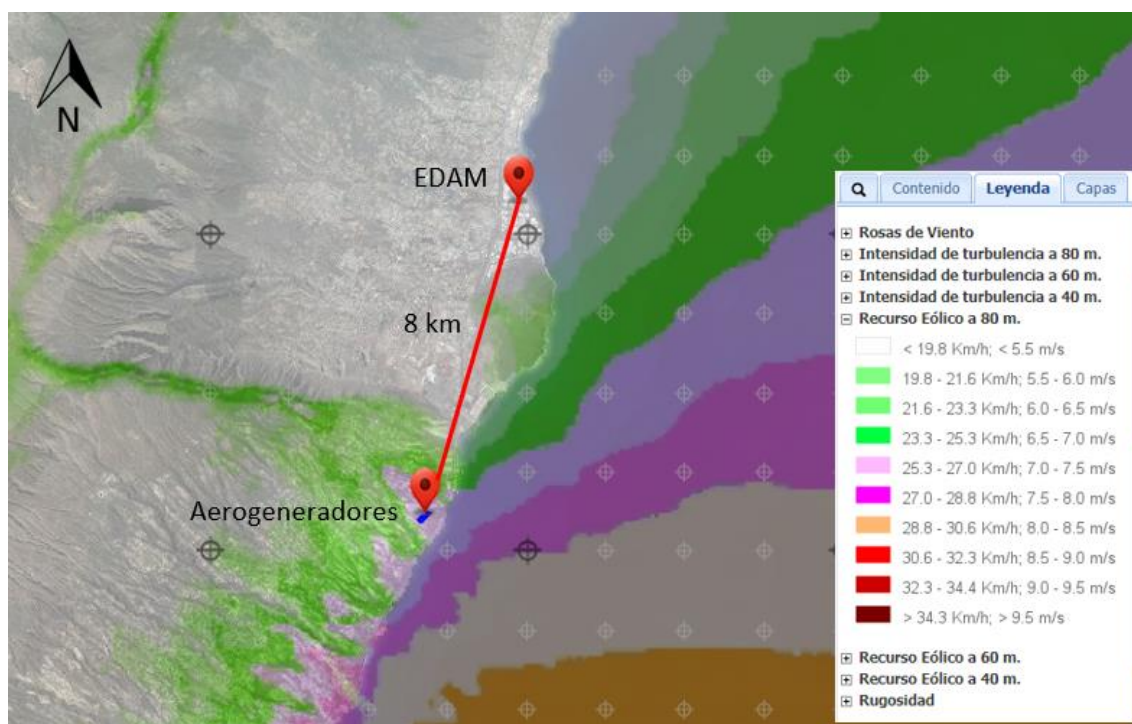


Figura 47. Ubicación de los aerogeneradores de la estación desaladora (Visor del IDECanarias)

A pesar de que el suelo de la parcela esté catalogado como suelo rústico, es viable situar los aerogeneradores en este tipo de suelo ya que, según el artículo 63 del Decreto Legislativo 1/2000, de 8 de mayo, por el que se aprueba el Texto Refundido de las Leyes de Ordenación del Territorio de Canarias y de Espacios Naturales de Canarias, “con carácter general, serán posibles los usos, actividades, construcciones e instalaciones que no estuvieran expresamente

prohibidas por el plan insular o el plan general municipal y sean compatibles con el régimen de protección a que dicho suelo está sometido”, cosa que es posible en este caso y que justifica el hecho de que existan dos parques eólicos de la isla de Tenerife, los de Teno y Abades, situados también en suelo rústico.



Figura 48. Calificación del suelo donde se ubica el parque eólico de Abades (Visor del IDECanarias)

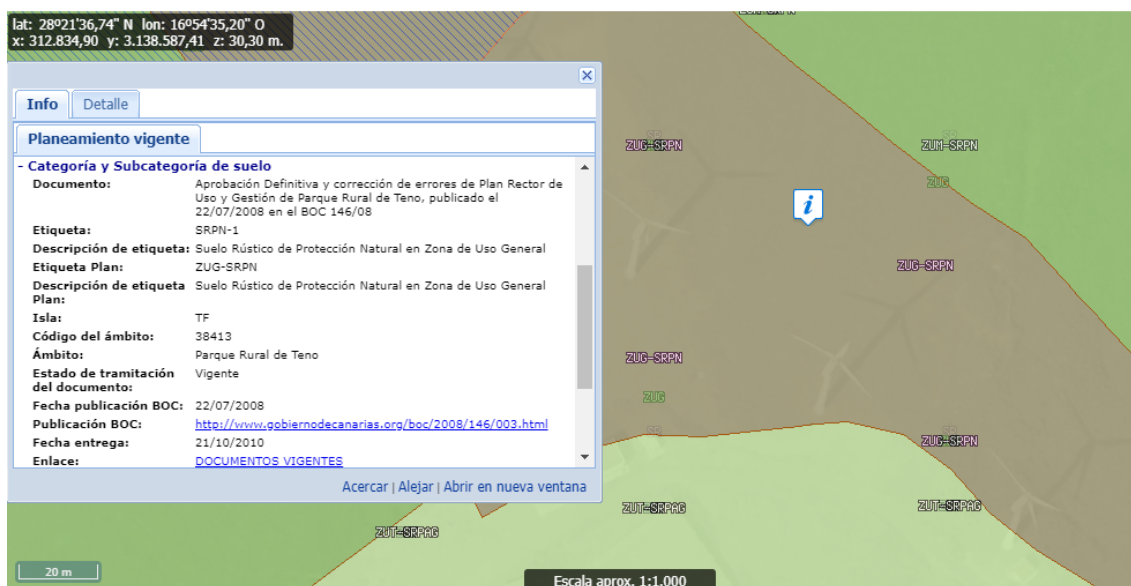


Figura 49. Calificación del suelo donde se ubica el parque eólico de Teno (Visor del IDECanarias)

4.2.1. DETERMINACIÓN DEL RECURSO EÓLICO

Para conocer el potencial o recurso eólico de un determinado lugar se lleva a cabo un análisis del viento a una determinada altura del suelo, que generalmente es de 40, 60 u 80 m, pero en el caso de un aerogenerador dicha altura debe coincidir con la altura del buje. En este análisis se estudia el

porcentaje del tiempo total de estudio que el viento sopla procedente de una determinada dirección, así como la velocidad media del viento para cada dirección. Para que este estudio estadístico del viento sea altamente representativo se debe disponer de series históricas lo más largas posibles, a ser posible de más de 25 o 30 años, aunque períodos de 5 a 10 años ya comienzan a ser representativos. El resultado de este análisis es la representación de lo que se conoce como un *año tipo*, que normalmente se hace de forma gráfica con una *rosa de los vientos*. Por otro lado, se debe realizar una campaña de al menos un año de duración en el lugar donde se pretenda ubicar los aerogeneradores para relacionar los resultados del tratamiento estadístico con las medidas encontradas.

La información del análisis del potencial eólico es importante ya que la dirección de mayor incidencia del viento con una mayor intensidad determinará la dirección en la que se situarán los aerogeneradores. Además, a partir de dicha información se realiza la distribución de probabilidad de la velocidad del viento con la que se calcula el potencial energético. Dicha información es proporcionada por la Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias (IDECanarias) y el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC). Este último facilita unos documentos en los que se detallan los datos numéricos del recurso eólico de Canarias, para lo que es necesario conocer las coordenadas UTM del lugar de estudio, siendo en este caso $X = 363.451$ e $Y = 3.127.534$.

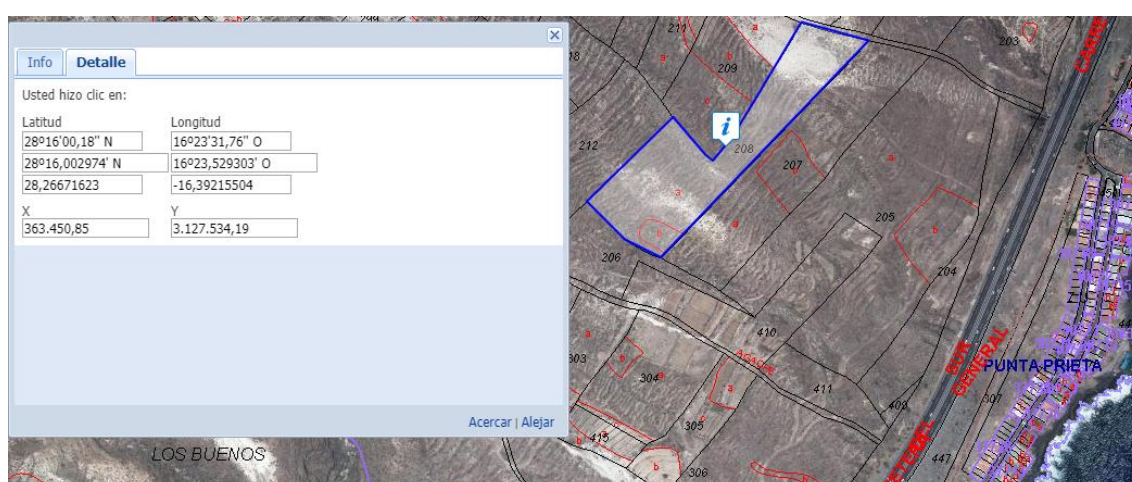


Figura 50. Coordenadas de la parcela donde se sitúan los aerogeneradores (IDECanarias)

En la figura 51 se ilustran los datos obtenidos del tomo 9 de los detalles numéricos del recurso eólico de Canarias y se puede observar que la dirección

con una mayor incidencia anual es la NNW, por lo que los aerogeneradores se dispondrán en la dirección perpendicular a la NNW, separados a una distancia no menor de dos diámetros del rotor, según lo establecido en el DECRETO 32/2006, de 27 de marzo, por el que se regula la instalación y explotación de los parques eólicos en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Canarias.

363450	3128050	6,540	2,151	6,890	2,091	7,120	2,039	NNW
363450	3127950	6,560	2,148	6,910	2,086	7,150	2,034	NNW
363450	3127850	6,610	2,144	6,970	2,081	7,210	2,029	NNW
363450	3127750	6,790	2,141	7,120	2,077	7,330	2,025	NNW
363450	3127650	6,900	2,138	7,210	2,073	7,410	2,020	NNW
363450	3127550	6,930	2,135	7,230	2,069	7,430	2,016	NNW
363450	3127450	6,840	2,132	7,160	2,065	7,380	2,012	NNW

De X, Y (363350 , 3105950) a X, Y (363450 , 3127450)

Pág. 1361 de 1616

X	Y	V. Viento 40	Weibk 40	V. Viento 60	Weibk 60	V. Viento 80	Weibk 80	1Dirección Predominante
363450	3127350	6,730	2,129	7,070	2,061	7,300	2,008	NNW
363450	3127250	6,660	2,126	7,000	2,058	7,220	2,005	NNW
363450	3127150	6,550	2,124	6,910	2,054	7,160	2,001	NNW
363450	3127050	6,430	2,121	6,810	2,051	7,080	1,998	NNW

Figura 51. Detalles numéricos del recurso eólico en la parcelo donde se sitúan los aerogeneradores (ITC)

Por otra parte, del visor del IDECanarias se obtienen los valores medios de velocidad del viento, factor de escala (valor próximo a la velocidad media anual) y factor de forma (figura 52). Estos dos últimos son fundamentales para determinar la distribución de probabilidad de la velocidad del viento.

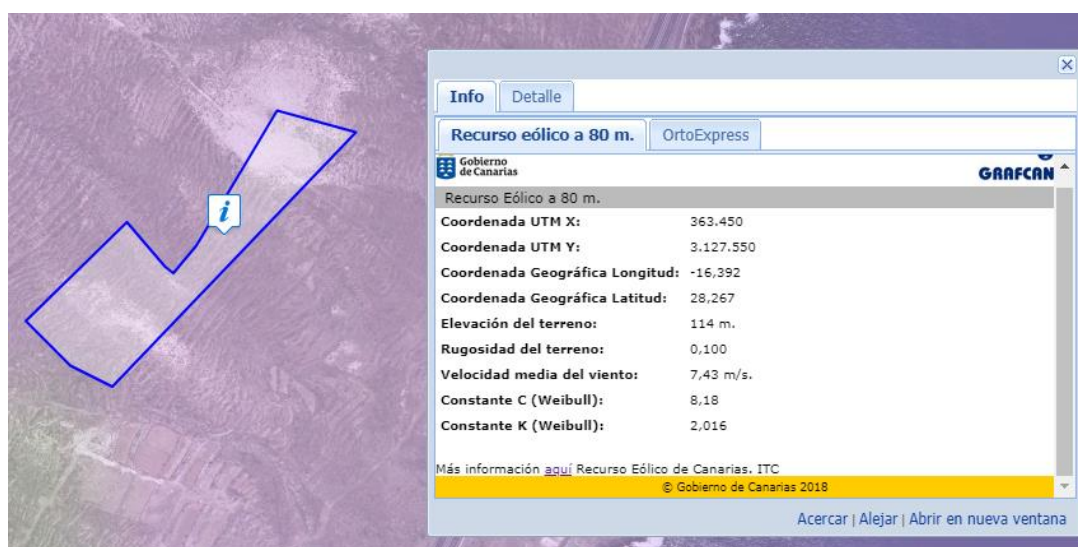


Figura 52. Valores medios de la velocidad del viento, factor de escala, C, y factor de forma, k (Visor del IDECanarias)

La distribución de probabilidad de la velocidad del viento sigue aproximadamente la función densidad de probabilidad de Weibull, $p(v)$:

$$p(v) = \frac{k}{v} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-(v/c)^k} \quad (4.1)$$

Donde,

v : velocidad del viento en m/s

c : factor de escala en m/s

k : factor de forma (adimensional) que caracteriza la asimetría de la función $p(v)$

El cálculo de la distribución de la velocidad del viento se realiza con la ecuación 4.1, para lo que se utilizan los factores de la figura 52 y se establecen intervalos de velocidades de 0,5 m/s. El resultado es una distribución de Weibull en la que se representa en el eje de abscisas la velocidad del viento y en el de ordenadas las frecuencias relativas de la velocidad del viento, es decir, los porcentajes de tiempo total (8.760 h/año tipo) para los que se mantiene una determinada velocidad.

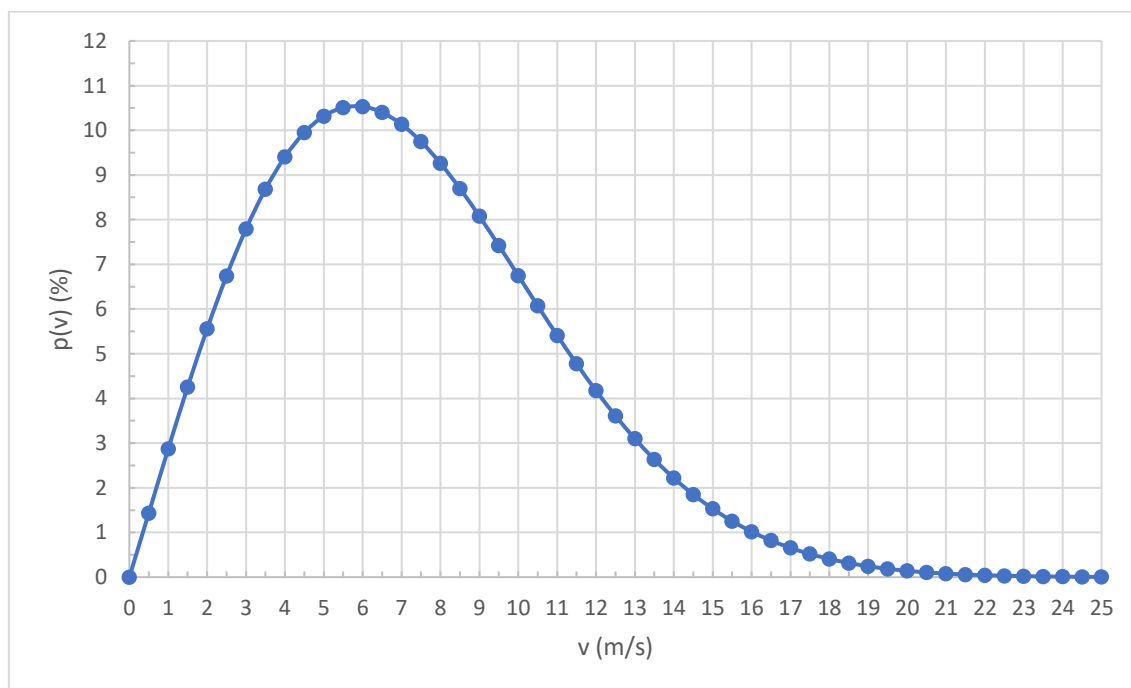


Figura 53. Distribución de Weibull de la frecuencia de la velocidad del viento en la zona donde se sitúa el sistema eólico

En la figura 53 se ilustra la distribución anual (de un año tipo) de la velocidad del viento a una altura de 80 m sobre el terreno. Se puede ver que la

distribución está un tanto sesgada hacia la zona de vientos de 4 a 8 m/s, esto se debe a que el recurso eólico en la zona es medio, lo que se refleja en la velocidad media anual del viento (7,43 m/s). Por ello se hace necesario la selección de aerogeneradores de vientos suaves (menores de 7,5 m/s), que son clasificados como aerogeneradores de clase III de acuerdo con la normativa IEC 61400-1 de la Comisión Electrotécnica Internacional.

4.2.2. CÁLCULO DE LA ENERGÍA PRODUCIDA POR UN AEROGENERADOR

La energía anual producida por un aerogenerador depende de la distribución anual de la velocidad del viento y de la curva de potencia del aerogenerador. Esta energía producida por el aerogenerador viene dada por la siguiente expresión:

$$E = T \int_{v_a}^{v_d} p(v) P(v) dv \quad (4.2)$$

Donde,

$p(v)$: función densidad de probabilidad de velocidad

$P(v)$: curva de potencia del aerogenerador

T : periodo de tiempo considerado, generalmente un año (8.760 h)

La distribución de Weibull de la frecuencia de la velocidad del viento correspondiente al periodo T es la determinada en el apartado 4.2.1, mientras que la curva de potencia del aerogenerador la facilita el fabricante. Hay que tener en cuenta que la curva de potencia se inicia en la velocidad de arranque, v_a , y finaliza en la desconexión, v_d , por lo que los límites de integración corresponden a dichos valores.

Para resolver la integral de la ecuación 4.2 se utiliza un método numérico, tal y como sugiere la bibliografía consultada (Villarrubia López, 2012), basado en la discretización de las funciones $p(v)$ y $P(v)$:

$$E = T \int_{v_a}^{v_d} p(v) P(v) dv \cong T \sum_i p_i \cdot P_i \cdot \Delta v_i \quad (4.3)$$

Donde:

p_i : valor de la función de Weibull para la velocidad v_i

P_i : potencia del aerogenerador para la velocidad v_i

p_i : valor de la función de Weibull para la velocidad v_i

Δv_i : amplitud del intervalo de velocidad considerado para la integración numérica

A continuación, se realiza el cálculo de la energía producida (usando la ecuación 4.3) por el aerogenerador V90-2.0MW del fabricante Vestas y se compara con el valor que nos proporciona la herramienta de estimación de la energía producida por un aerogenerador del ITC, que cuenta de una reducida lista de aerogeneradores que, en su mayoría, están descatalogados. Hay que tener en cuenta que se ha establecido una amplitud del intervalo Δv_i pequeña, de 0,5 m/s, que es el intervalo con el que los fabricantes determinan las curvas de potencias de los aerogeneradores. De este modo se asegura una buena aproximación en el cálculo por discretización de funciones.

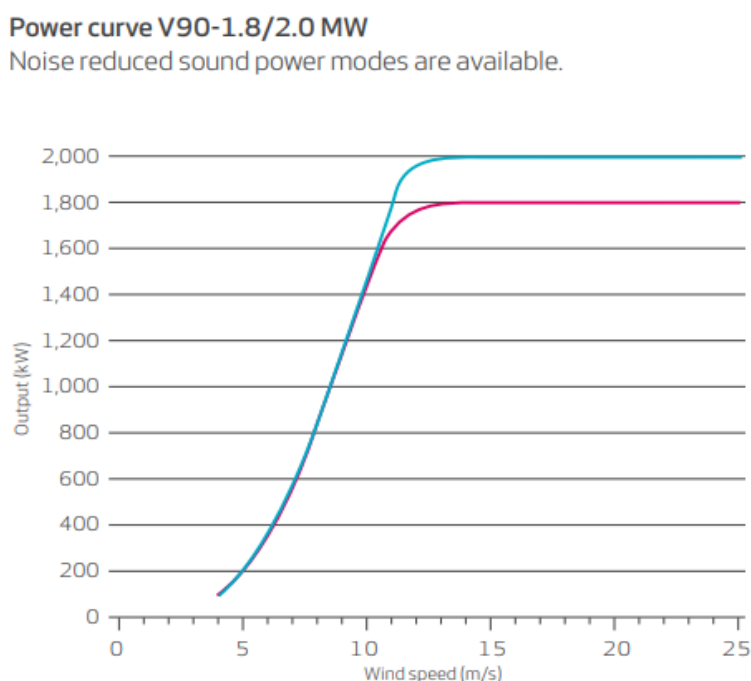


Figura 54. Curvas de potencia de los aerogeneradores para vientos medios y bajos V90 de Vestas

En la tabla 24 se detallan los valores del cálculo por discretización de las funciones distribución de Weibull y de potencia del aerogenerador, siendo el resultado de la energía producida por el aerogenerador V90-2.0MW en un año tipo de 6.898.685 kWh. Por otro lado, la energía producida por el aerogenerador según la herramienta del ITC es de 7.202.673 kWh (figura 55), por lo que el error cometido en los cálculos ha sido de un 4%, un valor pequeño que refleja la buena aproximación que se consigue por medio del uso de este método numérico.

v (m/s)	p(v)	P(v) (kW)	p(v)·P(v)·Δv _i (kW)	E (kWh)
0	0,0000	0,00	0,00	0,00
0,5	0,0144	0,00	0,00	0,00
1	0,0287	0,00	0,00	0,00
1,5	0,0426	0,00	0,00	0,00
2	0,0556	0,00	0,00	0,00
2,5	0,0674	0,00	0,00	0,00
3	0,0779	0,00	0,00	0,00
3,5	0,0868	0,00	0,00	0,00
4	0,0941	0,00	0,00	0,00
4,5	0,0995	91,20	4,54	39749,44
5	0,1032	180,10	9,29	81382,65
5,5	0,1051	284,20	14,93	130795,30
6	0,1053	390,90	20,58	180309,82
6,5	0,1040	491,50	25,56	223913,84
7	0,1013	601,10	30,46	266795,11
7,5	0,0975	731,80	35,66	312410,05
8	0,0926	884,50	40,96	358795,95
8,5	0,0870	1087,60	47,30	414368,43
9	0,0808	1247,10	50,38	441297,52
9,5	0,0742	1429,60	53,06	464798,71
10	0,0675	1594,30	53,80	471286,62
10,5	0,0607	1742,90	52,93	463674,80
11	0,0541	1861,20	50,36	441185,78
11,5	0,0478	1948,10	46,51	407450,83
12	0,0417	1993,30	41,59	364330,50
12,5	0,0361	2003,50	36,19	317000,84
13	0,0310	2007,00	31,09	272341,56
13,5	0,0263	2007,70	26,43	231504,47
14	0,0222	2007,30	22,25	194899,57
14,5	0,0185	2007,40	18,57	162650,40
15	0,0153	2007,00	15,35	134496,85
15,5	0,0125	2006,80	12,59	110246,77
16	0,0102	2006,70	10,23	89582,70
16,5	0,0082	2006,70	8,24	72162,83
17	0,0066	2006,70	6,58	57628,40
17,5	0,0052	2006,70	5,21	45626,27
18	0,0041	2006,70	4,09	35815,32
18,5	0,0032	2006,70	3,18	27875,10
19	0,0024	2006,70	2,46	21511,68
19,5	0,0019	2006,70	1,88	16461,06
20	0,0014	2006,70	1,43	12490,53
20,5	0,0011	2006,70	1,07	9398,47
21	0,0008	2006,70	0,80	7012,90
21,5	0,0006	2006,70	0,59	5189,36

22	0,0004	2006,70	0,43	3808,17
22,5	0,0003	2006,70	0,32	2771,50
23	0,0002	2006,70	0,23	2000,40
23,5	0,0002	2006,70	0,16	1431,96
24	0,0001	2006,70	0,12	1016,64
24,5	0,0001	2006,70	0,08	715,86
25	0,0001	2006,70	0,06	499,95
TOTAL ANUAL:			787,52	6.898.685

Tabla 24. Resultados de la aplicación del método numérico para calcular la energía producida por el aerogenerador V90-2.0MW en un año tipo

Recurso Eólico de Canarias

Estimación de la Energía producida por un Aerogenerador

Posición (UTM)	Límites R.E.C
X = <input type="text" value="363450"/>	[170550, 677550]
Y = <input type="text" value="3127550"/>	[3040750, 3274850]

Aerogenerador	
Modelo: <input type="radio"/> <input type="text" value="VESTAS V90/2000"/>	?
Curva de potencia: <input type="radio"/> <input type="text" value="Seleccionar archivo"/> <input type="text" value="Ningún archivo seleccionado"/>	?
Altura (m): <input type="text" value="80"/>	?

Coord X (UTM):	363450	
Coord Y (UTM):	3127550	
Tomo detalle numérico:	GomeraTenerife10.pdf	
Aerogenerador:	VESTAS V90/2000	?
Altura:	80 m	
Cte K de Weibull (80 m):	2.016	?
Velocidad viento (80 m):	7.4 m/s	
Dirección predominante del viento:	NNW	
Energía anual estimada:	7202673.2 kWh	?
Potencia anual:	822.223 kW	?
Horas anuales equivalentes:	3601.3 h	?

Figura 55. Energía producida por el aerogenerador V90-2.0MW de acuerdo con los resultados obtenidos con la herramienta del ITC

4.2.3. SELECCIÓN DEL AEROGENERADOR

Se evaluarán los resultados ofrecidos por varios modelos de aerogeneradores de clase IECIII de los fabricantes Vestas, Senvion, Enercon, Suzlon y Goldwind. Para ello se seguirá el mismo procedimiento desarrollado en

el apartado anterior para determinar la energía anual producida por el aerogenerador y se usa un parámetro, el factor de carga, como criterio de valoración del comportamiento de los aerogeneradores.

El factor de carga (FC) se define como la relación entre la energía eléctrica producida por el aerogenerador durante un periodo de tiempo T y la que hubiera producido si durante ese periodo hubiese estado funcionando continuamente a potencia nominal.

$$FC = \frac{E_{aerog.}}{P_N \cdot T} = \frac{P_{media\ aerog.}}{P_N} \quad (4.4)$$

De este modo, el FC del aerogenerador V90-2.0MW sería del 39 %. Hay que tener en cuenta que el FC está limitado por el límite de Betz, que establece que sólo se puede extraer del viento como máximo el 59,3 % de su energía. La escala de valoración del FC se muestra en la tabla 25.

$$FC = \frac{E_{aerog.}}{P_N \cdot T} = \frac{P_{media\ aerog.}}{P_N} = \frac{787,52\ kW}{2.000\ kW} \cdot 100 = 39\ %$$

Factor de carga, FC (%)	Valoración
< 20	Insuficiente
20 – 25	Aceptable
25 – 30	Bueno
30 – 40	Muy bueno
40 – 50	Excelente
> 50	Extraordinario

Tabla 25. Comportamiento de un aerogenerador en función del factor de carga (Villarrubia López, 2012)

Por tanto, haciendo uso de las ecuaciones 4.3 y 4.4 se calcula la energía producida por los aerogeneradores y su factor de carga teniendo en cuenta las curvas de potencia de cada uno de ellos.

Fabricante	Modelo	Energía anual (kW)	Potencia nominal (kW)	FC (%)	Valoración
Vestas	V90-2.0MW	6.898.685	2.000	39	Muy bueno
Senvion	MM100	7.844.047	2.000	45	Excelente
Enercon	E-103 EP2	8.535.953	2.350	41	Excelente
Suzlon	S111	7.027.146	2.100	48	Excelente
Goldwind	GW109/2500	10.263.842	2.500	47	Excelente

Tabla 26. Energía anual producida y factor de carga para cada modelo de aerogenerador

De los resultados obtenidos con cada aerogenerador (tabla 26) se observa que el que mejor se comporta es el Suzlon S111 puesto que es el que presenta el mayor factor de carga (48%). De este modo, para poder cubrir la necesidad energética anual de la EDAM serán necesarios dos aerogeneradores de este modelo.

A continuación, en la tabla 27 se resumen los datos obtenidos para el aerogenerador seleccionado y se muestra su curva de potencia en la figura 56.

Fabricante	Suzlon
Modelo	S111
Potencia nominal (kW)	2.100
Unidades instaladas	2
Producción energética anual (MWh)	14.054
Factor de carga (%)	48
Consumo energético anual de la EDAM (MWh)	12.722
Exceso energético estimado (MWh)	1.332

Tabla 27. Parámetros de operación del aerogenerador seleccionado

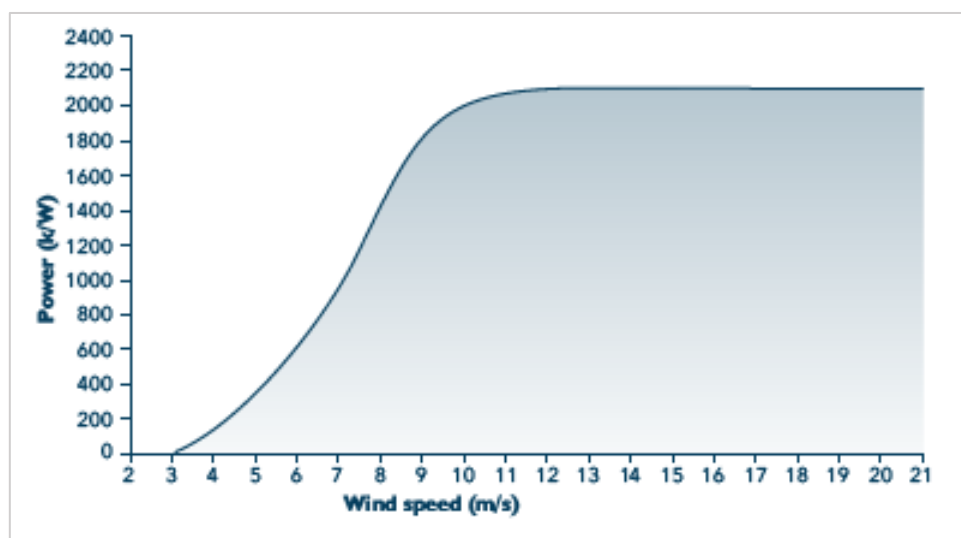


Figura 56. Curva de potencia del aerogenerador S111 de Suzlon

4.2.4. ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA ANUAL

Como se ha mencionado en apartados anteriores, se ha calculado la producción energética de los aerogeneradores a partir de los valores medios del recurso eólico disponible en un año tipo según los registros del ITC y del IDECanarias, por lo que en la realidad se pueden dar momentos en los que haya un exceso de energía aportada por los aerogeneradores y otros en los que se

sucedan episodios de escasez de ésta. Por ello, no es posible garantizar que se pueda llegar a satisfacer las necesidades de la estación desaladora en todo momento a lo largo de un año real, aun estimándose un exceso energético anual del 10% de las necesidades energéticas de la desaladora.

Este problema se solucionará conectando la estación desaladora a la red eléctrica, de modo que se pueda ceder a la red los excesos de energía en los picos de producción de energía eólica y tomar energía de ésta en aquellos momentos en los que las condiciones no sean las necesarias para obtener la suficiente energía eléctrica por medio de los aerogeneradores instalados. De este modo se garantiza el abastecimiento energético de la desaladora para que pueda operar de manera continua a lo largo del año.

ANEXO V

ESTIMACIÓN DEL PRESUPUESTO Y DEL PERIODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL

5. ESTIMACIÓN DEL PRESUPUESTO Y DEL PERIODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL

El presupuesto de los equipos dimensionados en el presente estudio se recoge en la tabla 28, donde los precios unitarios de las tuberías y las bombas han sido facilitados por la empresa Teidagua S. A. Estos últimos corresponden a los precios de bombas de características similares a las que se dimensionan en este trabajo y, debido a que no son los correspondientes a los modelos seleccionados, el presupuesto que se realiza es estimativo. Lo mismo ocurre con los datos de las membranas, cuyo precio unitario corresponde al de la membrana de alto rechazo SWC6 MAX de Hydranautics. Por otro lado, el precio del intercambiador PX-Q300 de ERI (30.500 \$/unidad) se ha obtenido de un presupuesto realizado a la compañía chilena Aguas de Antofagasta en 2015.

Membranas			
Descripción	Unidades	Precio ud. (€)	Importe (€)
AD-440 de SUEZ	770	700	539.000
Bombas			
Descripción	Unidades	Precio ud. (€)	Importe (€)
B. Captación UPA 200B de KSB	6	42.728	256.368
BAP MPAE100B/10A de Lowara	3	120.633	361.899
B. Booster ZE 200-250 de Sulzer	4	26.900	107.600
B. Distribución 8X15WXH-DS de Flowerve	2	54.143	108.286
		Total bombas:	834.153
Recuperador de energía			
Descripción	Unidades	Precio ud. (€)	Importe (€)
Intercam. de presión PX-Q300 de ERI	10	26.350	263.500
Tuberías PRFV de Flowtite			
Diámetro (mm)	Longitud (m)	Precio ud. (€/m)	Importe (€)
300	45	12	540
400	3.255	19	61.845
450	75	21	1.603
500	390	24	9.263
		Total tuberías:	73.251
Aerogeneradores S111 de Senvion			
Potencia nominal (kW)	Unidades	Precio ud. (€/kw)	Importe (€)
2.100	2	1.122	4.712.400
TOTAL (€):			6.422.304

Tabla 28. Presupuesto de los equipos dimensionados en el trabajo

El presupuesto total de los equipos dimensionados en este estudio se estima en *6,4 millones de euros*. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en este estudio no se ha dimensionado la estación desaladora en su totalidad y en el caso del parque eólico sólo se han seleccionado los aerogeneradores que serían necesarios para el abastecimiento de dicha EDAM.

En el caso de la estación desaladora, han de considerarse además los costes debidos a la obra civil (pozos, estructura de la planta de procesos, depósito regulador, depósito de cabecera, etc.), instalaciones de pretratamiento y postratamiento, equipos de instrumentación y control, así como todo tipo de instalaciones propias de la edificación de la planta desaladora (eléctrica, abastecimiento, saneamiento, climatización, contra incendios, etc.). Por ello, el presupuesto total de la estación desaladora se estimará con los de otras desaladoras de las islas de características similares, estas son las EDAM de Santa Cruz de Tenerife, Fonsalía (Guía de Isora) y Telde II (Gran Canaria).

EDAM	Inversión [€]	Capacidad [m ³ /día]	Ratio [€/m ³ /día]
Santa Cruz de Tenerife	24.600.000	20.000	1.230
Fonsalía	16.000.000	14.000	1.143
Telde II	19.000.000	16.000	1.188

Tabla 29. Costes de construcción de las estaciones de desalación de Santa Cruz de Tenerife, Fonsalía y Telde II

Teniendo en cuenta los datos recogidos en la tabla 29, se puede esperar que los costes de inversión de la estación desaladora estudiada en este trabajo de 10.000 m³/día de capacidad se encuentren entre *11,4 y 12,3 millones de euros*.

En lo que al parque eólico se refiere, los costes de los aerogeneradores suponen de media un 70% del coste total de éste (Villarrubia López, 2012), por lo que la inversión total del parque eólico se puede estimar en *6,7 millones de euros*.

Por último, el coste de la EDAM abastecida con energía eólica que se estudia en este trabajo resulta ser, en el escenario más desfavorable, de *19 millones de euros*. Por otro lado, el periodo que debe transcurrir hasta poder alcanzar la amortización de la inversión inicial se calcula igualando la ecuación con la que se determina el valor futuro de un capital presente y los ingresos

debidos a la venta del volumen de agua desalada en dicho periodo de tiempo. Para ello se considera un interés nominal del 3% anual, un precio del agua desalada de 1 €/m³ y una disponibilidad anual de la planta desaladora del 95%.

Valor futuro de la inversión presente:

$$F = C(1 + i)^n = 19.000.000 \text{ € } (1 + 0,03)^n$$

Ingresos por venta de agua desalada:

$$I = \text{capacidad EDAM} \cdot \text{disponibilidad} \cdot \text{tiempo} \cdot \text{precio agua desalada}$$

$$I = 10.000 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot 0,95 \cdot 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \cdot n \text{ años} \cdot 1 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}$$

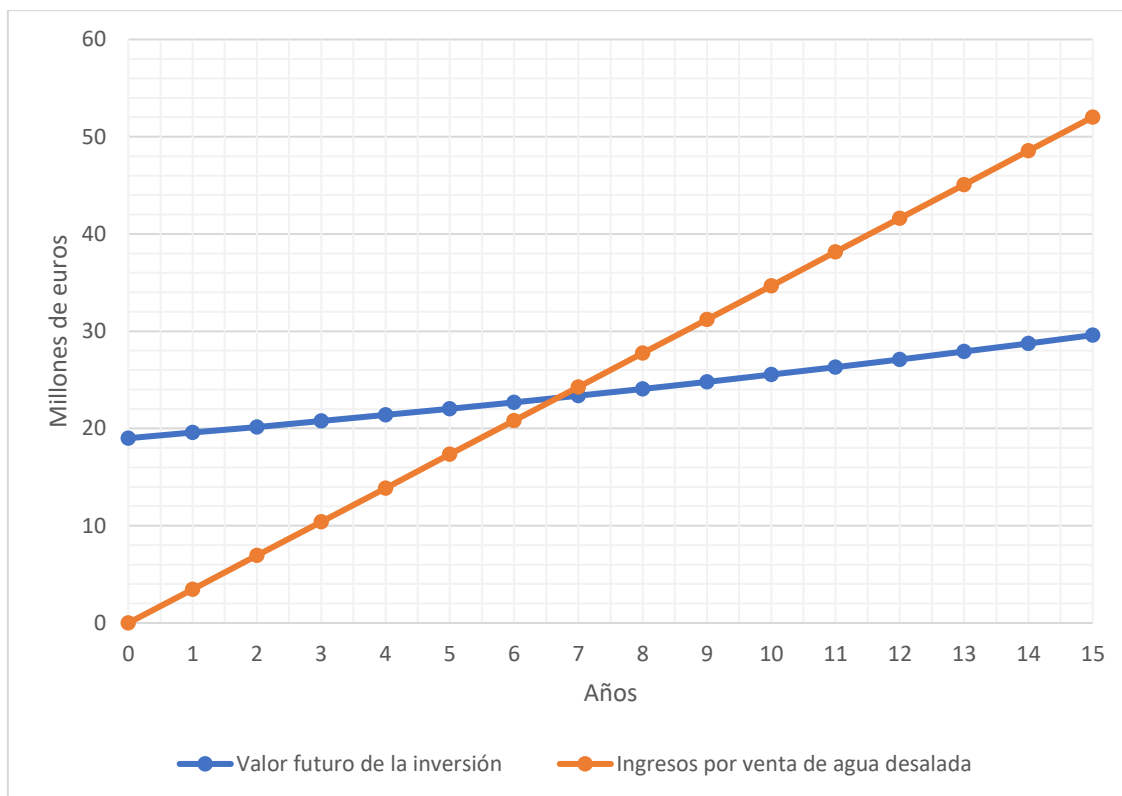


Figura 57. Valor futuro de la inversión inicial para la construcción de la estación desaladora e ingresos por la venta del agua desalada

Finalmente, la inversión inicial se recupera tras los primeros 7 años de operación de la EDAM del Valle de Güímar.

ANEXO VI

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA

6. DOCUMENTACIÓN TÉCNICA

En el presente anexo se incluyen las especificaciones técnicas y de operación de los equipos seleccionados en los anexos anteriores.

Se indican, según su orden de visualización, los siguientes documentos:

6.1. RESULTADOS DEL SOFTWARE DE DISEÑO DE SISTEMAS DE DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA *WINFLOWS*

6.2. FICHA TÉCNICA DEL MODELO DE MEMBRANA SELECCIONADO

6.3. FICHA TÉCNICA DEL INTERCAMBIADOR DE PRESIÓN

6.4. FICHA TÉCNICA DE LA BOMBA DE ALTA PRESIÓN

6.5. FICHA TÉCNICA DE LA BOMBA BOOSTER

6.6. FICHA TÉCNICA DE LAS TUBERÍAS DE PRFV

6.7. FICHA TÉCNICA DE LA BOMBA DE CAPTACIÓN

6.8. FICHA TÉCNICA DE LA BOMBA DE DISTRIBUCIÓN

6.9. FICHA TÉCNICA DEL AEROGENERADOR

GE Water

Winflows Version 3.3.2

DataBase Version 3.18

Results Summary

Flow Data	m3/day	Analytical Data	mg/l
Raw Feed	11111.11	Raw Feed TDS	38873.68
Product	4999.78	Product TDS	246.759
Concentrate	6117.69	Concentrate TDS	70464.07

System Data **Single Pass Design**

Temperature: C RO-1: 21 System Rec. 45,0 %

Average Flux (m/sec), Pass and Stage

Pass	Average	Stage 1
Pass 1	3,68e-06	3.68e-06

Array Data

Pass 1

Recovery %: 45.00 Conc. TDS(mg/l): 70464.07 Conc. Flow: 6117.69 m3/day

Stage	Total		Element Type	Flow, m3/day		Pressure bar		Perm TDS
	Housing	Element		Feed	Perm	Feed	DP	mg/l
1	55	385	AD-440	11111.11	4999.78	61.79	0.88	225.75
Total	55	385						

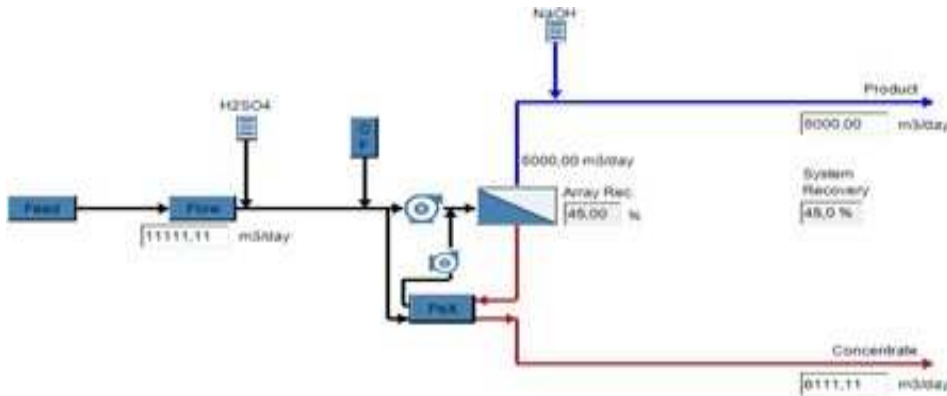
Analytical Data

Cation	mg/l			Anion	mg/l		
	Product	Feed	Conc		Product	Feed	Conc
Ca	0.63	443.00	782.77	SO4	2.67	3250.88	5745.71
Mg	1.65	1510.94	2670.18	Cl	132.42	21945.72	38699.64
Na	87.17	12198.74	21505.69	F	0.01	0.88	1.55
K	4.49	463.45	815.96	NO3	0.01	0.72	1.26
NH4	0.00	0.00	0.00	Br	0.00	0.51	0.90
Ba	0.00	0.00	0.00	PO4	0.00	0.00	0.00
Sr	0.00	0.00	0.00	B	0.87	5.35	8.79
Fe	0.00	0.00	0.00	SiO2	0.01	1.03	1.81
Mn	0.00	0.00	0.01	H2S	0.00	0.00	0.00
TDS mg/l	246.76	39951.96	70464.07	HCO3	16.73	130.58	229.36
pH	8.00	6.86	6.95	CO2	0.27	11.14	11.14
				CO3	0.09	0.15	0.43
Saturation Data							
BaSO4 %	0.00	0.00	0.00	CaF2 %	0.00	8.03	34.54
CaSO4 %	0.00	25.89	52.11	SiO2 %	0.01	0.79	1.43
SrSO4 %	0.00	0.00	0.00	LSI	-2.43	-0.58	-0.10
Struvite %	0.00	0.00	0.00	Pi bar	0.19	28.56	52.21

Chemical Additions

Addition (chemical as 100 %)	Kg/Day	mg/L in feed		
Sulphuric Acid in Feed	167.41	15.07	LSI	-0.6
Sodium Hydroxide in Feed	51.58	10.32	pH	8

Process Data Sheet



Flow Data	m3/day	Analytical Data	mg/l
Raw Feed	11111.11	Raw Feed TDS	38873.68
Product	4999.78	Product TDS	246.759
Concentrate	6117.69	Concentrate TDS	70464.07

System Data	Single Pass Design
Temperature: C	RO-1: 21

		Pass 1	Pass 2	Pass 3
Feed Flow to 1st Stage Housing	m3/day	11111.11		
Feed Pressure	bar	61.79		
Array Recovery	%	45.00		
Permeate Flow	m3/day	4999.78		
Split Permeate Flow	m3/day	0.00		

Pump Summary					
Main Pump			Pass 1	Pass 2	Pass 3
	Feed Flow	m3/day	5227.79	5227.79	5227.79
	Inlet Pressure	bar	2.74		
	Discharge Pressure	bar	61.79		
	Total Efficiency	%	76.12		
	Power	kW	997.62		
ERD Booster Pump					
	Feed Flow	m3/day	5883.32		
	Pressure Increase	bar	1.69		
	Efficiency	bar	72.94		
	Power	kW	15.81		

Streams Analytical Data

Ions, mg/l		Total Feed	Pre-dosed Feed	RO1 Feed	Final Downstream Perm
Calcium		431.00	431.00	443.00	0.63
Magnesium		1470.00	1470.00	1510.94	1.65
Sodium		11870.01	11870.01	12198.74	81.24
Potassium		451.00	451.00	463.45	4.49
Ammonia - N (NH4)		0.00	0.00	0.00	0.00
Barium		0.00	0.00	0.00	0.00
Strontium		0.00	0.00	0.00	0.00
Iron		0.00	0.00	0.00	0.00
Manganese		0.00	0.00	0.00	0.00
Sulfate		3148.00	3162.76	3250.88	2.67
Chloride		21353.96	21353.96	21945.72	132.42
Fluoride		0.86	0.86	0.88	0.01
Nitrate		0.70	0.70	0.72	0.01
Bromide		0.50	0.50	0.51	0.00
Phosphate		0.00	0.00	0.00	0.00
Boron		5.23	5.23	5.35	0.87
Silica		1.00	1.00	1.03	0.01
Hydrogen Sulfide		0.00	0.00	0.00	0.00
Bicarbonate		139.20	127.09	130.58	1.74
Carbon Dioxide		0.88	11.14	11.14	11.14
Carbonate		2.23	0.15	0.15	0.00
TDS, mg/l		38873.68	38874.24	39951.96	225.75
Flow	m3/day	11111.11	11111.11	11111.11	4999.78
Temperature	C	21.00	21.00	21.00	21.00
Pressure	bar	2.00	2.00	61.79	2.00
Osm. Pressure	bar	27.76	27.76	28.56	0.19
pH		8.00	6.86	6.86	5.40
Conductivity at 25C	µS/cm	56274.00	56271.00	57624.00	466.00
Saturation Data					
BaSO4	%	0.00	0.00	0.00	0.00
CaF2	%	7.48	7.48	8.03	0.00
CaSO4	%	24.91	25.03	25.89	0.00
SiO2	%	0.79	0.77	0.79	0.00
SrSO4	%	0.00	0.00	0.00	0.00
Struvite	%	0.00	0.00	0.00	0.00
LSI		0.54	-0.60	-0.58	-6.01
S&DI		0.08	-1.11	-1.09	-6.42

Ions, mg/l		Product	Concentrate	RO1 Conc. After ERD
Calcium		0.63	782.77	782.77
Magnesium		1.65	2670.18	2670.18
Sodium		87.17	21505.69	21505.69
Potassium		4.49	815.96	815.96
Ammonia - N (NH4)		0.00	0.00	0.00
Barium		0.00	0.00	0.00
Strontium		0.00	0.00	0.00
Iron		0.00	0.00	0.00
Manganese		0.00	0.01	0.01
Sulfate		2.67	5745.71	5745.71
Chloride		132.42	38699.64	38699.64
Fluoride		0.01	1.55	1.55
Nitrate		0.01	1.26	1.26
Bromide		0.00	0.90	0.90
Phosphate		0.00	0.00	0.00
Boron		0.87	8.79	8.79
Silica		0.01	1.81	1.81
Hydrogen Sulfide		0.00	0.00	0.00
Bicarbonate		16.73	229.36	229.36
Carbon Dioxide		0.27	11.14	11.14
Carbonate		0.09	0.43	0.43
TDS, mg/l		246.76	70464.07	70464.07
Flow	m3/day	4999.78	6117.69	6117.69
Temperature	C	21.00	21.00	21.00
Pressure	bar	2.00	60.91	2.03
Osm. Pressure	bar	0.19	52.21	52.21
pH		8.00	6.95	6.95
Conductivity at 25C	µS/cm	487.00	93030.00	93030.00
Saturation Data				
BaSO4	%	0.00	0.00	0.00
CaF2	%	0.00	34.54	34.54
CaSO4	%	0.00	52.11	52.11
SiO2	%	0.01	1.43	1.43
SrSO4	%	0.00	0.00	0.00
Struvite	%	0.00	0.00	0.00
LSI		-2.43	-0.10	-0.10
S&DI		-2.84	-0.63	-0.63

AD series

high rejection seawater RO elements

The AD Series, family of proprietary thin film reverse osmosis membrane elements, is characterized by an excellent sodium chloride rejection. AD series is selected when high quality permeate is demanded from seawater that is relatively high in TDS.

AD series new membrane chemistry provides excellent rejection characteristics when operated at seawater operating conditions (pressures exceeding 800psi [5,516kPa] and elevated temperatures).

AD series is certified to NSF/ANSI 61.

Table 1: Element Specification

Membrane	Thin-film membrane (TFM*)			
Model	Average permeate flow gpd (m ³ /day) (1)(2)	Average NaCl rejection (1)(2)	Minimum NaCl rejection (1)(2)	Typical Boron Rejection (2)
AD-90	1400 [5.3]	99.8%	99.5%	95.0%
AD-365	6500 [24.2]	99.8%	99.5%	95.0%
AD-400,34	7000 [26.5]	99.8%	99.5%	95.0%
AD-440	7700 [29.2]	99.8%	99.5%	95.0%

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

(2) Testing conditions: 32,000mg/l NaCl & 5mg/l boron solution at 800psi [5,516kPa] operating pressure, 77°F [25°C], pH 8.0 and 7% recovery.

Model	Active area ft ² (m ²)	Outer wrap	Part number
AD-90	90 [8.4]	Fiberglass	3056651
AD-365	365 [33.9]	Fiberglass	3056652
AD-400,34	400 [37.2]	Fiberglass	3056654
AD-440	440 [40.9]	Fiberglass	3056655

Figure 1a: Element Dimensions Diagram – Male

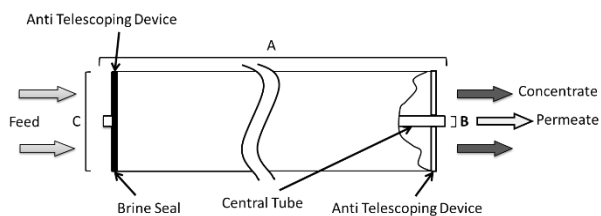


Figure 1b: Element Dimensions Diagram – Female

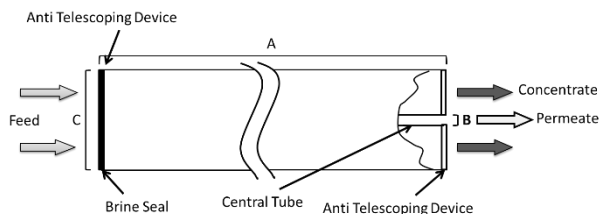


Table 2: Operating and CIP parameters

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

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

Find a contact near you by visiting www.suezwatertechnologies.com and clicking on "Contact Us."

*Trademark of SUEZ; may be registered in one or more countries.

©2017 SUEZ. All rights reserved.

Table 3: Dimensions and Weights

Model	Type	Dimensions, inches (cm)			Boxed
		A	B	C	Weight lbs. (kg)
AD-90	Male	40.0 (101.6)	0.75 (1.90)	3.9 (9.9)	9 (4)
AD-365	Female	40.0 (101.6)	1.125 (2.86)	7.9 (20.1)	35 (16)
AD-400, 34	Female	40.0 (101.6)	1.125 (2.86)	7.9 (20.1)	35 (16)
AD-440	Female	40.0 (101.6)	1.125 (2.86)	7.9 (20.1)	35 (16)



1717 Doolittle Dr.
San Leandro, CA
94577, USA
Phone: 1-510-483-7370
FAX: 1-510-483-7371

**Energy Recovery, Inc.
Specifications Sheet
PX-Q300**

REV	BY	CKD	REVISION	DATE
0	TR	JA	Initial release	1/1/2012
1	RBC	RAB	General update	2/13/2012
2	RBC	RAB	Corrected Typo	3/13/2012

DESCRIPTION:
TECHNICAL DATA SHEET, POSITIVE
DISPLACEMENT ENERGY RECOVERY
DEVICE

Sheet
Page 1 of 1
Document number:
80315-01

1. Part number 40032		2. Service		3. Reference		
OPERATING CONDITIONS	Liquid	Seawater	46	Performance	Standard	
	Operating Temperature	33°F-120°F (0.6-49°C)	47	Case Hydrotest	Standard	
	Max. Temperature	120°F (49°C)	48	Rotation Speed Test	Standard	
	Specific Gravity	1.03	49	Die Penetrant Test (ceramics)	Standard	
	Viscosity	1.060 cP @ 70°F (21.1°C)	50	Cavitation Test	Standard	
	Flow range	200 - 300 gpm (45 - 68m3/h)	51	Witnessed Test	Optional	
	Maximum High-Pressure Inlet Flow	300 gpm (68 m3/h)	52			
	Maximum Low-Pressure Outlet Flow	300 gpm (68 m3/h)	53			
	Maximum Inlet High Pressure	1200 psi (82.7 bar)	54			
	Maximum Inlet Low Pressure	145 psi (10 bar)	55			
	Minimum Discharge Pressure	12 psi (0.8 bar)	56			
	Filtration Requirement (Nominal)	20 µm	57			
			58	Outside Dimensions	Standard	
			59	Internal Components	Standard	
			60	Housing Dimensions	Standard	
			61	Ceramic Dimensions	Standard	
	PERFORMANCE	Peak Efficiency	98%	62	Material Certificates	Standard
		Maximum High Pressure Differential	14.5 psi (1 bar) @ 300 gpm	63	Visual	Standard
		Maximum Low Pressure Differential	14.5 psi (1 bar) @ 300 gpm	64	Packing and Crating	Standard
Maximum Lubrication Flow		4.4 gpm (1 m3/h) @ 300 gpm	65			
Maximum Rotational Speed		800 rpm @ 300 gpm	66			
Maximum Salinity Increase at Membranes		3% @ 40% Recovery	67			
Noise Per ISO 3744		Less Than 85 dB(A)	68			
Warranted Efficiency***		97.2%	69			
MATERIALS	Housing**	GRP	70	PX-Q300 unit Shipping Dimensions	47x17x17 inch 119x43x43 cm	
	Rotor, Sleeve, Endcover Assembly	Ceramic-alumina		PX-Q300 unit Shipping Weight	210 lbs. (95 kg)	
	Low Pressure Inlet Port Fitting	PVC	71	Dry PX-Q300 unit weight	200 lbs. (91 kg)	
	Low Pressure Outlet Port Fitting	PVC	72	Cartridge Shipping Dimensions	20x12x12 inch 51x31x31 cm	
	High Pressure Inlet Port Fitting	Superduplex (S32750 OR S32760)	73	Cartridge Weight	49 lbs. (22 kg)	
	High Pressure Outlet Port Fitting	Superduplex (S32750 OR S32760)		Shipping and Storage Temperature	33°F-120°F (0.6-49°C)	
	Internal Low Pressure Interconnector	Titanium	74			
	Fasteners/Hardware (non-wetted)	316SS	75			
	Tension Rod Assembly*	AL-6XN* / C-276				
	O-rings	EPDM	76			
PIPING CONNECTIONS	Low Pressure Inlet Port Fitting	4" (DN100) Grooved-end Flexible Pipe Coupling	78	Internal Volume	830 in ³ (13,601 cm ³)	
	Low Pressure Outlet Port Fitting		79	Wet Weight	230 lbs. (104 kg)	
	High Pressure Inlet Port Fitting	3" (DN80) Grooved-end Flexible Pipe Coupling	80			
	High Pressure Outlet Port Fitting		81			
			82			
			83			
			84			
TESTS						
INSPECTION						
SHIPPING WEIGHT AND DIMENSIONS						
MISCELLANEOUS						

*AL-6XN is a registered trademark of Allegheny Ludlum
 **Housing designed in accordance with the engineering standards of the Boiler and Pressure Vessel Code of the American Society of Mechanical Engineers.
 ***The standardized efficiency test is conducted under conditions of balanced flow, 1000psi pressure and the mid-flow for the PX model under test.
 ERI RESERVES THE RIGHT TO MAKE SPECIFICATION CHANGES AT ANY TIME WITHOUT PRIOR NOTICE.

PRICE: sales@energyrecovery.com	
MANUFACTURER: Energy Recovery Inc	MODEL: PX-Q300



1717 Doolittle Dr.
San Leandro, CA
94577, USA
Phone: +1(510)483-7370
Fax: +1(510)483-7371

ENERGY RECOVERY, INC.
PX-Q300

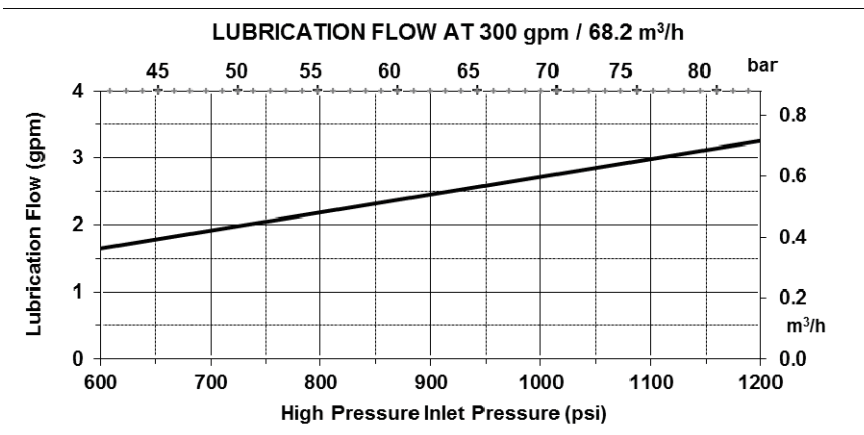
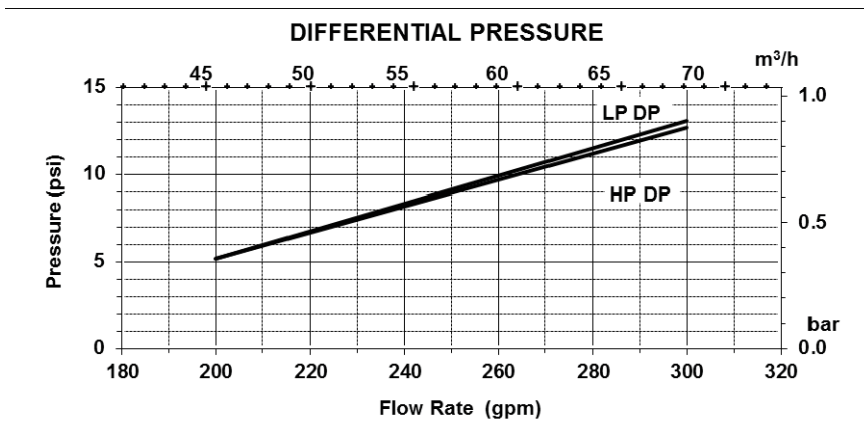
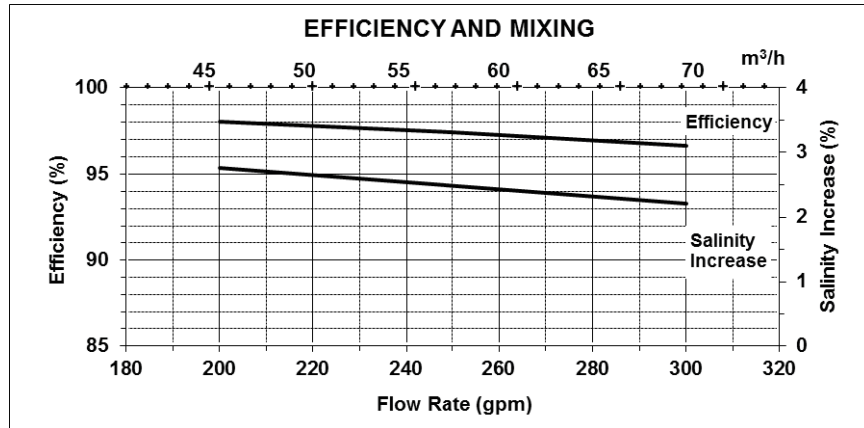
SHEET
1 of 1

DOCUMENT NUMBER
80328-01 Rev 0

MANUFACTURER
ERI

REV	BY	CKD	REVISION	DATE
0	JLA	APT	Initial Release	1/19/12

PERFORMANCE CURVES, POSITIVE
DISPLACEMENT ENERGY RECOVERY
DEVICE



NOTE: See ERI document number 80008-01 for definitions and test conditions.

Información técnica

Artículo número

Rev.

MPAE100B/10ABF4500/W25VDCC4

Nombre de usuario

Nombre de la empresa Persona encargada Número de teléfono Número de FAX Dirección del correo electrónico	Destinatario	Remitente
--	--------------	-----------

Características de funcionamiento

1	Tipo inst.	Una bomba sola	Fluido	Agua de mar
2	N° de bombas	1	Temperatura de funcionamiento t A°C	19
3	Flujo nominal	m³/h 210,7	Valor pH a t A	7
4	Cabezal nominal	m 593,2	Densidad a t A	kg/m³ 1030
5	Altura estática	m 0	Viscosidad cinemática a t A	mm²/s 1,569
6	V	kPa 0	Presión de vapor en t A	kPa 100
7	Temperatura ambiente	°C 20	Contenido de sólidos	Diámetro cumpe 0 sólidos 0
8	NPSH disponible	m 0	Altura	m 0

Datos bomba

9	Diseño	Horizontal Multistage pump, axial DNs, radial DNd, 1 Slide bearing DNs, 1 Roller bearings DNd				
10	Execution	AO / DNs - axial, DNd - above (Unit)				
11	Velocidad de funcionamiento rpm	2985	Ø Rodete	Máx.	mm 245	
12	Número de fase	10		Diseñado	mm 245	
13	Boquilla de aspiración	DNs 150 PN10/16 / EN1092-2 (D-MPA)		Min.	mm 245	
14	Boquilla de descarga	DNd 100 PN100 / EN1092-2 (D-MPA)		Caudal	Nominal	m³/h 211,3 (211,3)
15	Maxima presion en la carcasa kPa	10000			Max-	m³/h 293,4
16	Max. Presion de trabajo kPa	8860,2			Min-	m³/h 72,9
17	Tipo de rodete	Radialrad		Altura de impulsión	Nominal	m 596,7
18	Altura H(Q=0)	m 880			en Qmax	m 262
19	Potencia del eje motor máximakW	455,1		en Qmin	m 849,9	
20	Pump weight	kg 720		Potencia en el eje	kW 447,8 (447,8)	
21	Total weight	kg 3.597,7		Rendimiento	% 78,63	
				NPSH 3%	m 5	

Materiales

Bomba		Cierre mecánico	
22	Suction Impeller	Cast Iron , EN-GJL-200 , ASTM-CLASS 30	Single mechanical seal, with shaft sleeve (balanced)
23	Impulsor	Cast Iron , EN-GJL-200 , ASTM-CLASS 30	H75N/55
24	Difusor	Cast Iron , EN-GJL-150 , ASTM-CLASS 25	Mechanical seal diameter
25	Stage casing	Ductile Iron , EN-GJS-400-15 , ASTM-65-45-12	1. Rotating ring
26	Cuerpo aspiración	Ductile Iron , EN-GJS-400-15 , ASTM-65-45-12	2. Stationary ring
27	Discharge casing	Cast Steel , 1.0619 , ASTM - WCB	3. Secondary seal
28	Seal Cover	Ductile Iron , EN-GJS-400-15 , ASTM-65-45-12	4. Springs
29	Bearing Bracket / Motor Adapter	Cast Iron , EN-GJL-250 , ASTM-CLASS 35	5. Others
30	Pump Foot	Carbon steel , 1.0038 , ASTM - Grade C, D	Gaskets of the pump
31	anillo de desgaste	without (standard)	Code
32	Drum	Stainless Steel , 1.4057 , ASTM-431	BQ1EGG-WA
33	Drum Bush	Cast Iron , EN-GJL-250 , ASTM-CLASS 35	
34	Eje	Stainless Steel , 1.4057 , ASTM-431	
35	Shaft Sleeve	Stainless Steel , 1.4057 , ASTM-431	
36	Spacer Sleeve	Stainless Steel , 1.4057 , ASTM-431	
37	Shaft Nut	Stainless Steel , 1.4057 , ASTM-431	
38	IMPELLER NUT	A4	
39			
40			
41			

Datos del motor

42	Fabricante	WEG	Tensión eléctrica	400 V	Fabricante	Flender
43	Ejecución	IE3 motors - Cast Iron Frame - Premium Efficiency			Serie	N-EUPEX - Type B
44	Tipo	W22 - 355 A/B - 450kW			Tipo	B 225/0-45/75
45	Pot. Nominal.	450 kW	Corriente eléctrica	740 A	Tamaño de construcción	225
46	Velocidad nominal	2985 rpm	Grado de protección	IP55	Longitud de desmontaje	4
47	Tamaño de construcción	355A/B2	Protección antideflagrante	--	Weight	kg 20,0
48	Weight	kg 2.400,0	Diámetro del eje	75 mm	Protección del acoplamiento	si Weight: 4,9 kg

Placa base

49	Nombre	FRAME EMP100-KL-355AB				
50	Weight	kg 452,8				
51						
52						
53						

Project	Project ID	Created by	Created on	Last update
			6/19/2018	

hydraulic
MPAE100B/10A/BF4500/W25VDCC4

Artículo número
Nombre de usuario

Rev.

Nombre de la empresa
Persona encargada
Número de teléfono
Número de FAX
Dirección del correo electrónico

Destinatario

Remitente

	Ø mm	Capacidad de la bomba Gama de funcionamiento			Cabezal de la bomba			Potencia al eje P2			Tipo de rodete	Radialrad
		Min. m³/h	Máx. m³/h	Máx. m³/h	H(Q=0) m	η Máx. %	P2(Q=0) kW	Máx. kW	η Máx. %	Sentido de la rotación	en el sentido del reloj	
Actual	245	72,9	293	181	879	686		455	429	Frecuencia	50	
Min.	245	/	/	181	879	686		/	429	Velocidad de funcionamiento	2985	
Máx.	245	/	/	181	879	686		/	429			

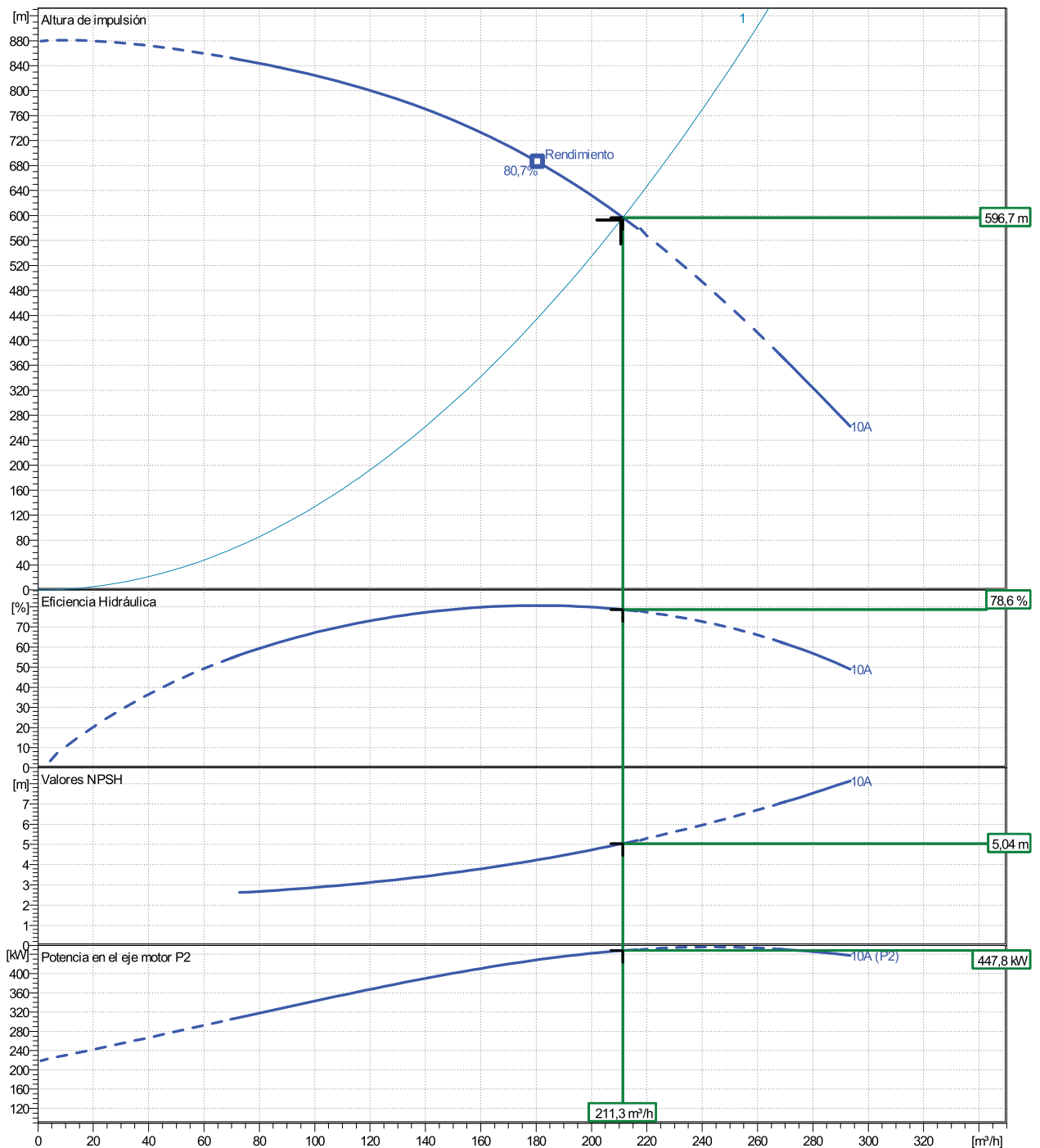
Potencia referida a:

hydr. Performance acceptance acc. To EN ISO 9906 Class

Agua de mar [100%] ; 19°C; 1030kg/m³; 1,57mm²/s

Grade 2B

MEI: N.A

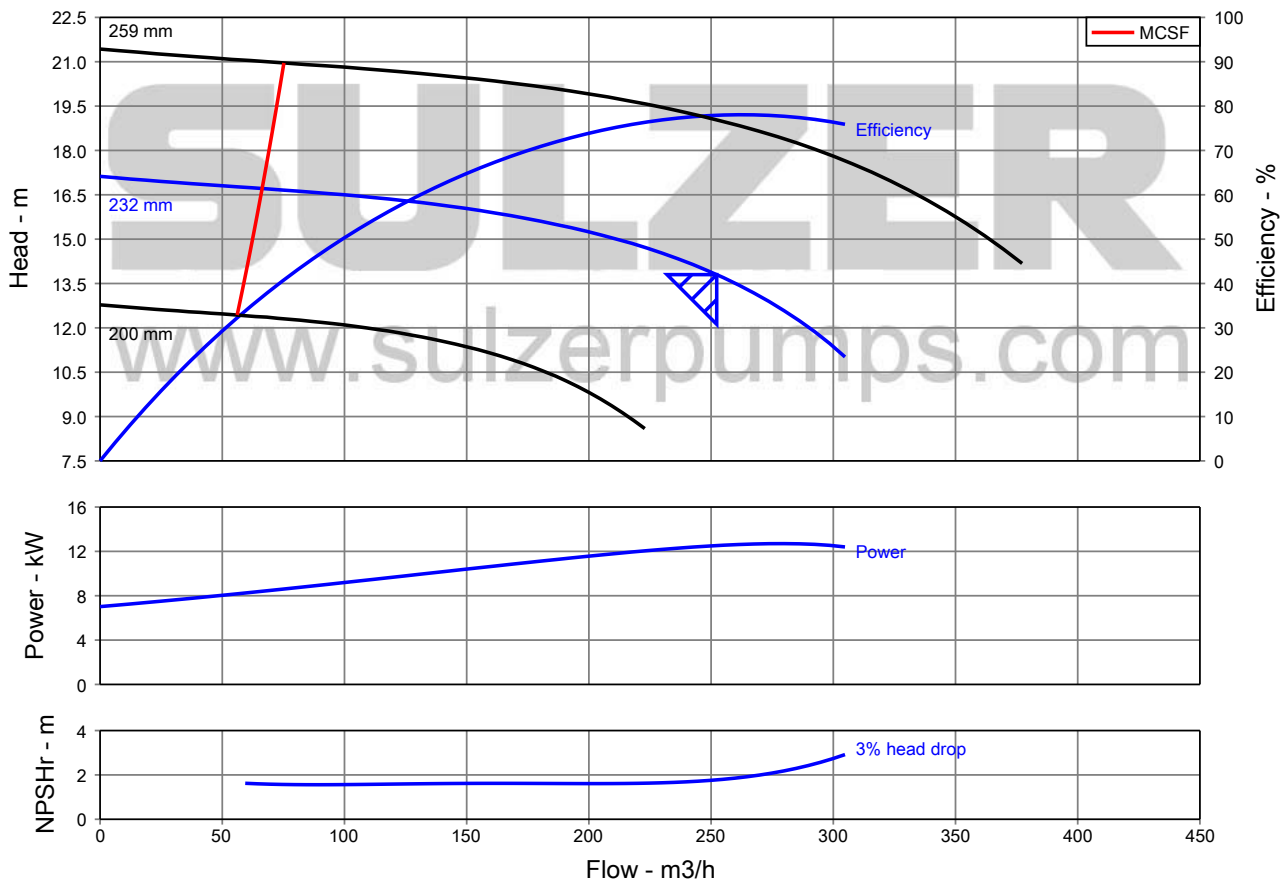


Project	Project ID	Created by	Created on 6/19/2018	Last update
---------	------------	------------	-------------------------	-------------

Pump Performance Datasheet

Customer :	Sulzer Reference ID :
Inquiry Number/ID :	Type / Size : ZE 200-250
Item number : Default	Stages : 1
Service :	Based on curve number : Z-948.502-52-22-01
Quantity : 1	Date of Last Update : 20 Jun 2018 19:32

Operating Conditions		Liquid	
Flow, rated	: 252.3 m3/h	Liquid type	: Water
Differential head / pressure, rated (requested)	: 13.80 m	Additional liquid description	: Seawater
Suction pressure, rated / max	: 0.00 / 0.00 bar.g	Solids diameter, max	: 0.00 mm
NPSH available, rated	: Ample	Solids concentration, by volume	: 0.00 %
Frequency	: 50 Hz	Temperature, rated / max	: 20.00 / 20.00 deg C
Performance		Fluid density, rated / max	: 1.029 / 1.029 kg/dm3
Speed, rated	: 1460 rpm	Viscosity, rated	: 1.00 cSt
Impeller diameter, rated	: 232 mm	Vapor pressure, rated	: 0.02 bar.a
Impeller diameter, maximum	: 259 mm	Material	
Impeller diameter, minimum	: 200 mm	Material selected	: Carbon Steel (S-x)
Efficiency	: 77.93 %	Pressure Data	
NPSH (3% head drop) / margin required	: 1.78 / 0.00 m	Maximum casing/bowl working pressure	: 1.73 bar.g
Ns (imp. eye flow) / Nss (imp. eye flow)	: 2,497 / 13,594 US Units	Maximum allowable working pressure	: 19.60 bar.g
MCSF	: 66.30 m3/h	Maximum allowable suction pressure	: 17.87 bar.g
Head, maximum, rated diameter	: 17.12 m	Hydrostatic test pressure	: 2.59 bar.g
Head rise to shutoff	: 24.08 %	Driver & Power Data (@Max density)	
Flow, best eff. point	: 262.6 m3/h	Driver sizing specification	: Rated power
Flow ratio, rated / BEP	: 96.08 %	Margin over specification	: 0.00 %
Diameter ratio (rated / max)	: 89.58 %	Service factor	: 1.00
Head ratio (rated dia / max dia)	: 72.51 %	Power, hydraulic	: 9.76 kW
Cq/Ch/Ce/Cn [ANSI/HI 9.6.7-2010]	: 1.00 / 1.00 / 1.00 / 1.00	Power, rated	: 12.52 kW
Selection status	: Acceptable	Power, maximum, rated diameter	: 12.70 kW
		Minimum recommended motor rating	: 15.00 kW / 20.12 hp



Gama de productos - Datos técnicos

Diámetros

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

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

Para otros diámetros consulte con el fabricante.

Longitud

La longitud estándar de la tubería FLOWTITE es de 12 metros para tubos de diámetro superior a 300 mm, si bien también se suministran tubos de 6 y 18 metros de longitud. Las tuberías de diámetro inferior a 300 mm están disponibles en tubos de 6 metros de longitud. En pedidos especiales se puede suministrar tubería FLOWTITE en tubos de otras longitudes para satisfacer las necesidades del proyecto.

Rigideces nominales

Las tuberías FLOWTITE tienen las siguientes rigideces nominales iniciales (EI/D^3).

Rigidez nominal	
SN	N/m^2
2500	2500
5000	5000
10000	10000

AMITECH también fabrica tubos de rigidez especial que se ajustan a las necesidades específicas del proyecto.

Accesorios

AMITECH también suministra los accesorios más comunes, como son codos, derivaciones en T, reductores, derivaciones en Y y pozos de registro.



Valores de capacidad de carga

Se pueden utilizar los siguientes valores de capacidad de carga para calcular la resistencia a la tracción axial y tangencial.

Resistencia a la tracción tangencial

Carga mínima inicial en sentido tangencial (circunferencial) en N/mm de longitud:

DN	PN1	PN6	PN10	PN16	PN20	PN25	PN32
300	60	360	600	960	1200	1500	1820
350	70	420	700	1120	1400	1750	2240
400	80	480	800	1280	1600	2000	2560
450	90	540	900	1440	1800	2250	2880
500	100	600	1000	1600	2000	2500	3200
600	120	720	1200	1920	2400	3000	3840
700	140	840	1400	2240	2800	3500	4480
800	160	960	1600	2560	3200	4000	5120
900	180	1080	1800	2880	3600	4500	5760
1000	200	1200	2000	3200	4000	5000	6400
1200	240	1440	2400	3840	4800	6000	7680
1400	280	1680	2800	4480	5600	7000	8960
1600	320	1920	3200	5120	NA	NA	NA
1800	360	2160	3600	5760	NA	NA	NA
2000	400	2400	4000	6400	NA	NA	NA
2400	480	2880	4800	7680	NA	NA	NA

Resistencia a la tracción axial

Carga mínima inicial en sentido axial (longitudinal) en N/mm de circunferencia:

DN	PN1	PN6	PN10	PN16	PN20	PN25	PN32
300	95	115	140	150	170	190	220
350	100	125	150	165	190	215	240
400	105	130	160	185	210	240	270
450	110	140	175	205	235	265	295
500	115	150	190	220	250	290	330
600	125	165	220	255	295	345	380
700	135	180	250	290	340	395	450
800	150	200	280	325	380	450	520
900	165	215	310	355	420	505	590
1000	185	230	340	390	465	560	660
1200	205	260	380	460	560	660	760
1400	225	290	420	530	630	760	990
1600	250	320	460	600	NA	NA	NA
1800	275	350	500	670	NA	NA	NA
2000	300	380	540	740	NA	NA	NA
2400	350	440	620	880	NA	NA	NA



Gama de productos - Datos técnicos

Presión

Existen tuberías FLOWTITE para distintas presiones nominales, si bien no todas están disponibles en todos los diámetros y rigideces.

La tabla que sigue muestra las presiones más comunes.

Presión nominal PN	Presión de timbraje Bar	Límite máx. diámetro (mm)
1 (sin presión) saneamiento	1	2400
6	6	2400
10	10	2400
16	16	2000
20	20	1400
25	25	1400
32	32	1400

Las presiones nominales se han establecido conforme a las especificaciones del Manual de diseño de tuberías de fibra de vidrio M-45 de la AWWA. Las tuberías están timbradas a la máxima presión de servicio incluso cuando estén enterradas a la máxima profundidad recomendada. Para asegurar que las tuberías FLOWTITE tengan la larga vida útil para la que han sido diseñadas, se debe observar lo siguiente:

Prueba hidráulica

Presión máxima de prueba en fábrica:

(AWWA C950 y ASTM D3517)

2,0 x PN (presión nominal)

Presión máxima de prueba en zanja:

1,5 x PN (presión nominal)

Golpe de ariete

Presión máxima:

1,4 x PN (presión nominal)

*Todas las estructuras que formen parte de la instalación deben diseñarse para poder soportar presiones de ensayo superiores a la PN.

Velocidad

La velocidad máxima recomendada es de 3,0 m/s. No obstante, las tuberías permiten velocidades de hasta 4,0 m/s si se trata de flujos de agua limpia sin materiales abrasivos.

Resistencia a los rayos UV

No hay prueba de que los rayos ultravioleta afecten la vida útil de las tuberías FLOWTITE, si bien pueden producir una alteración estética que toma la forma de una decoloración de la superficie externa del tubo.

El contratista responsable de la instalación puede tratar esta superficie externa con pintura con base de uretano compatible con el poliéster reforzado con fibra de vidrio, si bien este tipo de tratamiento requerirá un mantenimiento futuro.

Coefficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson varía en función del método de fabricación de la tubería. En el caso de las tuberías FLOWTITE, la relación entre la carga circunferencial y la respuesta axial (longitudinal) varía entre 0,22 y 0,29. En el caso de la carga axial y la respuesta circunferencial, el coeficiente de Poisson es ligeramente menor.

Temperatura

La temperatura máxima permitida en tuberías con la presión nominal estándar es de 35°C. Para caudales con temperaturas comprendidas entre los 35°C y 50°C, AMITECH recomienda aumentar la clase de presión de la tubería un nivel. Por ejemplo, en estas condiciones una tubería de PN16 bar debe ser utilizada donde normalmente se usaría una de PN10 bar. Para temperaturas superiores a los 50°C, es preferible consultar con el fabricante para obtener mayor información sobre el tipo de resinas y los aumentos de clase de presión a utilizar.

Coefficiente térmico

El coeficiente térmico de expansión y contracción axial de las tuberías FLOWTITE es de 24 a 30 x 10⁻⁶ cm/cm/C°.

Coefficientes de rugosidad

Las pruebas realizadas con tuberías FLOWTITE durante un período de 3 años muestran que el coeficiente de Colebrook-White es de 0,029 mm, lo que equivale a un coeficiente de Hazen-Williams de aproximadamente C=150.

Las figuras 3.11 y 3.12, en la página que sigue, sirven para calcular las pérdidas de carga asociadas al uso de tuberías FLOWTITE. Los valores estimados de pérdida de carga para los tipos de tubería que no figuran en dichos esquemas (debido a ligeras variaciones en el diámetro interior de la tubería) tendrán un margen de error del 7% como máximo para caudales de 1 a 3 m/s. Para obtener más información, consulte con su fabricante.



Nº de posición del cliente:
 Pedido fechado:
 Doc. no.: Cotización rápida
 Cantidad: 1

Número: ES 5736981
 Nº de artículo: 100
 Desede: 08/03/2018
 Página: 1 / 5

UPA 250C-150/3a UMA 200D 45/21
 Bomba sumergible

Versión nº.: 1

Datos de trabajo

Caudal bombeado requerido	185,44 m³/h	Corriente volumétrica	185,44 m³/h
Altura de bombeo requerida	63,43 m	Altura manométrica sin válvula anti-retorno.	63,81 m
Medio bombeado	agua, agua de mar y agua salobre agua de mar No contiene sustancias químicas o mecánicas que afecten a los materiales	Eficiencia sin válvula anti- retorno	82,2 %
Temperatura ambiente	20,0 °C	Absorción de potencia	40,28 kW
Temperatura del medio a bombear	21,0 °C	Potencia máxima de curva	40,50 kW
Densidad del fluido	1028 kg/m³	Mín.caudal permitido para funcionamiento estable continuo	65,01 m³/h
Viscosidad del medio a bombear	1,05 mm²/s	Mínimo caudal permitido para funcionamiento de corta duración	16,25 m³/h
altura lado aspiración con válvula anti-retorno	63,81 m	Altura de bombeo en el punto de caudal cero	96,79 m
Velocidad del caudal en torno al motor	0,2 m/s	Caudal máximo admisible Diseño	221,10 m³/h Bomba individual 1 x 100%

Ejecución

Bomba estándar	Bombas sumergibles	Mínimo nivel de fluido por encima de la bomba	0,50 m
Diseño	de acoplamiento directo	Válvula de no retorno	con
Orientación	Vertical	Filtro de aspiración	con
Descarga norma de conexión	P.f. seleccionar	Placa de válvula taladrada	no
Diám.nominal descarga	P.f. seleccionar	Tapa de aspiración	Sin
Presión nominal de descarga	P.f. seleccionar	Soporte de cojinete	Sin
Anillo rozante	Anillo partido / de rodadura	Máx.diámetro exterior	229,0 mm
Diámetro del rodete	160,0 mm	Longitud total de la unidad	2182,0 mm

Accionamiento, accesorios

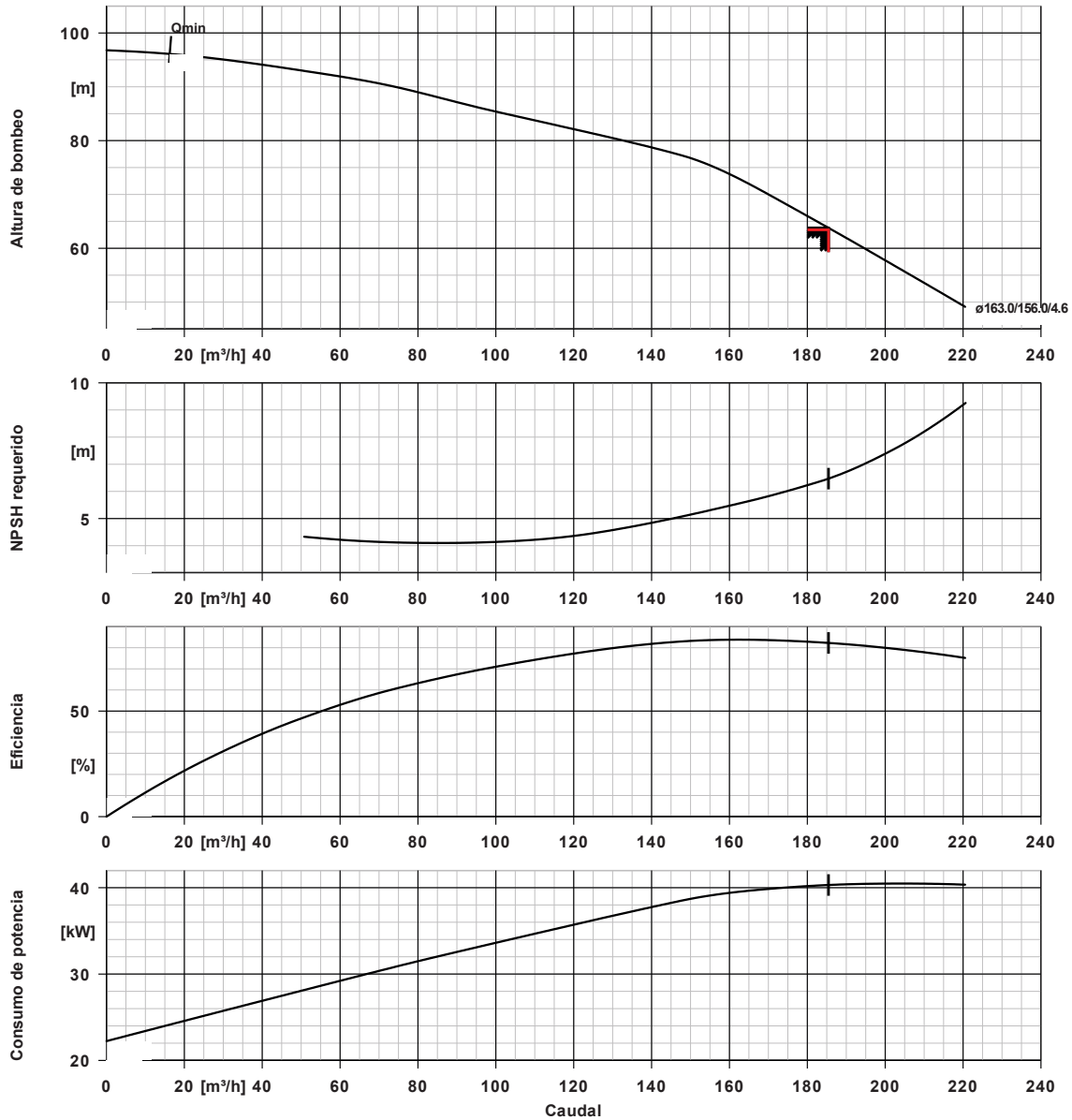
Tamaño del motor	200D	Tipo de corriente	Trifásico (3~)
Diseñado para trabajar con variador de frecuencia	no	Llenado agua potable	no
Velocidad del motor	2914 rpm	Bobinado J2	no
Frecuencia	50 Hz	Extensión cable	Conectar prolongador de cable en fábrica
Voltaje de régimen	400 V	Cable corto	F4
Potencia dimensionada P2	42,00 kW	Corte transversal con cable corto	10,00 mm²
Reserva disponible	11,11 %	Longitud de cable corto	6,00 m
Corriente de régimen	84,8 A	Diseñado con cables de prolongación para tipo de instalación libre de aire en contacto con superficies.	
Clase de protección del motor	IP68	Pantalla del cable	Sin
Coseno phi a plena carga (4/4)	0,83	Tipo de rosca	Sin
Rendimiento del motor a plena carga (4/4)	86,1 %		
Modo de arranque	Conexión directa		

Nº de posición del cliente:
 Pedido fechado:
 Doc. no.: Cotización rápida
 Cantidad: 1

Número: ES 5736981
 Nº de artículo:100
 Desede: 08/03/2018
 Página: 3 / 5

UPA 250C-150/3a UMA 200D 45/21
 Bomba sumergible

Versión nº.: 1



Datos de curvas

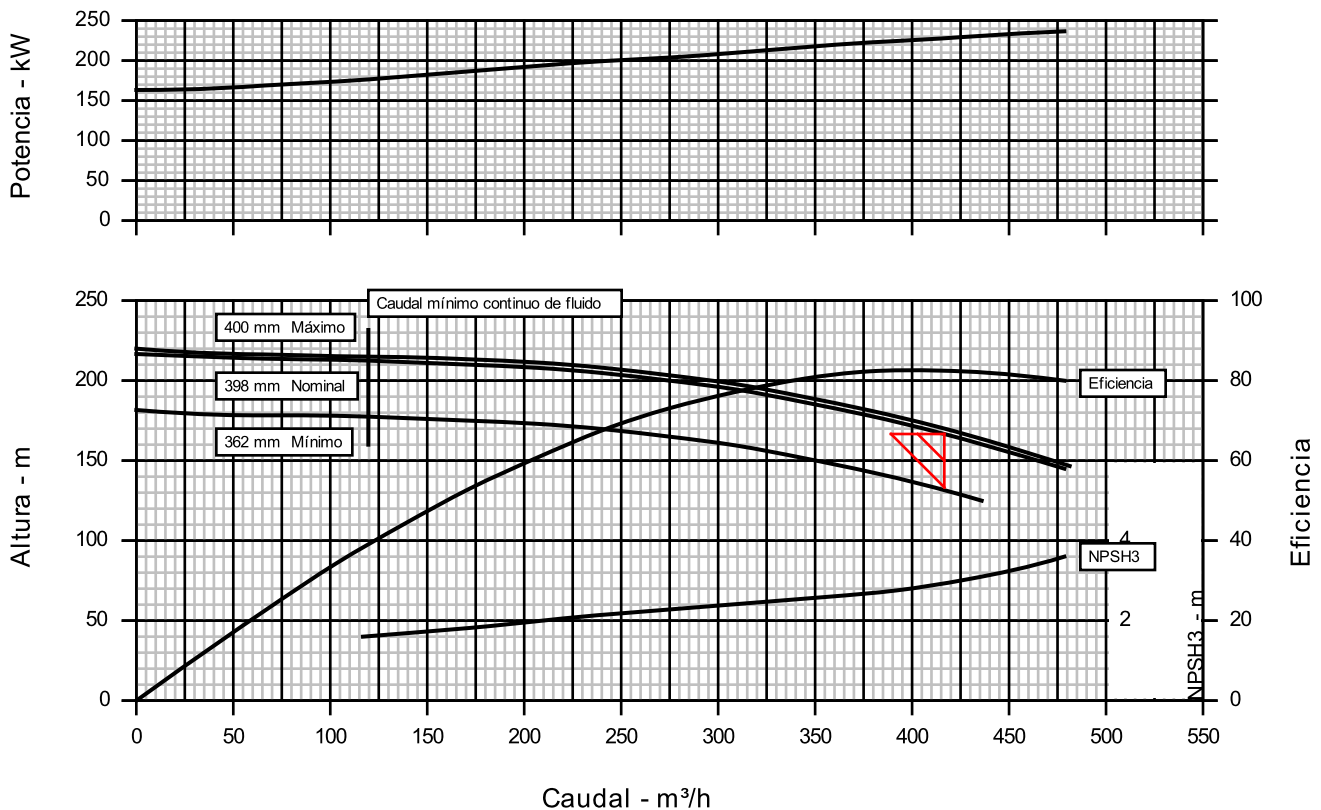
Velocidad de giro	2918 rpm	Altura manométrica sin válvula anti-retorno.	63,81 m
Densidad del fluido	1028 kg/m³	Eficiencia sin válvula anti-retorno	82,2 %
Viscosidad	1,05 mm²/s	Absorción de potencia	40,28 kW
Corriente volumétrica	185,44 m³/h	NPSH requerido	6,47 m
Caudal bombeado	185,44 m³/h	Número de curva	K3400.52.41/st3 Cr
Caudal requerido		Diámetro efectivo del rodete	160,0 mm
Altura de bombeo requerida	63,43 m		

Cliente	: Alberto Francisco	Bomba / Etapas	: 8X15WXH-DS / 3
Referencia del Cliente	:	No. de Curva de referencia	: 8X15WXHDS-2-1/-3-2
No. Item	: -	Referencia de Flowserve	: 1559344369
Servicio	:	Fecha	: 28 de junio de 2018

Condiciones de servicio		Materiales / Especificación	
Caudal (rated/normal)	: 417,2 m³/h / -	Código de materiales	: NN
Caudal (agua) (CQ=1,00)	: -	Especificación de bomba	: -
Altura	: 166,45 m	Otros requisitos	
Altura (agua) (CH=1,00)	: -	Selección Hidraulica	: Sin especificaciones
NPSHa /NPSHa menos el margen	: 10,4 m / -	Construccion	: Sin especificaciones
Máxima presión de aspiración	: 0,0 kPa.g	Test de tolerancia	: ANSI/HI 14.6 Grade 1B
Líquido		Selección motor	: MxPotencia(FlujoMin al Fin) utilizando SF
Tipo de líquido	: Otros		
Descripción del líquido	:		
Temperatura	: 21 °C		
Densidad / SG	: - / 1,000		
Tamaño Sólido - Actual/Límite	: 0,000 mm / 0,000 mm		
Viscosidad / Presión de vapor	: 1,00 cP / 0,00 kPa.a		

Datos de funcionamiento			
Potencia hidráulica	: 189 kW	Diametro de impulsor	
Velocidad de la bomba	: 1.790 rpm	Nominal	: 398 mm
Eficiencia total de la bomba (CE=1,00)	: 82,8 %	Máximo	: 400 mm
NPSH requerido (NPSH3)	: 2,9 m	Mínimo	: 362 mm
Potencia nominal	: 228 kW	Velocidad específica succión	: 0 (Metric units)
Potencia máxima	: 237 kW	Caudal mínimo continuo	: 119,9 m³/h
Potencia motor	: 350 hp / 261 kW	Altura máxima @ diámetro de diseño	: 216,33 m
Presion de trabajo de la carcasa	: 2.146,7 kPa.g	Caudal del Punto Effic max	: 405,5 m³/h
(basado en shut off @ diámetro máximo y SG de diseño)		Caudal nominal en % con respecto al punto E...	: 102,9 %
Máxima admisible	: 2.757,9 kPa.g	Eficiencia a caudal normal	: -
Presión de prueba hidrostática	: 4.136,9 kPa.g	Relacion entre diámetro nominal y máximo de...	: 99,5 %
Presión de diseño en la caja del alojamiento ...	: -	Incremento de altura H(Q=0)/ H(pto. Funcion...	: 30,0 %
		Rel. alturas (nom./dia.max) / (dia.max/nom.)	: 98,3 % / 101,7 %

LA BOMBA SE GARANTIZA PARA UNA CONDICION DE SERVICIO (CAUDAL ALTURA, Y RENDIMIENTO)

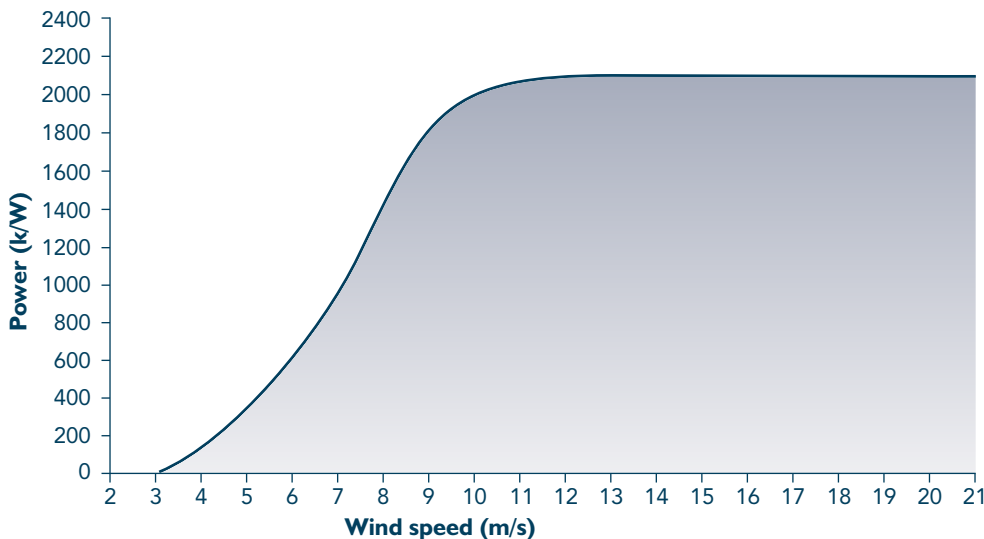


S111

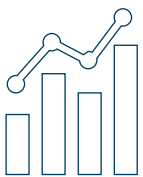
Suzlon boasts of a wide range within its 2.1 MW suite of products with varying rotor blade and tower heights suitable for all wind regimes. The S111 wind turbine has an impressive 111 rotor diameter, which can extract maximum power from available wind.

2.1 MW S111 wind turbine generator (WTG) uses the award winning lattice tubular technology to achieve an unprecedented hub height of 140 meters (equivalent to ~40 storey building). It is specially designed to optimally harness wind resources at higher altitudes.

POWER CURVE

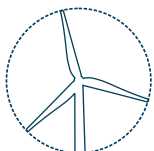


TECHNICAL SPECIFICATIONS



OPERATING DATA:

Wind class - IEC IIIA
Rated power - 2.1 MW
Cut-in wind speed - 3m/s
Rated wind speed - 12.5m/s
Cut-out wind speed - 21m/s



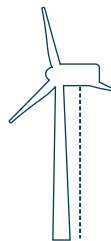
ROTOR:

Rotor diameter - 111.8m
Swept area - 9,852sq m



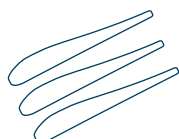
GENERATOR:

Frequency - 50Hz Type
Asynchronous - 3 phase induction generator with slip rings operated with rotor circuit inverter system (DFIG)



TOWER:

Hub heights - 90m | 120m | 140m
Type - Steel tubular | Hybrid lattice



BLADE:

Make - Suzlon SB54

Universidad de La Laguna
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
Grado en Ingeniería Mecánica

PLANOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DE UNA ESTACIÓN DESALADORA DE AGUA DE MAR
ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA CON APOYO EN RED PARA
EL ABASTECIMIENTO PARCIAL DE LA POBLACIÓN DEL VALLE DE
GÜÍMAR EN TENERIFE

Autor: Alberto Antonio Francisco Rodríguez

Tutor: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE

1. Planos	4
1.1. Plano 1: Situación	5
1.2. Plano 2: Emplazamiento	6

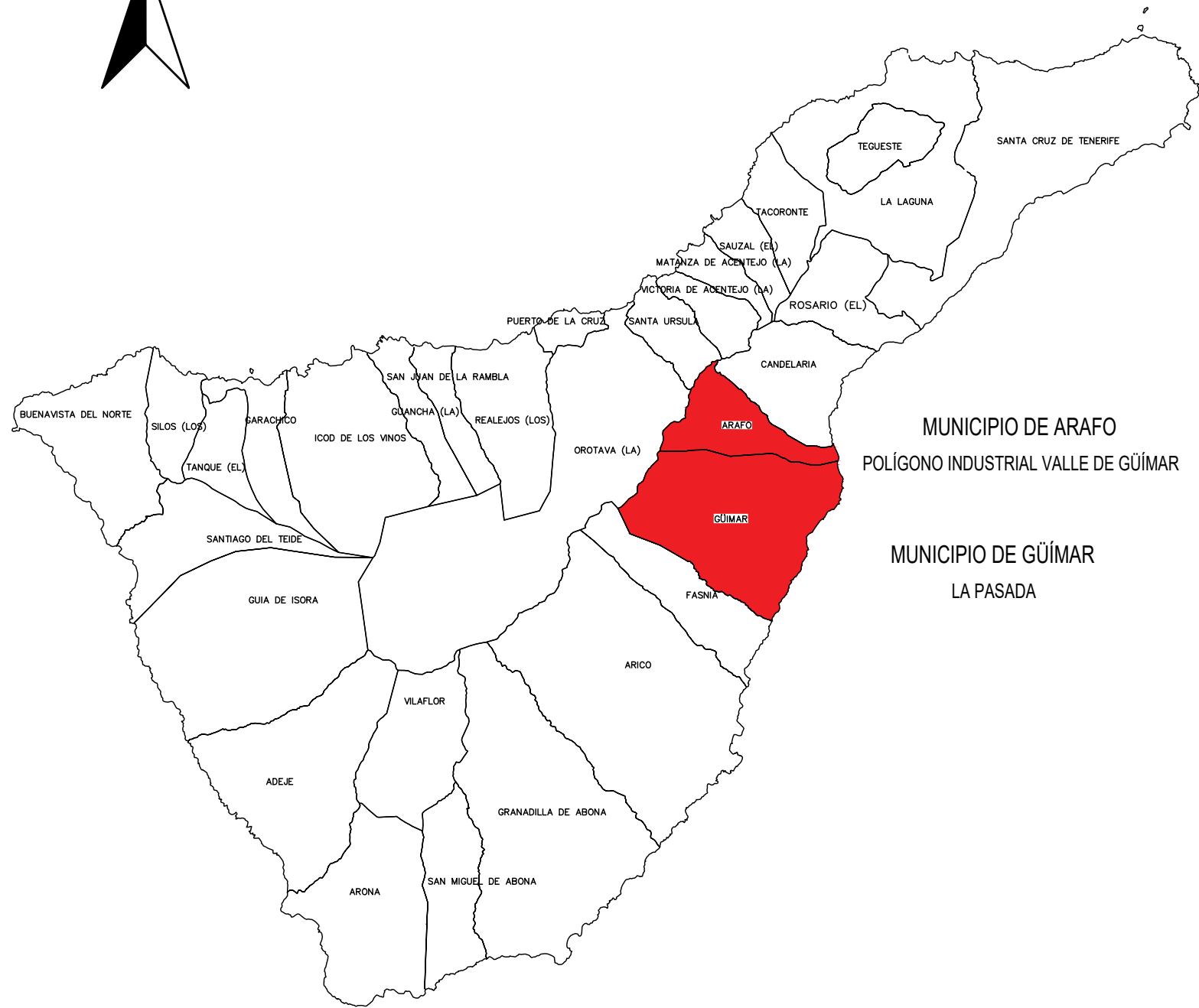
1. PLANOS

En el presente documento se recogen los planos de situación y emplazamiento de la estación desaladora de agua de mar, así como de los pozos de captación, depósito de cabecera y los dos aerogeneradores con los que se abastece energéticamente.

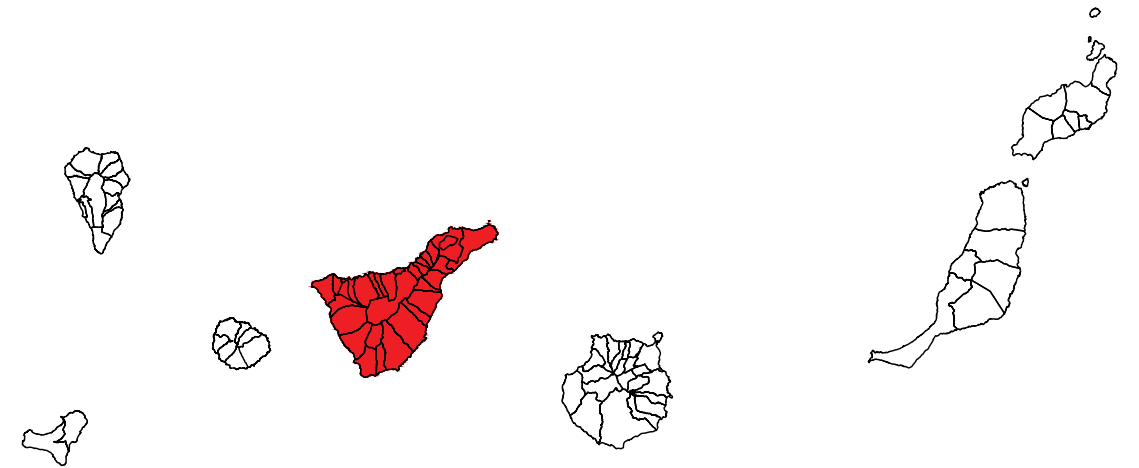
1.1 PLANO Nº1: SITUACIÓN

1.2 PLANO Nº2: EMPLAZAMIENTO


N

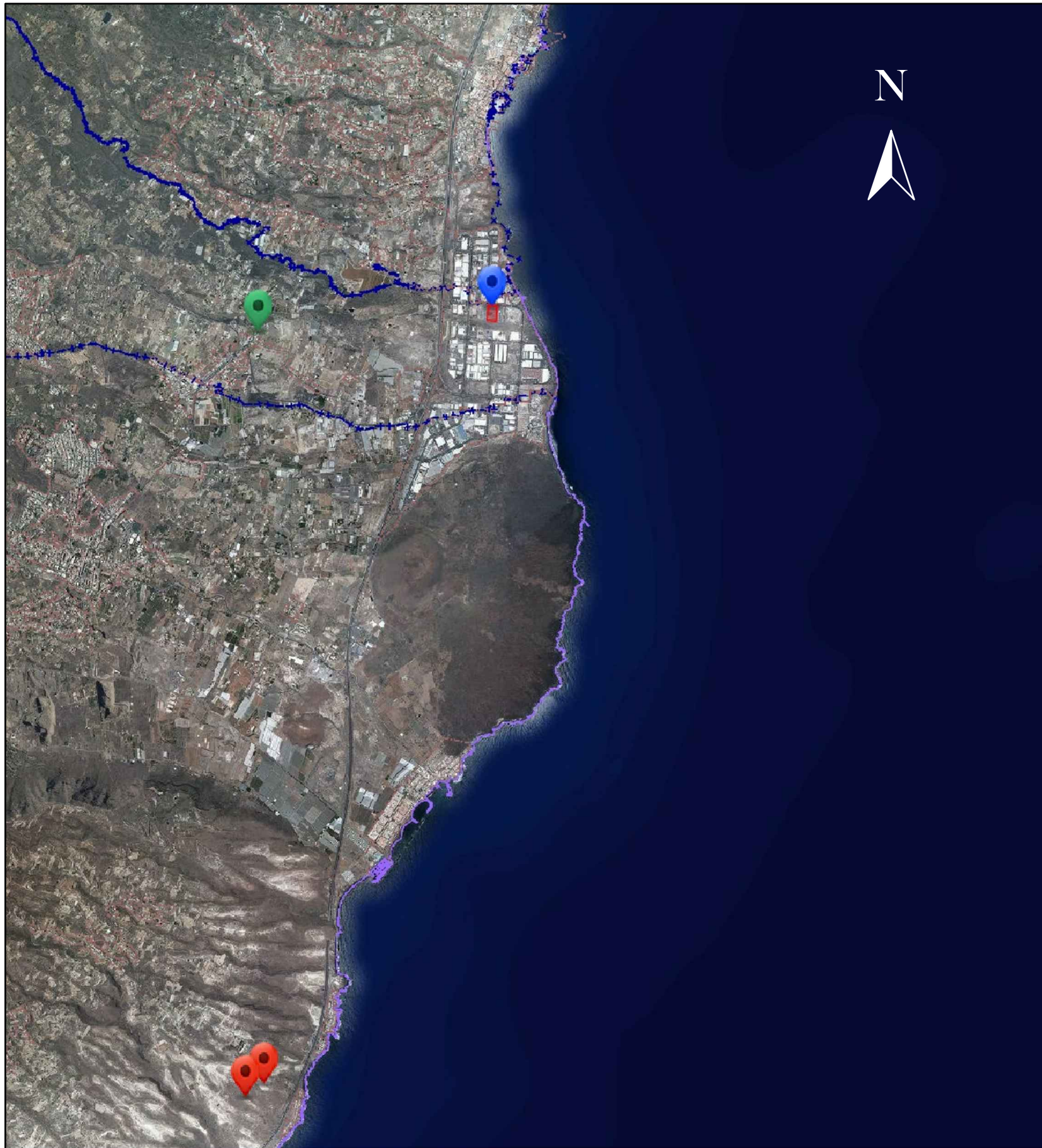


TENERIFE



ISLAS CANARIAS

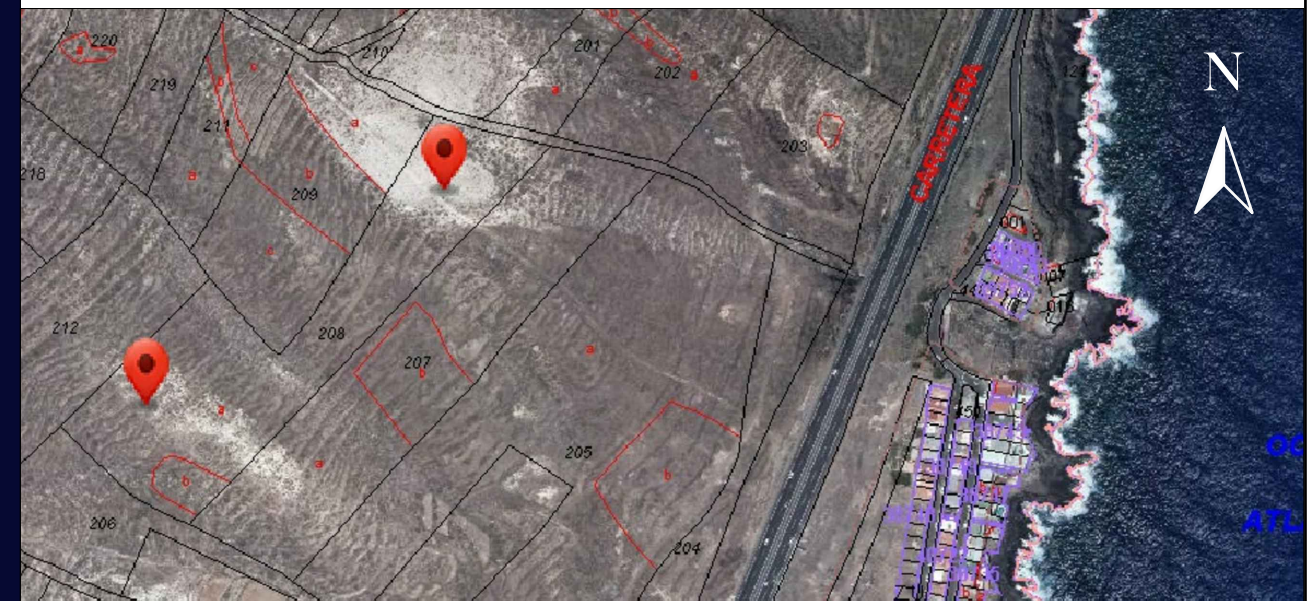
ESTUDIO DE UNA ESTACIÓN DESALADORA DE AGUA DE MAR ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA CON APOYO EN RED PARA EL ABASTECIMIENTO PARCIAL DE LA POBLACIÓN DEL VALLE DE GÜÍMAR EN TENERIFE			
<i>Dibujado</i>	Alberto A. Francisco Rodríguez	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA <i>Grado en Ingeniería Mecánica</i>
<i>Fecha</i>	10/08/18		
<i>Id. s. normas</i>	UNE-EN-DIN		
ESCALA: S/E	SITUACIÓN		Nº PLANO: 1



E: 1:50000







E: 1:5000



E: 1:5000

ESTUDIO DE UNA ESTACIÓN DESALADORA DE AGUA DE MAR ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA CON APOYO EN RED PARA EL ABASTECIMIENTO PARCIAL DE LA POBLACIÓN DEL VALLE DE GÜIMAR EN TENERIFE

<i>Dibujado</i>	Alberto A. Francisco Rodríguez	 Universidad de La Laguna ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA <i>Grado en Ingeniería Mecánica</i>	
<i>Fecha</i>	10/08/18		
<i>Id. s. normas</i>	UNE-EN-DIN		
ESCALA:	EMPLAZAMIENTO		Nº PLANO: 2

-  Aerogenerador
-  Depósito de cabecera
-  EDAM
-  Pozo de captación