



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

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

**DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA
ALIMENTADA POR ENERGÍAS RENOVABLES**

Autor: Alexander Hernández García

Tutor: Vicente José Romero Ternero



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

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ÍNDICE GENERAL

ABREVIADO

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

**DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA
ALIMENTADA POR ENERGÍAS RENOVABLES**

Autor: Alexander Hernández García

Tutor: Vicente José Romero Terne

ÍNDICE GENERAL ABREVIADO

- **Memoria**
- **Anexo I:** Conceptos teóricos básicos de la desalación mediante ósmosis inversa y de la energía eólica
- **Anexo II:** Estudio de alternativas de emplazamiento en Canarias
- **Anexo III:** Dimensionado del bastidor de membranas y tratamientos del agua
- **Anexo IV:** Dimensionado de los sistemas de captación, distribución y rechazo de salmuera
- **Anexo V:** Dimensionado del sistema de bombeo
- **Anexo VI:** Selección de bombas disponibles en el mercado
- **Anexo VII:** Dimensionado del sistema de abastecimiento de energía
- **Anexo VIII:** Fichas técnicas



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

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ÍNDICE GENERAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

**DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA
ALIMENTADA POR ENERGÍAS RENOVABLES**

Autor: Alexander Hernández García

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Memoria

1. Objeto	1
1.1 Abstract.....	1
2. Alcance.....	2
3. Antecedentes	4
3.1 Análisis de las necesidades hídricas en las islas Canarias	4
3.1.2 Balance hidráulico en la isla de Gran Canaria	6
3.1.3 Balance hidráulico en la isla de Fuerteventura	8
3.1.4 Balance hidráulico en la isla de Lanzarote.....	10
3.1.5 Balance hidráulico en la isla de El Hierro.....	11
3.1.6 Balance hidráulico en la isla de La Gomera.....	12
3.1.7 Balance hidráulico en la isla de La Palma.....	13
3.1.8 Conclusiones del análisis de necesidades hídricas en Canarias.....	14
3.2 Análisis general del recurso eólico en Canarias	15
3.2.1 Análisis del principal recurso eólico en Gran Canaria.....	17
3.2.2 Análisis del principal recurso eólico en Fuerteventura	18
3.2.3 Análisis del principal recurso eólico en Lanzarote	18
3.2.4 Conclusiones del análisis general del recurso eólico.....	19
3.3 Proximidad de otras EDAM.....	19
3.3.1 Lista de EDAM de mediana y gran capacidad en Gran Canaria	20
3.3.2 Lista de EDAM de mediana y gran capacidad en Fuerteventura.....	22
3.3.3 Lista de EDAM de mediana y gran capacidad en Lanzarote	23
4. Normas y referencias.....	24
4.1 Normativa.....	24
4.2 Bibliografía:	24
4.3 Programas de cálculo y herramientas empleadas	25
4.4 Otras referencias	26

5. Definiciones y abreviaturas.....	28
5.1 Definiciones.....	28
5.2 Abreviaturas	29
6. Requisitos de diseño	31
6.1 Requisitos del cliente	31
6.2 Situación y emplazamiento.....	31
6.3 Capacidad de producción de la EDAM	33
6.4 Temperatura del agua de captación.....	33
6.5 Composición del agua de captación.....	36
6.6 Límites en la composición del agua de captación para consumo humano	39
6.7 Recomendaciones del fabricante.....	42
7. Análisis de soluciones	44
7.1 Ubicación.....	44
7.2 Capacidad de producción	48
7.3 Configuración del bastidor de membranas.....	49
7.4 Pretratamiento y postratamiento del agua	56
7.5 Sistema de captación	58
7.6 Sistema de distribución	59
7.7 Sistema de rechazo de salmuera	62
7.8 Sistema de bombeo	62
7.9 Consumo de energía total de la instalación.....	66
7.10 Sistema de abastecimiento energético.....	66
8. Resultados finales	70
8.1 Ubicación.....	70
8.2 Capacidad de producción	71
8.3 Configuración del bastidor de membranas.....	71
8.4 Pretratamiento y postratamiento del agua	72

8.5 Sistema de captación	73
8.6 Sistema de distribución	73
8.7 Sistema de rechazo de salmuera	74
8.8 Sistema de bombeo	74
8.9 Consumo de energía total de la instalación	74
8.10 Sistema de abastecimiento energético.....	75
9. Conclusiones	76
9.1 Conclusions.....	77

Anexo I – Conceptos teóricos básicos de la desalación mediante ósmosis inversa y de la energía eólica

1. ¿Qué es la ósmosis inversa (OI)?	1
1.1 Aplicaciones de la OI	1
1.2 Funcionamiento de la OI	1
1.3 Membrana de OI	2
1.4 Principales parámetros que definen el proceso de OI	6
1.4.1 Caudal	6
1.4.2 Flujo de permeado	6
1.4.3 Rechazo de sales	7
1.4.4 Conversión	7
1.4.5 Caída de presión	7
1.4.6 Presión transmembrana	7
2. ¿De qué maneras se puede configurar un sistema OI?	8
2.1 Configuración básica	8
2.2 Otras configuraciones	8
2.2.1 Simple etapa o múltiples etapas	8
2.2.2 Un paso o dos pasos	9
2.2.3 Con recirculación o no del permeado	10
2.2.4 Con mezcla o no del agua de alimentación con el permeado	11
2.2.5 Tabla resumen	11
2.3 Ecuaciones básicas que rigen el diseño	12
2.3.1 Flujo de permeado	12
2.3.2 Flujo de soluto	13
2.3.3 Rechazo y paso de sales	13
2.3.4 Correlación entre las condiciones de operación y las prestaciones	14
3. ¿Qué tratamientos se le aplican al agua?	14

3.1 Pretratamiento	14
3.1.1 Concepto de ensuciamiento (<i>fouling</i>).....	15
3.1.2 Parámetro SDI.....	17
3.1.3 Turbidez.....	17
3.1.4 Parámetro TDS	18
3.1.5 Conductividad.....	18
3.1.6 Concepto de ensuciamiento biológico.....	19
3.1.7 Concepto de incrustación (scaling)	21
3.1.8 Parámetro LSI	23
3.1.9 Parámetro SDSI	24
3.1.10 Microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración.....	24
3.1.12 Resumen de las posibles opciones de diseño del pretratamiento	27
3.2 Postratamiento	28
3.2.1 Ajuste de pH:.....	28
3.2.2 Desionización	29
3.2.3 Remineralización.....	29
3.2.4 Esterilización	29
3.2.5 Control de olor, color y sabor	30
4. ¿De qué otras maneras se puede desalar el agua?	30
4.1 Otros métodos de desalación mediante membranas	30
4.1.1 Electrodialisis	30
4.1 Desalación mediante la evaporación del agua	32
4.1.1 Evaporación instantánea multietapa (MSF)	32
4.1.2 Destilación multiefecto (MEF)	33
4.1.3 Compresión de vapor	34
5. ¿Qué son los dispositivos de recuperación de energía?	35
5.1 Descripción general	35
5.2 Turbina Francis	36

5.3 Turbina Pelton	36
5.4 Turbocharger	36
5.5 Intercambiador de presión isobárico	37
6. ¿Qué es la energía eólica?	39
6.1 Descripción de la energía eólica	39
6.2 Ventajas e inconvenientes de la energía eólica	39
6.2.1 Ventajas	39
6.2.2 Inconvenientes	39
6.3 El aerogenerador	40
6.4 Conceptos teóricos básicos	42
6.4.1 Distribución de Weibull	42
6.4.2 Límite de Betz	42
6.4.3 Coeficiente de potencia	42
6.4.4 Factor de carga	43
6.4.5 Clase de un aerogenerador en función del régimen de viento	43

Anexo II: Estudio de alternativas de emplazamiento en Canarias

1. Estudio de alternativas en Gran Canaria	1
1.1 Filtrado de zonas naturales protegidas	1
1.2 Filtrado de recurso eólico aceptable	2
1.3 Filtrado según la proximidad a otras EDAM	3
1.4 Filtrado según la ordenación del territorio.....	3
1.5 Búsqueda de potenciales alternativas de ubicación.....	3
1.5.1 Alternativa 1 (descartada)	4
1.5.2 Alternativa 2 (seleccionada)	4
1.5.3 Alternativa 3 (descartada)	11
2. Estudio de alternativas en Fuerteventura	12
2.1 Filtrado de zonas naturales protegidas	12
2.2 Filtrado de zonas con recurso eólico aceptable.....	12
2.3 Filtrado según la proximidad a otras EDAM	13
2.4 Filtrado según la ordenación del territorio.....	14
2.5 Estudio de alternativas en Fuerteventura	14
2.5.1 Alternativa 4 (descartada)	14
2.5.2 Alternativa 5 (descartada)	15
2.5.3 Alternativa 6 (seleccionada)	15
3. Estudio de alternativas en Lanzarote	22
3.1 Filtrado de zonas naturales protegidas	22
3.2 Filtrado de zonas con recurso eólico aceptable.....	22
3.3 Filtrado según la proximidad a otras EDAM	23
3.4 Filtrado según la ordenación del territorio.....	23
3.5 Estudio de alternativas en Lanzarote	24
3.5.1 Alternativa 7	24
4. Resumen de alternativas seleccionadas y solución final...	25

Anexo III: Dimensionado del bastidor de membranas y tratamientos del agua

1. Selección del fabricante de membranas	1
1.1 Introducción	1
1.2 Análisis del catálogo de membranas disponible.....	2
2. Predimensionado del bastidor de membranas mediante LewaPlus.....	4
2.1 Introducción	4
2.2 Parámetros conocidos	4
2.2.1 Caudal de permeado y características del agua de captación	4
2.2.2 Valor del pH de alimentación	5
2.2.3 Edad de la membrana	5
2.2.4 Disminución de flujo por año	6
2.2.5 Incremento de paso de sales por año	6
2.2.6 Flujo de permeado y número total de elementos.....	6
2.2.7 Número de etapas	7
2.2.8 Número de pasos	8
2.2.9 Sistema de recuperación de energía.	9
2.2.10 Resumen de los parámetros fijados.....	9
2.3 Parámetros supuestos	10
2.3.1 Respecto al dispositivo de recuperación de energía (ERD)	10
2.3.2 Respecto a la bomba booster (o de circulación):.....	10
2.3.3 Respecto a las bombas de alimentación (BAP):.....	11
2.4 Parámetros iterados	12
2.4.1 Modelo de membranas (440HF, 440HR, 400HF ó 400HR).	12
2.4.2 Número total de tubos de presión y su configuración (6 ó 7 membranas por tubo de presión).	12
2.4.3 Conversión (40-50%).	13

2.5 Criterio de diseño prioritario para los casos de estudio	14
2.6 Resultados obtenidos	14
2.7 Discusión de resultados	19
3. Recuperación de energía	20
3.1 Introducción	20
3.2 Fabricante Energy Recovery	21
3.2.1 Parámetros fijados	21
3.2.2 Parámetros supuestos	22
3.2.3 Parámetros seleccionados	22
3.2.4 Resultados obtenidos	23
3.3 Fabricante Danfoss	27
3.3.1 Parámetros conocidos.....	27
3.3.2 Parámetros supuestos:	27
3.3.3 Parámetros seleccionados:	27
3.3.3 Comparación de resultados entre Energy Recovery y Danfoss	28
4. Dimensionamiento del pretratamiento y postratamiento del agua.....	29
4.1 Pretratamiento físico	29
4.2 Pretratamiento químico	29
4.3 Postratamiento	33

Anexo IV: Dimensionado de los sistemas de captación, distribución y rechazo de salmuera

1. Dimensionamiento del sistema de captación 1

 1.1 Tipo de captación 1

 1.2 Dimensionamiento de los pozos de captación 2

2. Dimensionamiento del sistema de rechazo de salmuera 6

 2.1 Posibles opciones de gestión de la salmuera 6

 2.2 Dimensionamiento del emisario submarino 6

3. Dimensionamiento del sistema de distribución..... 8

 3.1 Dimensionamiento del pozo de regulación..... 8

 3.2 Dimensionamiento de las tuberías..... 14

 3.2.1 Material y fabricante de las tuberías 14

 3.2.2 Diámetro de las tuberías 14

 3.2.3 Longitud mínima de las tuberías 17

 3.2.5 Cálculo de pérdidas de carga en tuberías..... 18

Anexo V: Dimensionado del sistema de bombeo

1. Introducción	1
2. Obtención del caudal a impulsar	2
3. Cálculo de la altura útil.....	4
3.1 Ecuación de Bernoulli	4
3.1.1 Principales cotas, velocidades y pérdidas de carga.....	5
3.2 Bomba de alimentación:	7
3.3 Bomba de alta presión:	8
3.4 Bomba Booster	9
3.5 Bomba de distribución	10
3.6 Bomba de postratamiento.....	10
3.7 Bomba de rechazo	11
3.8 Resultados y conclusiones.....	12
4. Cálculo de la altura neta de aspiración disponible (NPSHd)14	
4.1 Ecuación aplicada.....	14
4.2 Bomba de alimentación.....	16
4.3 Bomba de alta presión	16
4.4 Bomba de distribución	17
4.5 Bomba Booster	17
4.6 Bomba de postratamiento.....	18
4.7 Resultados finales y conclusión	18

Anexo VI: Selección de bombas disponibles en el mercado

1. Introducción	1
2. Selección de la bomba de alimentación	2
2.1 Mejor opción del fabricante Flowserve.....	2
2.2 Mejor opción del fabricante Grundfos	3
2.3 Mejor opción del fabricante KSB.....	4
2.4 Mejor opción del fabricante Lowara.....	5
2.5 Mejor opción del fabricante Sulzer	6
2.6 Mejor opción del fabricante Wilo.....	7
2.7 Selección final de la bomba de alimentación.....	8
3. Selección de la bomba de distribución	9
3.1 Mejor opción del fabricante Flowserve.....	9
3.2 Mejor opción del fabricante Grundfos	10
3.3 Mejor opción del fabricante KSB.....	11
3.4 Mejor opción del fabricante Lowara.....	12
3.5 Mejor opción del fabricante Sulzer	13
3.6 Mejor opción del fabricante Wilo.....	14
3.7 Selección final de la bomba de distribución	15
4. Selección de la bomba de alta presión	16
4.1 Mejor opción del fabricante Flowserve.....	16
4.2 Mejor opción del fabricante Grundfos	17
4.3 Mejor opción del fabricante KSB.....	18
4.4 Mejor opción del fabricante Lowara.....	19
4.5 Mejor opción del fabricante Sulzer	20
4.6 Mejor opción del fabricante Wilo.....	21
4.7 Selección final de la bomba de alta presión	22

5. Selección de la bomba Booster	23
5.1 Mejor opción del fabricante Flowserve.....	23
5.2 Mejor opción del fabricante Grundfos	24
5.3 Mejor opción del fabricante KSB.....	25
5.4 Mejor opción del fabricante Lowara.....	26
5.5 Mejor opción del fabricante Sulzer	27
5.6 Mejor opción del fabricante Wilo.....	28
5.7 Selección final de la bomba booster.....	29
6. Selección de la bomba de postratamiento	30
6.1 Mejor opción del fabricante Flowserve.....	30
6.2 Mejor opción del fabricante Grundfos	31
6.3 Mejor opción del fabricante KSB.....	32
6.4 Mejor opción del fabricante Lowara.....	33
6.5 Mejor opción del fabricante Sulzer	34
6.6 Mejor opción del fabricante Wilo.....	35
6.7 Selección final de la bomba de postratamiento.....	36
7. Resumen de bombas seleccionadas	37

Anexo VII: Dimensionado del sistema de abastecimiento de energía

1. Justificación del empleo de un parque eólico como sistema de abastecimiento de energía	1
2. Consumo de energía final de la EDAM	1
3. Estudio del recurso eólico	3
3.1 Distribución de Weibull	3
3.2 Orientación del aerogenerador.....	5
2.3 Curva de potencia	7
4. Selección de aerogeneradores actualmente disponibles en el mercado.....	8
4.1 Lista completa de los modelos disponibles según ITC	8
4.2 Análisis de los modelos actualmente disponibles en el mercado.....	11
4.2.1 Potencia nominal	11
4.2.2 Energía generada anual.....	12
4.2.3 Comparación por exceso energético respecto a EDAM	15
4.3.4 Comparación por factor de carga	16
4.3.5 Discusión de resultados y selección final.....	17
4.3.6 Comprobación de cumplimiento de normativa	18
4.3.7 Características del modelo de aerogenerador seleccionado	19
5. Posibles vías de aprovechamiento del exceso energético ..	22
5.1 Vender exceso energético a la red	23
5.2 Generación de hidrógeno	23
5.3 Bombeo hidráulico	23
5.4 Aire comprimido	23
5.4 Disipación de energía.....	24

Anexo VIII: Fichas técnicas

Según su orden de visualización, los documentos incluidos son:

- 1. Informe final del software de dimensionamiento del bastidor de membranas (LewaPlus)**
- 2. Ficha técnica compacta del modelo de membrana seleccionado**
- 3. Ficha técnica compacta de la bomba de alimentación seleccionada**
- 4. Ficha técnica compacta de la bomba de alta presión seleccionada**
- 5. Ficha técnica compacta de la bomba de distribución seleccionada**
- 6. Ficha técnica compacta de la bomba Booster seleccionada**
- 7. Ficha técnica compacta de la bomba de postratamiento seleccionada**
- 8. Ficha técnica del modelo del dispositivo de recuperación de energía seleccionado**
- 9. Ficha técnica del modelo de aerogenerador seleccionado**
- 10. Informe de estimación de costes según LewaPlus**



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

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

MEMORIA

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

**DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA
ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES**

Autor: Alexander Hernández García

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Hoja de identificación

TÍTULO DEL PROYECTO

Dimensionado de una instalación de ósmosis inversa alimentada mediante energías renovables.

DATOS DEL PETICIONARIO

RAZÓN SOCIAL: Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología (ETSI), Universidad de la Laguna.

DIRECCIÓN: Camino San Francisco de Paula, S/N. Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología. C.P 38200. San Cristóbal de La Laguna, Tenerife, España.

CONTACTO:

TELÉFONO: (+34) 922 31 83 09

EMAIL: esit@ull.es

DATOS DEL AUTOR

NOMBRE: Alexander Hernández García

DNI: 43835123K

CONTACTO:

EMAIL: alu0100901283@ull.edu.es

DATOS DEL TUTOR

NOMBRE: Vicente José Romero Ternero

FECHA

Julio 2020

Índice de contenidos

1. Objeto	1
1.1 Abstract.....	1
2. Alcance.....	2
3. Antecedentes	4
3.1 Análisis de las necesidades hídricas en las islas Canarias	4
3.1.2 Balance hidráulico en la isla de Gran Canaria	6
3.1.3 Balance hidráulico en la isla de Fuerteventura	8
3.1.4 Balance hidráulico en la isla de Lanzarote.....	10
3.1.5 Balance hidráulico en la isla de El Hierro.....	11
3.1.6 Balance hidráulico en la isla de La Gomera.....	12
3.1.7 Balance hidráulico en la isla de La Palma.....	13
3.1.8 Conclusiones del análisis de necesidades hídricas en Canarias.....	14
3.2 Análisis general del recurso eólico en Canarias	15
3.2.1 Análisis del principal recurso eólico en Gran Canaria.....	17
3.2.2 Análisis del principal recurso eólico en Fuerteventura	18
3.2.3 Análisis del principal recurso eólico en Lanzarote	18
3.2.4 Conclusiones del análisis general del recurso eólico.....	19
3.3 Proximidad de otras EDAM.....	19
3.3.1 Lista de EDAM de mediana y gran capacidad en Gran Canaria	20
3.3.2 Lista de EDAM de mediana y gran capacidad en Fuerteventura.....	22
3.3.3 Lista de EDAM de mediana y gran capacidad en Lanzarote	23
4. Normas y referencias.....	24
4.1 Normativa.....	24
4.2 Bibliografía:	24
4.3 Programas de cálculo y herramientas empleadas	25
4.4 Otras referencias	26

5. Definiciones y abreviaturas.....	28
5.1 Definiciones.....	28
5.2 Abreviaturas	29
6. Requisitos de diseño	31
6.1 Requisitos del cliente	31
6.2 Situación y emplazamiento.....	31
6.3 Capacidad de producción de la EDAM	33
6.4 Temperatura del agua de captación.....	33
6.5 Composición del agua de captación.....	36
6.6 Límites en la composición del agua de captación para consumo humano	39
6.7 Recomendaciones del fabricante.....	42
7. Análisis de soluciones	44
7.1 Ubicación.....	44
7.2 Capacidad de producción	48
7.3 Configuración del bastidor de membranas.....	49
7.4 Pretratamiento y postratamiento del agua	56
7.5 Sistema de captación	58
7.6 Sistema de distribución	59
7.7 Sistema de rechazo de salmuera	62
7.8 Sistema de bombeo	62
7.9 Consumo de energía total de la instalación.....	66
7.10 Sistema de abastecimiento energético.....	66
8. Resultados finales	70
8.1 Ubicación.....	70
8.2 Capacidad de producción	71
8.3 Configuración del bastidor de membranas.....	71

8.4 Pretratamiento y postratamiento del agua	72
8.5 Sistema de captación	73
8.6 Sistema de distribución	73
8.7 Sistema de rechazo de salmuera	74
8.8 Sistema de bombeo	74
8.9 Consumo de energía total de la instalación.....	74
8.10 Sistema de abastecimiento energético.....	75
9. Conclusiones	76
9.1 Conclusiones.....	77

Índice de figuras

Figura 3.1: Balance hidráulico del año 2016 para la isla de Tenerife. Fuente: PHT (tercer ciclo)	5
Figura 3.2: Balance hidráulico del año 2017 para la isla de Gran Canaria. Fuente: PHGC (tercer ciclo)	6
Figura 3.3: Evolución del volumen de agua desalada anual para la isla de Gran Canaria. Fuente: PHGC (tercer ciclo)	7
Figura 3.4: Evolución de los volúmenes de agua aprovechados en Canarias. Fuente: Custodio (2011)	7
Figura 3.5: Déficit de recursos hídricos naturales para la isla de Gran Canaria. Fuente: PHGC (tercer ciclo)	8
Figura 3.6: Distribución porcentual de los recursos hídricos para la isla de Fuerteventura. Fuente: PHF (tercer ciclo)	9
Figura 3.7: Balance hidráulico del año 2018 para la isla de Lanzarote. Fuente: PHL (tercer ciclo)	10
Figura 3.8: Déficit de recursos hídricos naturales frente a las demandas. Fuente: Centro de Datos del Cabildo Insular de Lanzarote, 2019.	11
Figura 3.9: Balance hidráulico para la isla de El Hierro (2015). Fuente: PHH (segundo ciclo)	11
Figura 3.10: Proyección del balance hidráulico para 2027 en la isla de El Hierro. Fuente: PHH (segundo ciclo)	12

Figura 3.11: Ciclo integral de los recursos hídricos para la isla de La Gomera (2017). Fuente: PHG (segundo ciclo)	13
Figura 3.12: Balance hidrológico para la isla de La Palma (2017). Fuente: PHLP (segundo ciclo)	14
Figura 3.13: Mapa de velocidades del viento a 80m en Canarias. Fuente: IDAE	16
Figura 3.14: Red Canaria de los Espacios Naturales Protegidos. Fuente: Gobierno de Canarias	16
Figura 3.15: Leyenda del código de colores para el mapa eólico. Fuente: Grafcan	17
Figura 3.16: Principal recurso eólico en Gran Canaria. Fuente: Grafcan	17
Figura 3.17: Principal recurso eólico en Fuerteventura. Fuente: Grafcan	18
Figura 3.18: Principal recurso eólico en Fuerteventura. Fuente: Grafcan	18
Figura 3.19: Ubicación de las principales desaladoras en Gran Canaria. Elaboración propia.	21
Figura 3.20: Ubicación de las principales desaladoras en Gran Canaria. Fuente: FCCA (2013)	22
Figura 3.21: Principales EDAM mediante OI en Lanzarote. Fuente: FCCA (2013)	23
Figura 6.1: Alternativa finalmente seleccionada. Fuente: Grafcan	31
Figura 6.2: Suelo urbanizable en la alternativa finalmente seleccionada. Fuente: Grafcan	32
Figura 6.3: Pozos, desaladora y parque eólico ubicados en el terreno. Fuente: Grafcan	32
Figura 6.4: Boya de Gran Canaria. Fuente: Puertos del Estado	33
Figura 6.5: Análisis de agua introducido en el software. Fuente: LewaPlus	38
Figura 6.6: Intervalos de referencia de la composición del agua de mar. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)	38
Figura 7.1: Alternativa 1 (Gran Canaria). Fuente: Grafcan	45
Figura 7.2: Alternativa 2 (Gran Canaria). Fuente: Grafcan	45
Figura 7.3: Alternativa 3 (Gran Canaria). Fuente: Grafcan	45

Figura 7.4: Alternativa 4 (Fuerteventura). Fuente: Grafcan	46
Figura 7.5: Alternativa 5 (Fuerteventura). Fuente: Grafcan	46
Figura 7.6: Alternativa 6 (Fuerteventura). Fuente: Grafcan	46
Figura 7.7: Alternativa 7 (Lanzarote). Fuente: Grafcan	47
Figura 7.8: Suelo urbanizable en la alternativa finalmente seleccionada. Fuente: Grafcan	48
Figura 7.9: Pozos, desaladora y parque eólico ubicados en el terreno. Fuente: Grafcan	48
Figura 7.10: Población en Gáldar capital. Fuente: citypopulation.de	49
Figura 7.11: Composición del permeado previamente a la corrección del pH. Fuente: Lewaplust	54
Figura 7.12: Composición del permeado tras la corrección del pH. Fuente: Lewaplust	54
Figura 7.13: Datos introducidos para el dimensionamiento del ERD. Fuente: Energy Recovery	55
Figura 7.14: Datos introducidos para el dimensionamiento del ERD. Fuente: Danfoss	55
Figura 7.15: Postratamiento estándar. Fuente: LewaPlus	57
Figura 7.16: Disposición de los pozos de captación. Elaboración propia	58
Figura 7.17: Esquema de los factores determinantes para la profundidad del pozo. Elaboración propia	58
Figura 7.18: Cota máxima en Gáldar capital. Fuente: Goolzoom	59
Figura 7.19: Ubicación exacta del depósito regulador en el terreno. Fuente: Grafcan	60
Figuras 7.20: Ordenación del territorio en Pico de Gáldar. Fuente: Grafcan	60
Figura 7.21: Longitud y profundidad necesarias para el emisario submarino. Fuente: Grafcan	62
Figura 7.22: Esquema simplificado del sistema de bombeo. Elaboración propia	63
Figura 7.23: Fabricantes consultados. Fuente: Flowserve, Grundfos, KSB, Lowara, Sulzer y Wilo	64

Figura 7.24 y 7.25: Distancia de los aerogeneradores entre sí (izq) y respecto al núcleo habitado más cercano (dcha), Fuente: Grafcan	69
Figuras 8.1 y 8.2: Región urbanizable seleccionada (izq) y ubicación exacta (dcha) Fuente: Grafcan	70
Figuras 8.3 y 8.4: Representación topográfica (izq.) y ubicación exacta (dcha). Fuente: Grafcan	70

Índice de tablas

Tabla 3.1: Evolución de los recursos hídricos y déficit de recursos hídricos naturales para la isla de Tenerife. Fuente: CIATF (2018)	5
Tabla 3.2: Consumo de recursos hídricos en Fuerteventura. Fuente: PHF (tercer ciclo).....	9
Tabla 3.3: Comparación del déficit de recursos y la dependencia de desalación. Elaboración propia	15
Tabla 3.4: Principal recurso eólico en Fuerteventura. Fuente: Grafcan.....	19
Tabla 3.5: Principales EDAM mediante OI en Gran Canaria. Fuente: FCCA (2013)	20
Tabla 3.6: Principales EDAM mediante OI en Fuerteventura. Fuente: FCCA (2013)	22
Tabla 3.7: Principales EDAM mediante OI en Lanzarote. Fuente: FCCA (2013)	23
Tabla 6.1: Temperaturas mínimas para la boya de Gran Canaria en 2019. Fuente: Puertos del Estado.....	34
Tabla 6.2: Temperaturas máximas para la boya de Gran Canaria en 2019. Fuente: Puertos del Estado.....	34
Tabla 6.3: Temperaturas mínimas consideradas para la media anual. Fuente: Puertos del Estado	35
Tabla 6.4: Temperaturas máximas consideradas para la media anual. Fuente: Puertos del Estado	35
Tabla 6.5: Composición estándar de agua de mar. Fuente: Lanxess (guía de diseño).....	36
Tabla 6.6: Composición del agua de mar en Sta. Cruz de Tenerife. Fuente: Laboratorio Labaqua	37

Tabla 6.7: Desviación respecto a composición de agua de mar estándar. Elaboración propia	39
Tabla 6.8: Criterios de calidad del agua de consumo humano. Fuente: RD 140/2003, de 7 de febrero	40
Tabla 6.9: Parámetros microbiológicos. Fuente: RD 140/2003, de 7 de febrero	40
Tabla 6.10: Parámetros químicos que se controlan según las especificaciones del producto. Fuente: RD 140/2003, de 7 de febrero.....	40
Tabla 6.11: Parámetros químicos. Fuente: RD 140/2003, de 7 de febrero	41
Tabla 6.12: Parámetros indicadores. Fuente: Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero	42
Tabla 6.13: Calidad recomendada para la alimentación y el concentrado. Fuente: Lanxess	43
Tabla 6.14: Criterios de diseño en función del tipo de agua de captación. Fuente: Lanxess	43
Tabla 7.1: Potenciales alternativas de ubicación seleccionadas. Elaboración propia.....	47
Tabla 7.2: Estimación de la capacidad mínima de la planta. Elaboración propia.....	49
Tabla 7.3: Modelos y características de las membranas SWRO. Fuente: Lanxess	50
Tabla 7.4: Desviación respecto a composición de agua de mar estándar. Elaboración propia	51
Tabla 7.5: Criterios de diseño en función del tipo de agua de captación. Fuente: Lanxess	51
Tabla 7.6: Número de tubos de presión para cada modelo de membrana. Elaboración propia	52
Tabla 7.7: Resultados para la membrana Lewabrane RO S400 HR. Elaboración propia	53
Tabla 7.8: Dimensionamiento del pretratamiento físico. Elaboración propia ...	56
Tabla 7.9: Dimensionamiento del pretratamiento químico. Elaboración propia	56
Tabla 7.10: Dimensionamiento del postratamiento. Elaboración propia	57

Tabla 7.11: Cota máxima a la que se sitúan las localidades a abastecer. Fuente: Goolzoom.....	59
Tabla 7.12: Dimensionado final de las tuberías. Elaboración propia	61
Tabla 7.13: Pérdidas de carga de las tuberías. Elaboración propia	61
Tabla 7.14: Cálculo de la altura útil. Elaboración propia.....	63
Tabla 7.15: Cálculo de NPSHd. Elaboración propia	63
Tabla 7.16: Datos necesarios para el dimensionamiento de las bombas. Elaboración propia	64
Tabla 7.17 Selección de la bomba de alimentación. Elaboración propia.....	64
Tabla 7.18: Selección de la bomba de distribución. Elaboración propia.....	65
Tabla 7.19: Selección de la bomba de alta presión. Elaboración propia	65
Tabla 7.20: Selección de la bomba Booster. Elaboración propia	65
Tabla 7.21: Selección de la bomba de postratamiento. Elaboración propia	66
Tabla 7.22: Consumo de energía de la instalación. Elaboración propia.....	66
Tabla 7.23: Información sobre la potencia nominal y altura de la góndola. Fuente: TheWindPower.net.....	67
Tabla 7.24: Ajuste de unidades para garantizar exceso energético. Elaboración propia.....	67
Tabla 7.25: Exceso energético respecto EDAM. Elaboración propia	68
Tabla 7.26: Factor de carga para la altura mínima de góndola. Elaboración propia.....	68
Tabla 7.27: Factor de carga para la altura máxima de góndola. Elaboración propia.....	68
Figura 8.1: Capacidad de producción de la planta. Elaboración propia.....	71
Figura 8.2: Configuración del bastidor de membranas. Elaboración propia	71
Tabla 8.3: Pretratamiento físico. Elaboración propia	72
Tabla 8.4: Pretratamiento químico. Elaboración propia	72
Tabla 8.5: Postratamiento. Elaboración propia	72
Tabla 8.6: Parámetros para conocer la profundidad del pozo de captación. Elaboración propia	73

Tabla 8.7: Dimensionado final de las tuberías. Elaboración propia	73
Tabla 8.8: Dimensionado del emisario submarino. Elaboración propia	74
Tabla 8.9: Datos necesarios para el dimensionamiento de las bombas. Elaboración propia	74
Tabla 8.10: Resumen de los modelos seleccionados para el sistema de bombeo. Elaboración propia	75
Tabla 8.11: Resumen del consumo del sistema de bombeo. Elaboración propia	75
Tabla 8.12: Resumen de las características del parque eólico. Elaboración propia.....	76

1. Objeto

El presente proyecto tiene como principal objetivo, además de servir como demostración de la correcta adquisición de las competencias asociadas al Grado de Ingeniería Mecánica, el dimensionamiento (con ayuda de programas informáticos seleccionados) de los principales componentes de una estación desaladora de agua de mar, que funciona mediante ósmosis inversa, es abastecida por energías renovables y tiene una capacidad de desalación pequeña o media (entre 2.000 y 10.000 m³/día).

Aunque la instalación se apoyará en la red eléctrica para permitir un funcionamiento continuo (y suplir así la intermitencia y variabilidad del recurso renovable), toda la energía requerida por la planta será obtenida por recursos renovables y vertida a la red. De esta manera, será evitada la quema de combustibles fósiles adicionales – contribuyendo así a la cada vez más necesaria reducción de nuestra dependencia de fuentes de energías no renovables. El producto, agua desalada, será usado como abastecimiento de agua potable para la población humana próxima a la planta. El emplazamiento será seleccionado tras analizar y comparar las necesidades hídricas y el recurso renovable entre distintas regiones de las islas Canarias.

1.1 Abstract

This project's main goal, besides demonstrating the correct acquisition of the competences associated to the degree of Mechanical Engineering, is to design (aided through some selected software) the main components of a reverse osmosis seawater desalination plant that works through renewable energies, with little or medium desalination capacity (between 2000 and 10000 m³/day)

Although it will need to use the power grid as intermediary in order to allow a continuous operation (and make up for the variability and intermittence of the renewable resource), the whole energy that is required by the plant will be obtained through renewable resources and supplied to the grid. This way, direct burning of additional fossil fuels will be avoided – thus, contributing this way to the increasingly necessity to reduce our dependency of non-renewable energy sources. The product, desalinated water, will be used as potable water supply to the human population that is surrounding the plant. The ubication will be selected after analyzing and comparing the water needs and renewable resources of different places in Canary Islands.

2. Alcance

En este documento se abordará el diseño de una estación desaladora de agua de mar que funciona por ósmosis inversa y es alimentada mediante energía eólica, con una capacidad de producción pequeña. Comprenderá un estudio previo de ubicación de la planta de desalación en función del recurso y las necesidades hídricas en Canarias, así como el diseño del núcleo de desalación y de los sistemas de captación, distribución, pretratamiento, postratamiento, rechazo de salmuera y abastecimiento de energía.

Para ello, se dimensionarán los principales componentes y se seleccionarán los equipos pertinentes entre diversos fabricantes. Se determinará el consumo de energía y para su abastecimiento se seleccionará el equipo o máquina más adecuada, todo ello tras determinar su ubicación en función del recurso renovable disponible y las necesidades hídricas reales. Por último, se indicarán distintas alternativas o vías de aprovechamiento del posible exceso energético producido.

Así, formará parte de este documento:

- Estudio previo de alternativas para ubicar la planta en Canarias
 - Determinación de los recursos, necesidades hídricas y dependencia de la desalación en Canarias
 - Selección de la fuente de energía renovable más adecuada, y determinación de las zonas con mayor recurso para su potencial aprovechamiento.
 - También se tendrá en cuenta la ubicación y proximidad de otras plantas desaladoras de medio o pequeño tamaño, así como la ordenación del territorio y los principales usos del suelo de las regiones seleccionadas
- Dimensionado del núcleo de desalación:
 - La composición química del agua de captación y su temperatura media anual
 - Determinación de la capacidad de la planta en función de la población a abastecer
 - Selección del modelo más idóneo de membrana para el fabricante seleccionado
 - Configuración del bastidor de membranas
 - Dimensionado y selección del dispositivo de recuperación de energía
 - Cálculo del consumo de energía específico de la planta
 - Dimensionado y selección de las bombas de alta presión y booster
- Dimensionado del sistema de captación
 - Tipo de captación necesario
 - Número y disposición de los pozos de captación

- Profundidad mínima de cada pozo de captación y a la que debe situarse la bomba sumergible
- Dimensionado de la tubería de captación
- Dimensionado y selección de las bombas de captación

- Dimensionado de los sistemas de pretratamiento y postratamiento
 - Determinación del equipo o producto químico necesario
 - Dimensionado y selección de la bomba de postratamiento

- Dimensionado del sistema de distribución
 - Ubicación del depósito de regulación
 - Dimensionado y selección de las tuberías
 - Dimensionado y selección de la bomba de distribución

- Dimensionado del sistema de rechazo de salmuera
 - Determinación de la forma de gestión de la salmuera
 - Dimensionado y selección de las tuberías, y de la necesidad o no de bomba para el rechazo de salmuera

- Dimensionado del sistema de abastecimiento de energía
 - Selección de la fuente de energía renovable más adecuada, y determinación de las zonas con mayor recurso para su potencial aprovechamiento.
 - Ubicación y selección de los dispositivos o máquinas para el aprovechamiento del recurso renovable
 - Estudio de posibles vías de aprovechamiento del exceso energético

No formará parte de este documento:

- Pliego de condiciones, mediciones y presupuesto, estudio de seguridad y salud, estudios impacto ambiental y estudios geotécnicos del terreno
- Instalaciones eléctricas, electrónicas, de control, automatización, contraincendios, saneamiento, climatización o similares, proyectos de obra civil y su respectiva planificación
- Ubicación de los equipos y dimensionado de las tuberías en el núcleo de desalación o bastidor de membranas, así como el análisis biológico del agua

Aunque se ha prescindido del presupuesto, en el anexo VIII se puede encontrar una estimación de costes que, aunque incompleta, puede dar una idea general de la envergadura del proyecto. No ha sido posible obtener información más concreta y detallada, debido a que, en la mayoría de los casos, se requiere una cierta intención o compromiso de compra para que los fabricantes de los equipos faciliten esta información.

En general, este proyecto debe entenderse como un estudio general y simplificado, no ejecutable y con un enfoque fundamentalmente académico.

3. Antecedentes

Para decidir dónde ubicar una estación de desalación de agua de mar alimentada mediante energías renovables, resulta fundamental conocer de antemano las necesidades reales de desalación, el recurso renovable, la proximidad de otras instalaciones de desalación similares y la ordenación del territorio en el lugar de ubicación.

- Se ha decidido acotar el lugar de ubicación a las islas Canarias porque la toma de una decisión final requiere tener en cuenta diversas normativas, lo cual resulta más sencillo conocer en un ámbito local.
- También se ha decidido, tal y como se justifica en el anexo VII, escoger la energía eólica como recurso renovable para abastecer la instalación. Si bien la energía solar también dispone de un gran potencial de aprovechamiento en Canarias, en general se requiere de una mayor superficie de instalación para la misma generación energética. Esto complica la búsqueda de lugares idóneos, al tener en cuenta que una instalación de este tipo debe ubicarse necesariamente próxima a la costa y consecuentemente el suelo urbanizable queda más limitado.

3.1 Análisis de las necesidades hídricas en las islas Canarias

Escoger la ubicación de la EDAM requiere un análisis previo de las necesidades hídricas del territorio, para así priorizar aquellos lugares con mayor demanda de desalación sobre aquellos que tienen más recursos hídricos propios.

A continuación se estudiará el balance hidráulico en cada isla, que toma en cuenta las necesidades y los recursos hídricos para conocer si existe un déficit de recursos subterráneos que motive la necesidad de desalación. Esta información ha sido extraída a partir de los últimos datos disponibles del segundo y tercer ciclo de planificación del Plan Hidrológico de cada isla.

3.1.1 Balance hidráulico en la isla de Tenerife

Desde el año 2000 y hasta 2016, el uso de la desalación se ha incrementado en $22\text{hm}^3/\text{año}$, lo que ha contribuido a reducir un total de $50\text{hm}^3/\text{año}$ la explotación de los recursos subterráneos (tabla 3.1).

A pesar de que la demanda neta ha disminuido en la última década (hasta $185,7\text{hm}^3/\text{año}$ en 2016), los recursos naturales por sí solos no son sostenibles, ya que no son suficientes para cubrir la demanda: existe un déficit de $35,5\text{hm}^3/\text{año}$ que provoca que otros recursos, como la reutilización y la desalación, sean indispensables. Es por ello que, según datos del balance hidráulico de Tenerife para 2016 (fig. 3.1), si bien las aguas subterráneas (captadas principalmente mediante galerías, pozos y nacientes) representan el principal recurso hídrico utilizado para cubrir la demanda (78%), la desalación ocupa un segundo pero importante lugar (15%).

Los datos indican que, en el futuro próximo, la dependencia de la desalación no disminuirá: Según el Modelo de Simulación del Flujo Subterráneo (MSFS), aún si la extracción de recursos naturales parase inmediatamente, el sistema no podrá evolucionar a una nueva situación de equilibrio al menos hasta después del año 2200, debido a que la baja permeabilidad del terreno provoca que el ajuste entre la recarga y las salidas al mar se ralentice. Es por ello por lo que una mayor oferta de recursos no naturales, como la desalación, se encuentra entre los objetivos de la planificación hidrológica de Tenerife para el tercer ciclo (2021-2027).

Recursos/Año	2000	2012	2014	2015	2016
Superficiales	-	0,9	2,8	1,4	1,4
Subterráneos (P+G+M)*	200,4	160,3 (102+55+4)	151,1 (98+49+4)	151,60 (95+52+5)	150,2 (94+52+4)
Reutilización	8,7	11,1	10,2	10,8	11,2
Desalación	8	26,6	25,3	28,0	30,1
Total	217,1	199,0	189,4	191,8	193,0
Demanda neta	-	194,2	184,4	184,1	185,7
Déficit recursos naturales	-	-33,0	-30,5	-32,5	-35,5

Tabla 3.1: Evolución de los recursos hídricos y déficit de recursos hídricos naturales para la isla de Tenerife. Fuente: CIATF (2018)

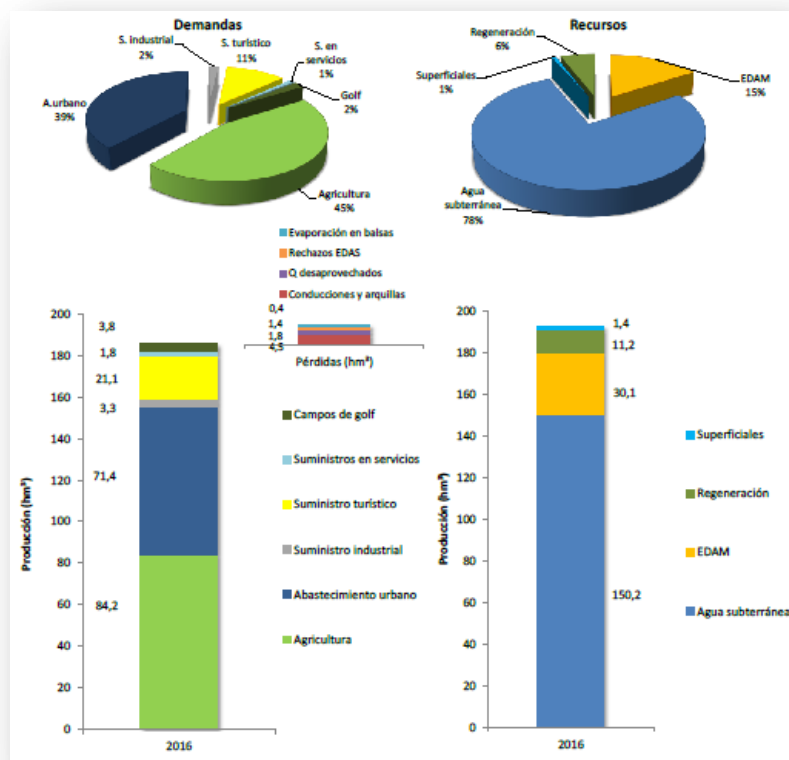


Figura 3.1: Balance hidráulico del año 2016 para la isla de Tenerife. Fuente: PHT (tercer ciclo)

3.1.2 Balance hidráulico en la isla de Gran Canaria

Según los datos del balance hidráulico de la isla de Gran Canaria para 2017 (fig. 3.2), la desalación de agua de mar representa el principal recurso hídrico de la isla (51%), ocupando la extracción de aguas subterráneas un segundo lugar (34%).

En valores absolutos, el volumen de agua desalada anual (fig. 3.3) es el más alto de todas las islas (81 hm³), representando prácticamente la mitad del total en Canarias (163,5hm³/año).

Desde 1973, el volumen de agua desalada ha ido incrementándose cada año (fig. 3.4), contribuyendo a disminuir el uso de las aguas subterráneas y ayudando así a reducir los problemas derivados de su sobreexplotación (como su salinización o el descenso de los niveles piezométricos)

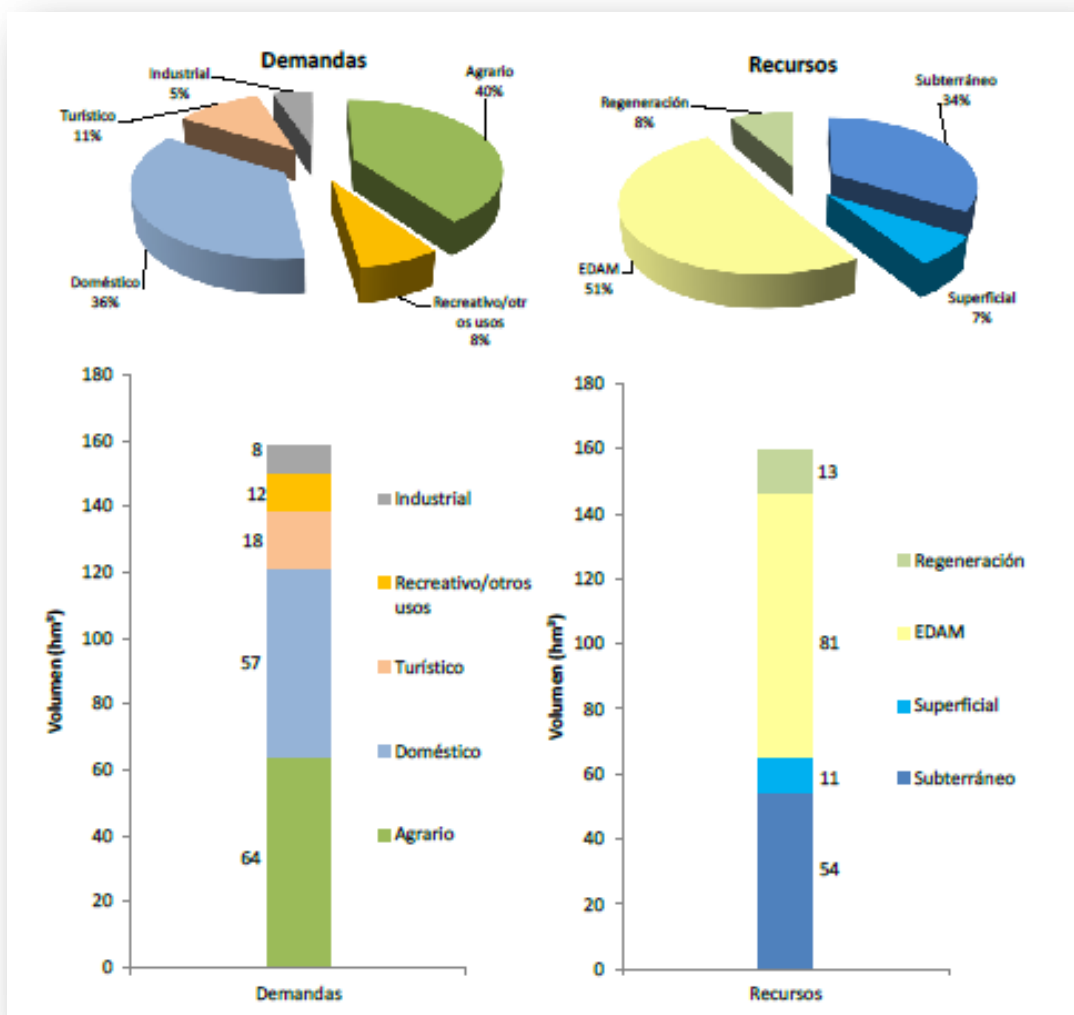


Figura 3.2: Balance hidráulico del año 2017 para la isla de Gran Canaria. Fuente: PHGC (tercer ciclo)

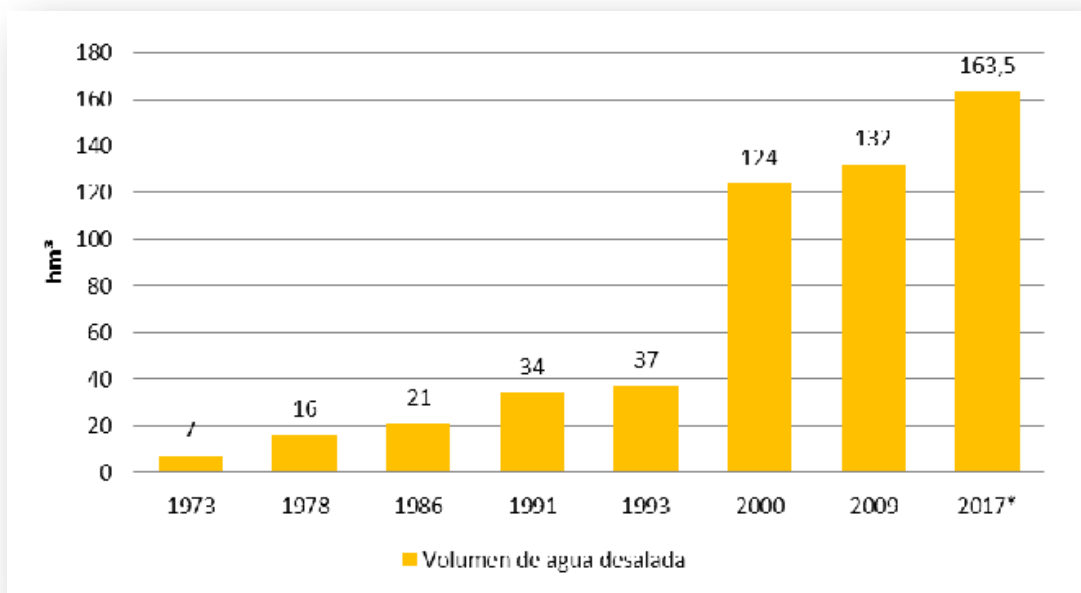


Figura 3.3: Evolución del volumen de agua desalada anual para la isla de Gran Canaria. Fuente: PHGC (tercer ciclo)

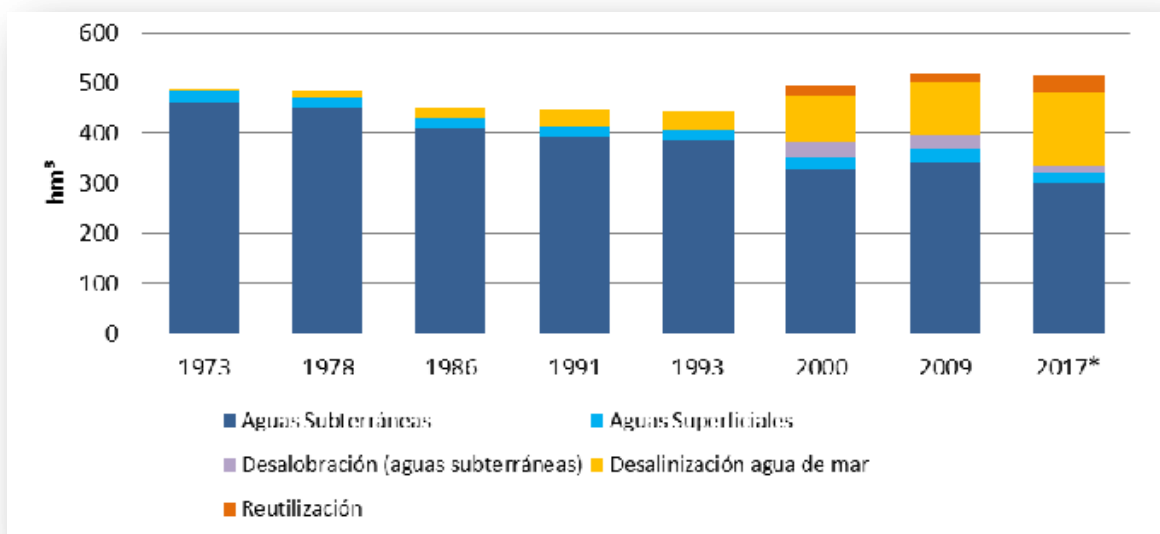


Figura 3.4: Evolución de los volúmenes de agua aprovechados en Canarias. Fuente: Custodio (2011)

El déficit hídrico que supondría el uso exclusivo de recursos naturales es incluso mayor que en la isla de Tenerife, siendo necesarios 91 hm³/año de agua adicionales para poder cubrir la demanda (fig. 3.5)

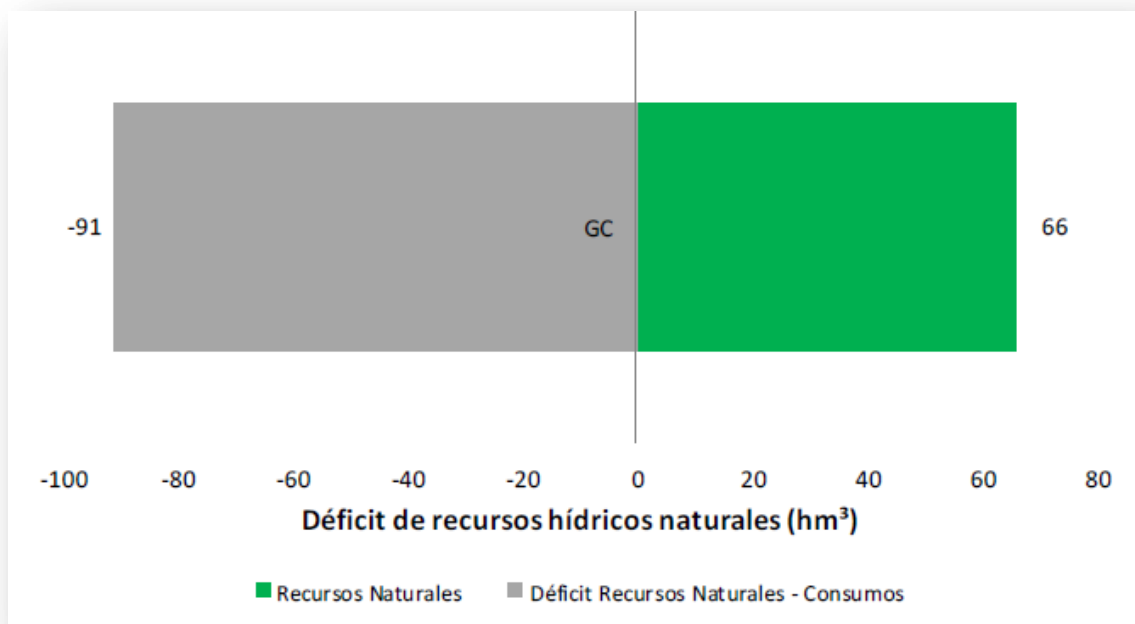


Figura 3.5: Déficit de recursos hídricos naturales para la isla de Gran Canaria. Fuente: PHGC (tercer ciclo)

En cuanto a tendencias futuras, el previsible cambio climático en las próximas décadas favorecerá un retroceso en el promedio de pluviometría. Esto podría contribuir a aumentar aún más la dependencia de la desalación como principal recurso hidráulico en esta isla.

Con una importancia proporcional tan grande de la desalación, la eficiencia del proceso (con el objetivo de reducir el gasto energético) cobra un papel determinante; y en este sentido, la desalación abastecida mediante energías renovables puede ser especialmente atractiva.

3.1.3 Balance hidráulico en la isla de Fuerteventura

En la isla de Fuerteventura, según datos para el 2017, se demanda un total de 77,36 hm³/año (tabla. 3.2), de los cuales:

- Casi la mitad (48%) se invierten en la central térmica Las Salinas.
- El resto se reparte principalmente en abastecimiento y autoservicio residencial y turístico (44%).
- El sector agrario, por su parte, es poco importante y tan sólo requiere un 2%:

Casi la totalidad de dicha demanda (93%) se satisface mediante la desalación de agua de mar y salobre (fig. 3.6)

Esto es debido a que:

- La mayor parte (85%) de la precipitación media anual de la isla (que proporcionaría un total de 197 hm³/año) se evapora, similarmente a lo ocurrido en zonas desérticas.

- La aridez del clima y la baja capacidad de infiltración de los materiales propios de la zona provocan que la recarga natural sea muy limitada ($15,6\text{hm}^3/\text{año}$, lo que supone el 11% de la precipitación). Estas aguas subterráneas, principalmente salobres, son luego tratadas en las Estaciones Desaladoras de Aguas Salobre (EDAS).
- Mediante las múltiples obras de almacenamiento de aguas superficiales (principalmente presas) distribuidas en toda la isla, sólo es posible captar el 4% de la precipitación ($6,9\text{hm}^3/\text{año}$)

Por tanto, existe un importante déficit de recursos hídricos naturales que no podría ser solventado sin la ayuda de métodos de origen industrial, como la desalación.

Uso	$\text{hm}^3/\text{año}$	%
Abastecimiento (residencial y turístico)	15,51	20%
Agraria (Regadío y ganadera)	1,37	2%
Industria conectada a la red	0,37	0%
Energía (central térmica Las Salinas) ¹	37,49	48%
Otros usos ²	4,23	5%
Autoservicios (residencial y turístico)	18,40	24%
Total	77,36	100 %

Tabla 3.2: Consumo de recursos hídricos en Fuerteventura. Fuente: PHF (tercer ciclo)

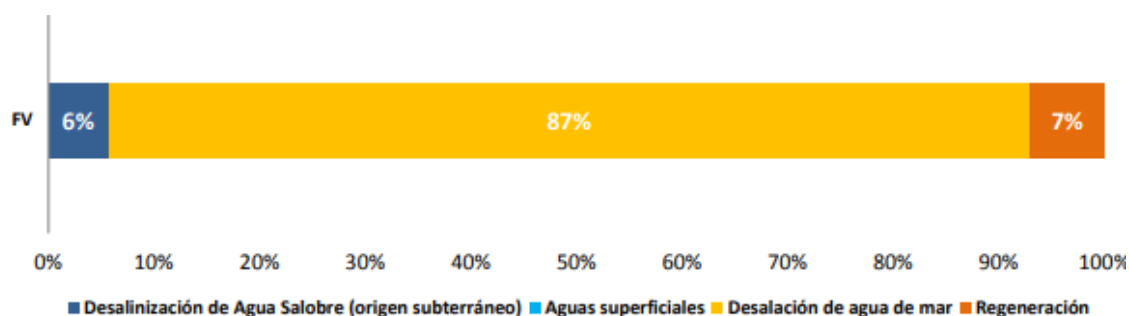


Figura 3.6: Distribución porcentual de los recursos hídricos para la isla de Fuerteventura. Fuente: PHF (tercer ciclo)

3.1.4 Balance hidráulico en la isla de Lanzarote

La demanda total de agua en Lanzarote está en torno a 27.6 hm³/año. Para cubrirla, similarmente al caso de la isla de Fuerteventura, la dependencia de la desalación es casi total (un 89% de los recursos hídricos), mientras que la regeneración representa el restante 11% (fig. 3.7)

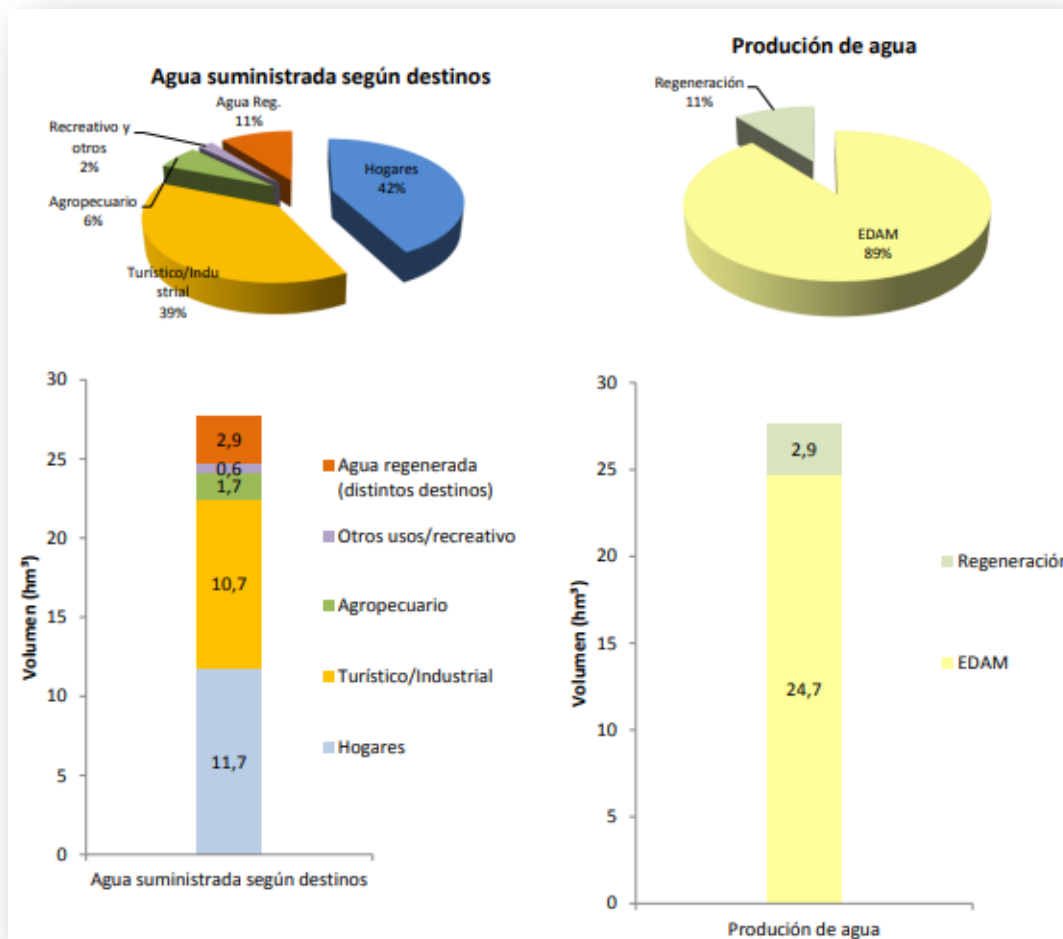


Figura 3.7: Balance hidráulico del año 2018 para la isla de Lanzarote. Fuente: PHL (tercer ciclo)

Los recursos hídricos superficiales de la isla son nulos y los hídricos subterráneos son escasos. La mayoría de las galerías y pozos utilizados para la explotación de los recursos subterráneos se encuentran en la actualidad inactivas, clausuradas o con caudal despreciable a efectos de contabilización del volumen de agua explotado.

Con lo cual, para cubrir el déficit hídrico de recursos naturales (fig. 3.8) es necesario la producción industrial de agua, particularmente la desalación, y todo parece indicar que ésta seguirá siendo la tendencia en un futuro próximo para la isla.

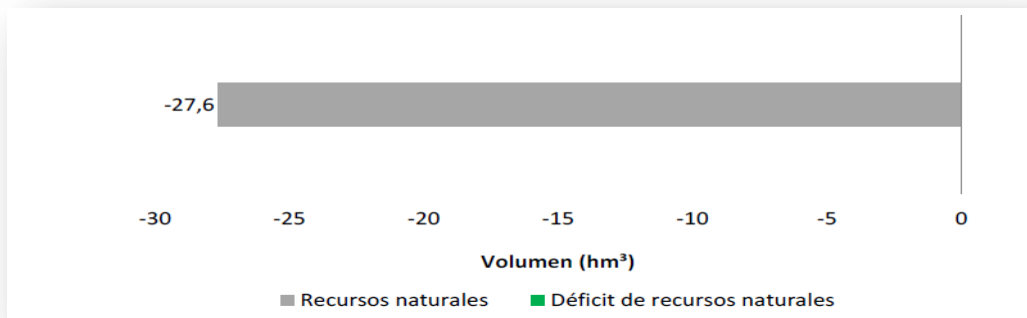


Figura 3.8: Déficit de recursos hídricos naturales frente a las demandas. Fuente: Centro de Datos del Cabildo Insular de Lanzarote, 2019.

3.1.5 Balance hidráulico en la isla de El Hierro

En este caso no ha sido posible obtener la actualización de información provisional correspondiente al tercer ciclo (2021-2027) de Planificación Hidrológica de El Hierro, así que se han obtenido los datos a partir de la planificación correspondiente al segundo ciclo (2015-2021). Según esta fuente, el balance hidráulico de la isla para el 2015 presenta la forma mostrada en la figura 3.9:

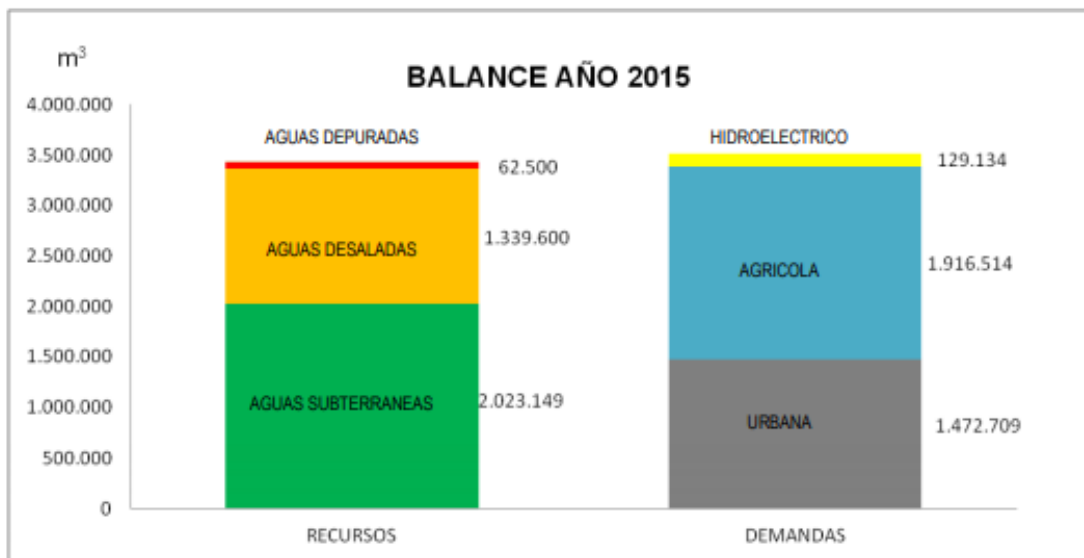


Figura 3.9: Balance hidráulico para la isla de El Hierro (2015). Fuente: PHH (segundo ciclo)

Las proyecciones y estimaciones del balance hidráulico para el año 2027 (fig. 3.10), por su parte, establecen que los recursos hídricos seguirán siendo

suficientes para cubrir las pequeñas variaciones de demanda previsible en la isla, debido al incremento de la población urbana.

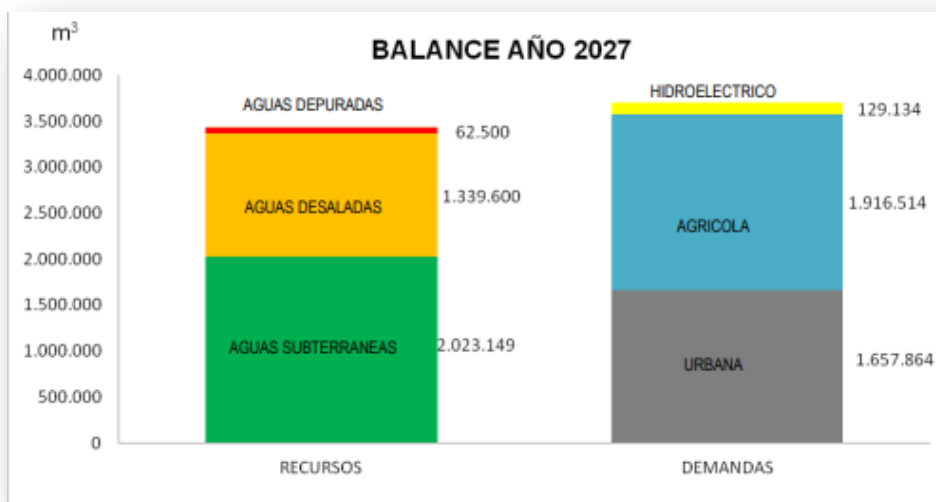


Figura 3.10: Proyección del balance hidráulico para 2027 en la isla de El Hierro. Fuente: PHH (segundo ciclo)

Por tanto, si bien los recursos naturales de la isla ($2 \text{ hm}^3/\text{año}$) no son suficientes para cubrir la totalidad de la demanda ($3.4 \text{ hm}^3/\text{año}$), las infraestructuras de desalación y depuración de agua actuales existentes en la isla son suficientes para cubrirla en un futuro próximo, bastando ampliaciones en su capacidad si finalmente la demanda fuese mayor a la prevista.

3.1.6 Balance hidráulico en la isla de La Gomera

Se muestra en la figura 3.11 el ciclo integral de los recursos hídricos de La Gomera para el año 2017, expresado en $\text{hm}^3/\text{año}$.

La demanda total bruta (teniendo en cuenta las pérdidas en las redes de distribución y de riego) es de $8,6 \text{ hm}^3/\text{año}$. Los recursos hídricos subterráneos satisfacen un 79% de dicha demanda ($6,7 \text{ hm}^3/\text{año}$), y las presas existentes que aprovechan la escorrentía superficial satisfacen un 16% ($1,4 \text{ hm}^3/\text{año}$). El 5% restante es aportado por la única EDAM de la isla, ubicada en Playa Santiago, y cuyo fin es el autoservicio del Hotel Jardín Tecina y su campo de golf. Se puede observar además que, en general, los recursos hídricos renovables de la isla tienen una recarga ($34 \text{ hm}^3/\text{año}$) muy superior a las extracciones.

Así, en el caso de La Gomera, los recursos hídricos naturales son suficientes, sin requerir plantas de desalación adicionales para la satisfacción de las demandas.

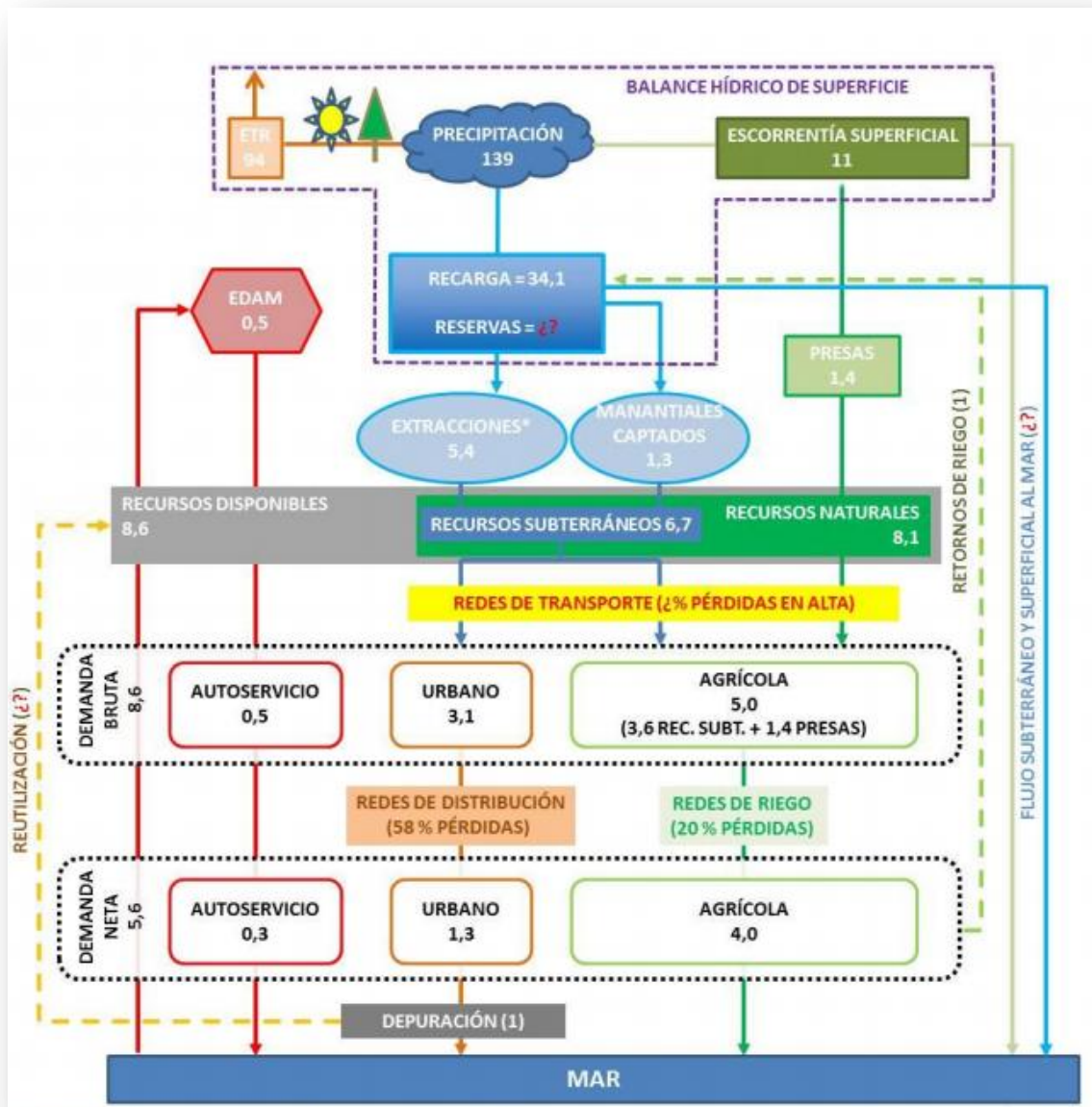


Figura 3.11: Ciclo integral de los recursos hídricos para la isla de La Gomera (2017). Fuente: PHG (segundo ciclo)

3.1.7 Balance hidráulico en la isla de La Palma

Según los últimos datos disponibles del Plan Hidrológico de La Palma (fig. 3.12), en dicha isla no existe dependencia de la desalación. Los recursos naturales propios son suficientes para abastecer el total de la demanda (58,04 hm³/año, mayormente agrícola) de la población, sin tampoco existir peligro de sobreexplotación en un futuro próximo.

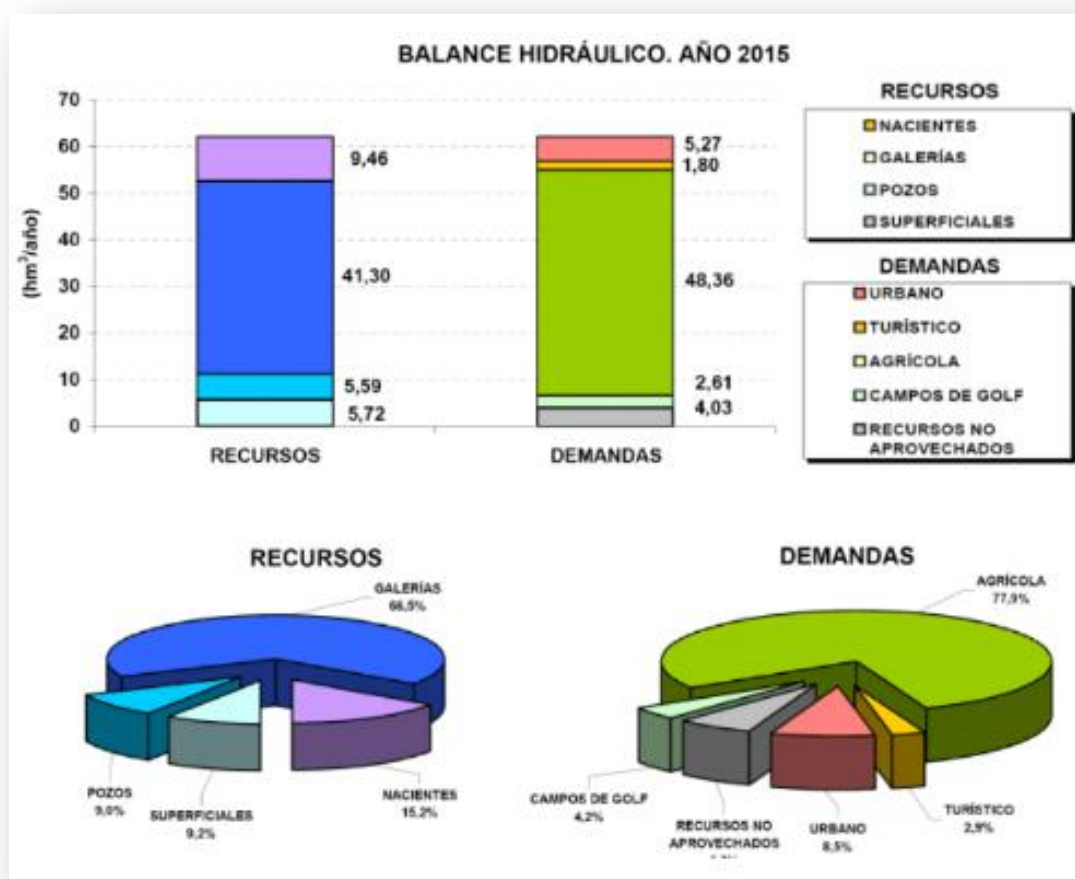


Figura 3.12: Balance hidrológico para la isla de La Palma (2017). Fuente: PHLP (segundo ciclo)

3.1.8 Conclusiones del análisis de necesidades hídricas en Canarias

Se muestra un resumen comparativo entre las distintas islas en la tabla 3.3, en el que se puede comparar el déficit de recursos hídricos naturales y la dependencia de la desalación o porcentaje que ésta representa en el conjunto de recursos hídricos destinados a abastecer la demanda.

A partir de este análisis, se descarta ubicar la EDAM en las islas de La Gomera y La Palma, por no tener un déficit de recursos hídricos naturales (o una mala calidad de estos) que justifique la necesidad de añadir recursos hídricos adicionales de origen industrial.

Tampoco se considerará a la isla de El Hierro, al tener un déficit de recursos hídricos lo suficientemente bajo (a consecuencia de su pequeña población) como para asumir que las infraestructuras de desalación existentes actualmente en la isla son suficientes para cubrir sus demandas en un futuro próximo, mediante un aumento en su capacidad si fuera necesario.

Entre las cuatro islas restantes, se eliminará la opción de Tenerife, dada su dependencia de la desalación significativamente menor a las demás.

	Déficit de recursos hídricos naturales	Dependencia de la desalación
Gran Canaria	91 hm ³ /año	51%
Fuerteventura	77.3 hm ³ /año	93%
Tenerife	35.5 hm ³ /año	15%
Lanzarote	27.6 hm ³ /año	89%
El Hierro	1.4 hm ³ /año	39%
La Gomera	Nulo	5%
La Palma	Nulo	Nulo

Tabla 3.3: Comparación del déficit de recursos y la dependencia de desalación. Elaboración propia

Así, para decidir la ubicación final entre Gran Canaria, Fuerteventura, y Lanzarote, se considerarán criterios adicionales, como el recurso eólico existente, la proximidad de otras desaladoras de agua de mar y la ordenación del territorio.

A continuación, se realizará un análisis general del recurso eólico presente en cada isla, filtrando aquellos lugares que no se encuentren entre los espacios naturales protegidos, y posteriormente se ubicarán las principales desaladoras en cada isla.

En el anexo II se decidirá la ubicación definitiva teniendo en cuenta la ordenación del territorio.

3.2 Análisis general del recurso eólico en Canarias

A continuación, se analizará el recurso eólico a partir de un mapa de velocidades del viento a 80 m de altura, al que se realizará con un filtrado de zonas por motivos medioambientales (fig. 3.13)

Este filtrado se considera según la Red Canaria de los Espacios Naturales Protegidos (fig. 3.14), en la que se reconocen las siete figuras de La Ley de Espacios Naturales de Canarias:

- Parque Natural
- Parque Rural
- Reserva Natural Integral
- Reserva Natural Especial
- Monumento Natural
- Paisaje Protegido
- Sitio de Interés Científico

- También se considera la de Parque Nacional, así como todas aquellas áreas protegidas por organismos nacionales o supranacionales que el Parlamento designe.

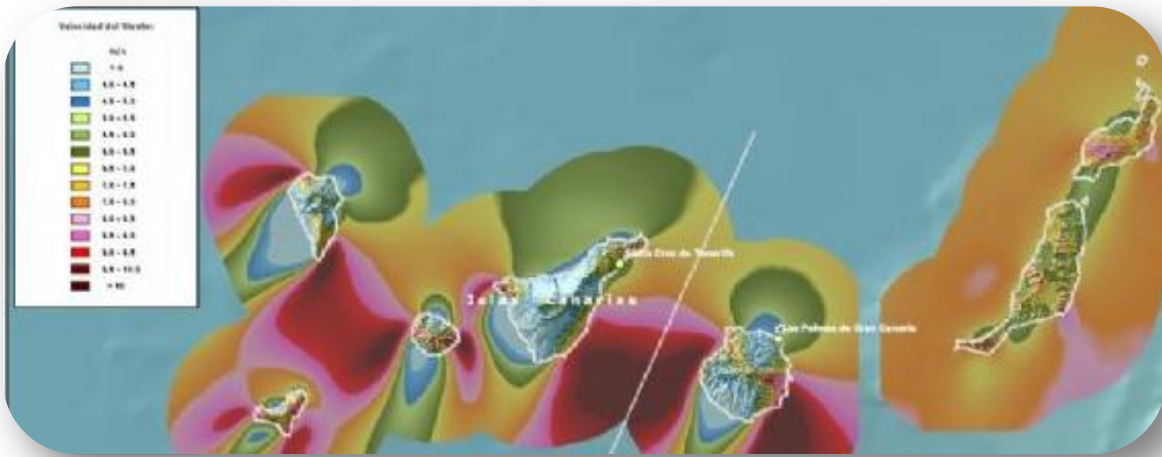


Figura 3.13: Mapa de velocidades del viento a 80m en Canarias. Fuente: IDAE

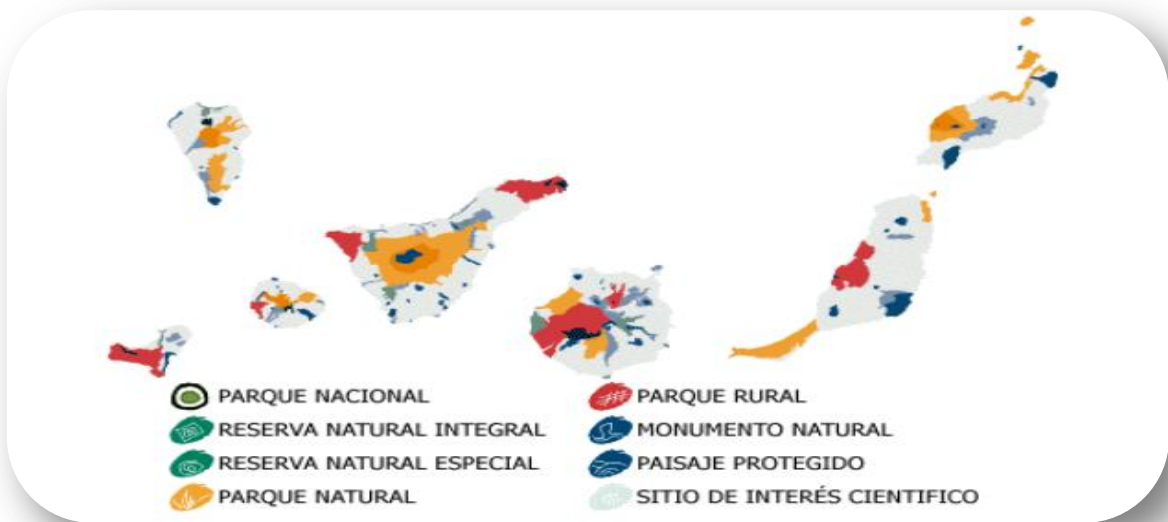


Figura 3.14: Red Canaria de los Espacios Naturales Protegidos. Fuente: Gobierno de Canarias

Este primer breve análisis del recurso eólico inicial servirá para conocer las zonas donde, idealmente, se intentará colocar el parque eólico o aerogenerador – siempre y cuando sea posible según la ordenación del territorio de la zona, proximidades de otros aerogeneradores, cercanía de poblaciones cercanas, entre

otros factores que puedan influir en la decisión final. Para conocer la velocidad del viento a partir del código de colores usado en el mapa eólico se hará uso de la leyenda del mapa eólico del visor online Grafcan (fig. 3.15)

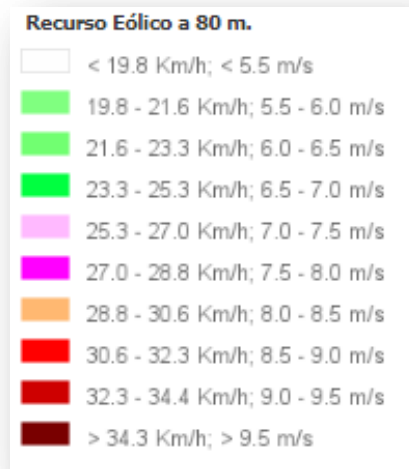


Figura 3.15: Leyenda del código de colores para el mapa eólico. Fuente: Grafcan

3.2.1 Análisis del principal recurso eólico en Gran Canaria

Se observa (fig. 3.16) que el mayor recurso eólico no presente en zonas protegidas se encuentra en la zona sureste, en los municipios de Agüimes, Ingenio y Santa Lucía de Tirajana, con velocidades del viento entre 7 y >9,5 m/s. También existe una pequeña zona en Gáldar.

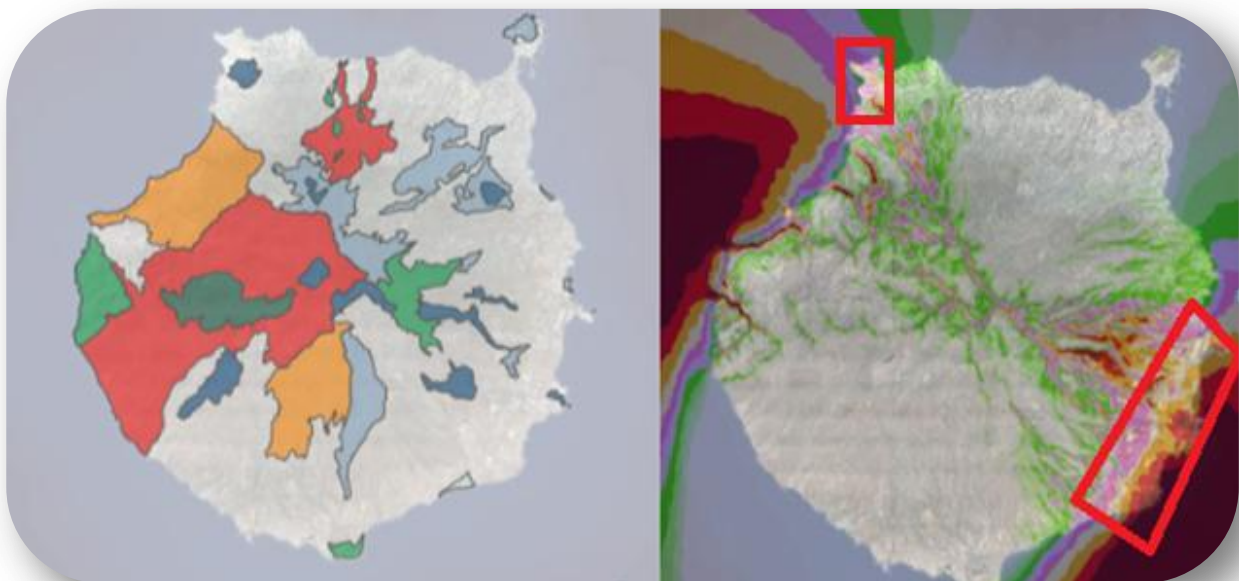


Figura 3.16: Principal recurso eólico en Gran Canaria. Fuente: Grafcan

3.2.2 Análisis del principal recurso eólico en Fuerteventura

Se observa (fig. 3.17) que el mayor recurso eólico no presente en zonas protegidas se encuentra en las zonas este y oeste de la isla, principalmente en los municipios de Tías y Teguise, Pájara, Antigua, Puerto del Rosario y La Oliva, con velocidades máximas del viento entre 7 y hasta incluso 9,5 m/s en lugares muy concretos.



Figura 3.17: Principal recurso eólico en Fuerteventura. Fuente: Grafcan

3.2.3 Análisis del principal recurso eólico en Lanzarote

Se observa (fig. 3.18) que el mayor recurso eólico no presente en zonas protegidas se encuentra en la zona este, en los municipios de Tías y Teguise, con velocidades viento comprendidas entre 7 y 8.5m/s.

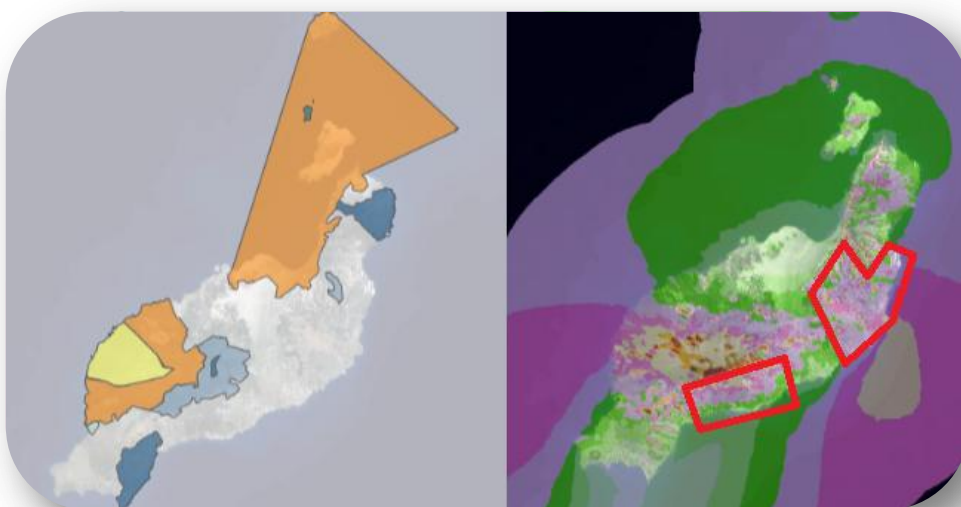


Figura 3.18: Principal recurso eólico en Fuerteventura. Fuente: Grafcan

3.2.4 Conclusiones del análisis general del recurso eólico

Como se ha comprobado, las tres islas disponen de zonas con recurso eólico suficiente para poder abastecer una instalación de desalación por ósmosis inversa de mediana capacidad (tabla 3.4). Este criterio, por tanto, no resulta suficiente para la toma de una decisión final.

	Velocidad media anual del viento en zonas favorables [m/s]
Gran Canaria	7-9.5+
Fuerteventura	7-9.5
Lanzarote	7-8.5

Tabla 3.4: Principal recurso eólico en Fuerteventura. Fuente: Grafcan

En el anexo II se realiza un estudio previo en mayor profundidad para estas tres islas considerando la ordenación del territorio, que servirá para la toma de una decisión final en cuanto a la ubicación idónea para la planta.

Previamente, se estudiará también la proximidad de otras EDAM de similares características, para evitar así colocar la planta en una región donde ya está implantada la oferta de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.

3.3 Proximidad de otras EDAM

En cuanto a la proximidad a otras EDAM, se tendrá en cuenta la lista oficial elaborada en 2013 por FCCA para cada isla, a la que se le han hecho las siguientes modificaciones:

- Se han eliminado las Estaciones Desaladoras de Agua Salobre (EDAS), al no estar necesariamente ubicadas en la costa y emplearse fundamentalmente sobre recursos hídricos terrestres o subterráneos.
- También se han descartado aquellas EDAM destinadas a campos de golf o con capacidad igual o inferior a 2000 m³/día, al ser éstas empleadas en urbanizaciones muy concretas, como hoteles, apartamentos, parques, y pequeñas infraestructuras públicas o privadas.

3.3.1 Lista de EDAM de mediana y gran capacidad en Gran Canaria

Se han ordenado según su capacidad de producción las principales desaladoras de la isla (tabla 3.5). Las plantas de gran capacidad, superior a 10000 m³/día, se han destacado en color rojo, mientras que las EDAM entre 2000 y 10000 m³/día se identifican en color azul.

Denominación	Ubicación	Producción	Municipio	Destino
Las Palmas III	Piedra Santa	65,000	Las Palmas de G.C.	Abasto
Maspalomas II	Playa de Las Burras s/n	25,200	San Bartolomé	Abasto
Las Palmas IV	Piedra Santa	15,000	Las Palmas de G.C.	Abasto
Aragua	-	15,000	Gáldar	Riego
Aragua	-	15,000	Gáldar	Riego
Salinetas	P.I. Las Salinetas	15,000	Telde	No indicado
Maspalomas I Mar	Morro Besudo	14,500	San Bartolomé	Abasto
Arucas-Moya I	Paseo de Miramar	10,000	Arucas	Abasto
Bonny	Juan Grande	8,000	San Bartolomé	Riego
Sureste III	C/ Punta Tenefé s/n. Pozo Izquierdo	8,000	Santa Lucía	Abasto-riego
Asociación de agricultores de la Aldea	Bco. La Aldea	5,400	San Nicolás	Riego
Ayto. San Nicolas	-	5,000	San Nicolás	Abasto-riego
Guía I	Roque Prieto	5,000	Guía	Riego
Guía II	Roque Prieto	5,000	Guía	Abasto
Félix Santiago Melián	-	5,000	Guía	No indicado
Puerto Rico	Barranco del Agua de la Perra	4,000	Mogán	Abasto
Puerto Rico I	Puerto Rico	4,000	Mogán	Abasto
Gáldar-Agaete I	-	3,000	Gáldar	Abasto
AQUALING	Tauro	2,000	Mogán	Abasto

Tabla 3.5: Principales EDAM mediante OI en Gran Canaria. Fuente: FCCA (2013)

Además, se ubican de manera aproximada en el mapa (fig. 3.19)



Figura 3.19: Ubicación de las principales desaladoras en Gran Canaria. Elaboración propia.

3.3.2 Lista de EDAM de mediana y gran capacidad en Fuerteventura

Denominación	Ubicación	Producción	Municipio	Destino
Consorcio Abastecimiento de Aguas a Fuerteventura (CAAF)	Puerto del Rosario	36,500	Pto del Rosario	Abasto
Empresa Mixta de Aguas de Antigua, S.L.	Montaña Blanca	4,800	Antigua	Abasto
Suministros de Agua de La Oliva, S.A.	Corralejo	9,000	La Oliva	Abasto
Consorcio Abastecimiento de Aguas a Fuerteventura	Corralejo	4,000	La Oliva	Abasto
Consorcio Abastecimiento de Aguas a Fuerteventura	Morro Jable	4,400	Pájara	Abasto
Vinamar, S.A.	Urbanización Las Gaviotas	3,600	Pájara	Abasto
GranTarajal	Gran Tarajal	4,000	Tuineje	Abasto
Sotavento, S.A.	Las Playitas	2,925	Tuineje	Abasto

Tabla 3.6: Principales EDAM mediante OI en Fuerteventura. Fuente: FCCA (2013)

Igualmente (tabla 3.6) se ubican de manera aproximada en el mapa (fig. 3.20):



Figura 3.20: Ubicación de las principales desaladoras en Gran Canaria. Fuente: FCCA (2013)

3.3.3 Lista de EDAM de mediana y gran capacidad en Lanzarote

Denominación	Ubicación	Producción	Municipio	Destino
Lanzarote III 1	Punta de los Vientos	10,000	Arrecife	Abasto
Lanzarote IV	Punta de los Ventos	20,000	Arrecife	Abasto
Lanzarote V	Punta de los Vientos	18,000	Arrecife	Abasto
Lanzarote III 2	Punta de los Vientos	5,000	Arrecife	Abasto
Lanzarote III 3	Punta de los Vientos	5,000	Arrecife	Abasto
Ercros	-	2,500	Teguise	Abasto
Ercros	-	2,200	Teguise	Abasto
Holiday Land S.A.	Puerto del Carmen	3,000	Tías	Abasto
Inalsa Sur 3	Janubio	3,000	Yaiza	Abasto
Club Lanzarote	Montaña Roja. Playa Blanca	4,500	Yaiza	Abasto

Tabla 3.7: Principales EDAM mediante OI en Lanzarote. Fuente: FCCA (2013)

Se ubican de manera aproximada en el mapa (fig. 3.21), a excepción de Ercros que no se indica la ubicación (tabla 3.7). En el anexo II se entrará en mayor profundidad y se tomará una decisión sobre la ubicación definitiva.



Figura 3.21: Principales EDAM mediante OI en Lanzarote. Fuente: FCCA (2013)

4. Normas y referencias

4.1 Normativa

Plan Hidrológico de Gran Canaria. Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria

Plan Hidrológico de Tenerife, Consejo Insular de Aguas de Tenerife

Plan Hidrológico de La Palma, Consejo Insular de Aguas de La Palma

Plan Hidrológico de La Gomera, Consejo Insular de Aguas de La Gomera

Plan Hidrológico de Lanzarote, Consejo Insular de Aguas de Lanzarote

Plan Hidrológico de Fuerteventura, Consejo Insular de Aguas de Fuerteventura

Plan Hidrológico de El Hierro, Consejo Insular de Aguas de El Hierro

Ley 4/2017, de 13 de julio, del Suelo y de los Espacios Naturales Protegidos de Canarias.

Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

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.

UNE 157001:2002 Criterios generales para la elaboración de proyectos

UNE 50-132:94. Numeraciones de las divisiones y subdivisiones de los documentos escritos.

4.2 Bibliografía:

Moran Saphiro. Fundamentos de termodinámica técnica. 2º Edición. Barcelona: Editorial Reverté, 2004.

Soriano, José Agüera. Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas. 5ª Edición actualizada. Madrid: Ciencia 3 S.L, 2002.

Yunus A. Cengel. Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. 3º edición. Mc Graw Hill.

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

Veza, José Miguel (2002). Introducción a la desalación de aguas. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de las Palmas de Gran Canaria.

Medina San Juan, José Antonio. Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis inversa. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1999.

Fernández Salgado, José María (2011). Guía completa de la energía eólica.

4.3 Programas de cálculo y herramientas empleadas

Software para el dimensionamiento del bastidor de membranas 'LewaPlus 2', del fabricante Lanxess <http://lpt.lanxess.com/lewaplus-software/>

Hoja de cálculo PX-POWER-SELECTOR para el dimensionamiento del dispositivo de recuperación de energía del fabricante Energy Recovery <http://www.energyrecovery.com>

Hoja de cálculo Danfoss iSave Select para el dimensionamiento del dispositivo de recuperación de energía del fabricante Danfoss <https://www.danfoss.com/es-es/>

Visor online para la obtención de datos del territorio en Canarias, Grafcan: <http://visor.grafcan.es/visorweb/>

Visor online para la obtención de datos del territorio en Canarias, Goolzoom <https://es.goolzoom.com/mapas/>

Recurso online para la selección de bombas Affinity del fabricante Flowserve:

https://flowserve.bigmachines.com/commerce/display_company_profile.jsp

Recurso online para la selección de bombas Grundfos Product Center del fabricante Grundfos <https://product-selection.grundfos.com/>

Recurso online para la selección de bombas KSB EasySelect del fabricante KSB https://www.ksb.com/ksb-es/Selecciona_sus_bombas_y_valvulas/KSB-EasySelect_Configurador_de_Producto_es/

Recurso online para la selección de bombas Xylect del fabricante Lowara http://xylect.com/bin/Xylect.dll?IS_NEXTPAGE=startup&IS_NEXTPAGE=BDYH_OME&IS_AREA=SPAIN&IS_COUNTRY=SPAIN&IS_BROWSER=%23%231.5%231280%23913

Recurso online para la selección de bombas Sulzer Water Pump Selector del fabricante Sulzer

<https://absel.sulzer.com/StartMain.aspx>

Recurso online para la selección de bombas Wilo Select 4 del fabricante Wilo <https://www.wilo-select.com/StartMain.aspx>

Recurso online “Estimación de la Energía producida por un aerogenerador” del Instituto Tecnológico de Canarias:
http://www.itccanarias.org/recursoeolico/calculation_tool/index.html

Recurso online para conocer la población actual estimada de cada localidad:
<http://citypopulation.de/>

Microsoft Office Word 2007

Microsoft Office Excel 2007

Google Earth

Google Maps

4.4 Otras referencias

Guía de diseño de LewaPlus (Lanxess)

Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado – www.boe.es

Instituto Tecnológico de Canarias (ITC). www.itccanarias.org

Sede Electrónica del Catastro: <http://www.sedecatastro.gob.es/>

Lanxess – Software LewaPlus:

Grafcan: <http://www.grafcan.es>

Goolzoom: <http://www.goolzoom.com>

Grundfos: <https://www.grundfos.com/>

Flowserve: <https://flowserve.com/>

KSB: <http://www.ksb.com>

Lowara: <http://www.lowara.com>

Sulzer: <https://www.sulzer.com/>

Wilo: <https://wilo.com/en/index.html>

Puertos del Estado: <http://www.puertos.es/es-es>

Gobierno de Canarias: <http://www.gobcan.es/>

Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria: <http://aguasgrancanaria.com/>

Consejo Insular de Aguas de Fuerteventura:

Consejo Insular de Aguas de Lanzarote:

Consejo Insular de Aguas de Tenerife: <http://aguatenerife.com/>

Consejo Insular de Aguas de El Hierro:

Consejo Insular de Aguas de La Gomera:

Consejo Insular de Aguas de La Palma:

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

The Wind Power: <https://www.thewindpower.net/>

Flowtite: <http://www.flowtite.com>

Fundación Centro Canario del Agua: <http://www.fcca.es>

Repositorio institucional de la Universidad de La Laguna: <http://www.riull.ull.es>

5. Definiciones y abreviaturas

5.1 Definiciones

- **Aerogenerador:** Dispositivo que transforma la energía eólica del viento en mecánica, y ésta última en eléctrica.
- **Altura neta positiva de aspiración:** Parámetro que permite prever la posibilidad de cavitación en una bomba
- **Bomba:** Equipo que impulsa un caudal de fluido líquido venciendo una altura útil o hidráulica.
- **Capacidad de producción:** Cantidad de caudal de permeado o agua producto que produce la planta de desalación
- **Caudal de captación:** caudal de agua que es captado por la bomba sumergible en el pozo de captación
- **Caudal de alimentación:** caudal de agua que se introduce en el bastidor de membranas tras la fase de pretratamiento
- **Caudal de permeado o producto:** caudal de agua que ha pasado por el bastidor de membranas y será distribuido tras la fase de postratamiento
- **Caudal de concentrado o rechazo:** caudal de agua que ha pasado por el bastidor de membranas se encuentra con alta concentración de sales
- **Conversión:** Fracción del agua de alimentación que se convertirá en agua producto
- **Consumo de energía específico:** Cantidad de energía necesaria para producir cada unidad de volumen del agua producto
- **Estación Desaladora de Agua de Mar:** Planta o instalación industrial que se ocupa de la desalación del agua de mar con un fin determinado.
- **Estación Desaladora de Agua Salobre:** Planta o instalación industrial que se ocupa de la desalación del agua salobre con un fin determinado.
- **Langerier Saturation Index:** Índice para medir el potencial de incrustación en aguas con TDS > 4000mg/L
- **Microfiltración:** Proceso de filtración para el pretratamiento
- **Nanofiltración:** Proceso de filtración para el pretratamiento, con un tamaño de poro inferior a la ultrafiltración
- **Nephelometric Turbidity Unit:** Unidad de medida para la turbidez obtenida mediante un nefelómetro.
- **Parque eólico:** Conjunto de dos o más aerogeneradores agrupados
- **Plan Hidrológico:** Conjunto de documentos donde se planifica la gestión del agua para una determinada población.
- **Postratamiento:** Tratamiento realizado al agua producto para adaptarla al destino escogido.
- **Pretratamiento:** Tratamiento realizado al agua de alimentación antes de su paso por las membranas para evitar su daño

- Silt Density Index: Índice obtenido a través de una prueba estandarizada para cuantificar el potencial de ensuciamiento
- Stiff and Davis Saturation Index: Índice para medir el potencial de incrustación en aguas con TDS > 4000mg/L
- Total Dissolved Solids: Cantidad total de sólidos disueltos en el agua, usualmente medido en mg/L.
- Turbidez: Parámetro medido a través de un nefelómetro que sirve para cuantificar el ensuciamiento del agua
- Ultrafiltración: Proceso de filtración para el pretratamiento, con un tamaño de poro inferior a la microfiltración

5.2 Abreviaturas

- BAP: Bomba de alta presión (o HPP, High pressure pump)
- BWRO: Brackish Reverse Osmosis (ósmosis inversa de agua salobre)
- EDAS: Estación Desaladora de Agua Salobre
- EDAM: Estación Desaladora de Agua de Mar
- ERI: Energy Recovery Inc.
- ERD: Energy Recovery Device (Dispositivo de Recuperación de Energía)
- FC: factor de carga.
- FCCA: Fundación Centro Canario del Agua.
- IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía.
- IEC: Comisión electrotécnica internacional (International Electrotechnical Commission)
- ITC: Instituto Tecnológico de Canarias
- LSI: índice de saturación de Langelier (Langerier Saturation Index)
- NTU: Nephelometric Turbidity Unit (unidad de turbidez nefelométrica)
- OI: Ósmosis inversa
- MF: Microfiltración
- NF: Nanofiltración
- PEX: Pressure Exchanger (Intercambiador de Presión)
- PHG: Plan Hidrológico de La Gomera
- PHH: Plan Hidrológico de El Hierro
- PHF: Plan Hidrológico de Fuerteventura
- PHGC: Plan Hidrológico de Gran Canaria
- PHL: Plan Hidrológico de Lanzarote
- PHP: Plan Hidrológico de La Palma
- PHT: Plan Hidrológico de Tenerife
- PRFV: poliéster reforzado con fibra de vidrio
- RO: Reverse Osmosis (ósmosis inversa)
- SLL: Superficie libre de líquido.

- SDI: Silt Density Index
- SDSI: índice de saturación de Stiff y Davis (Stiff and Davis Saturation Index)
- TDS: Total Dissolved Solids (sólidos disueltos totales)
- SAU – Suelo Apto para Urbanizar
- SUSO: Suelo Urbanizable Sectorizado Ordenado
- SUP. - Suelo urbanizable programado.
- SRPN – Suelo Rústico de Protección Natural
- SWRO: Seawater Reverse Osmosis (ósmosis inversa de agua de mar)

6. Requisitos de diseño

6.1 Requisitos del cliente

La Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología (ESIT) de la Universidad de La Laguna ha propuesto el dimensionado de una instalación de desalación de agua de mar que funcione mediante ósmosis inversa y sea alimentada por energías renovables. Su capacidad de desalación debe ser pequeña o media (entre 2000 y 10000 m³/día). La ubicación y el tipo concreto de energía renovable requerido se dejan a criterio del estudiante, si bien deben estar justificados adecuadamente.

6.2 Situación y emplazamiento

El emplazamiento escogido deberá reunir simultáneamente la necesidad hídrica y el recurso energético renovable, debiendo contemplarse cualesquiera normativas que afecten a una hipotética ejecución real del proyecto (zonas protegidas, ordenación del territorio, usos del suelo, etc.), así como la proximidad de otras EDAM en la zona. Ello requerirá de un estudio previo que contemple todos estos factores.

Este estudio previo se ha elaborado con detalle en el Anexo I, y en este apartado únicamente se mostrará el resultado. Así, tras considerar las necesidades hídricas y el recurso eólico en las Islas Canarias (lugar escogido para facilitar la búsqueda de normativa), y tomando en cuenta la proximidad de otras instalaciones de desalación y la ordenación del territorio, se ha decidido que la planta se ubicará en Gran Canaria: en el municipio de Gáldar, en la zona conocida como 'Barranquillo del Vino' (figs. 6.1 y 6.2). Cercanamente a la misma se ubican los pozos y el parque eólico con dos aerogeneradores (fig. 6.3)



Figura 6.1: Alternativa finalmente seleccionada. Fuente: Grafcan



Figura 6.2: Suelo urbanizable en la alternativa finalmente seleccionada. Fuente: Grafcan

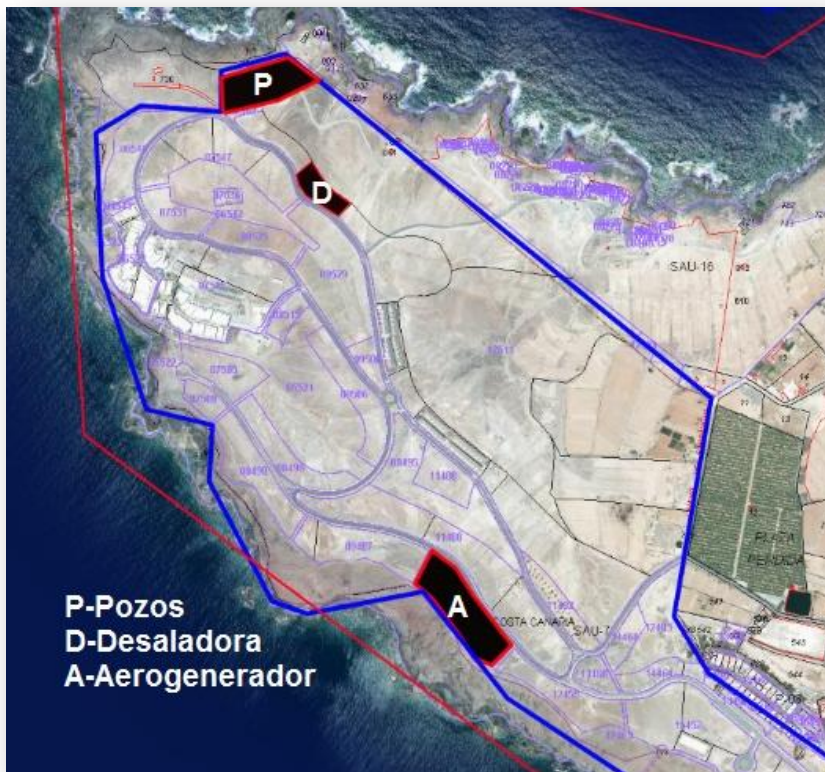


Figura 6.3: Pozos, desaladora y parque eólico ubicados en el terreno. Fuente: Grafcan

6.3 Capacidad de producción de la EDAM

La capacidad de producción (o caudal de permeado) se dimensiona en función de las necesidades a cubrir. Se buscará una capacidad de producción media; es decir, entre 2000 y 10000 m³/día.

Así, tras el estudio previo realizado en el anexo II, se llega a la conclusión de que para satisfacer a una población total estimada en los próximos 5 años de 2726 habitantes, distribuidos en las localidades de Puerto de Sardina, Barrial y Gáldar capital, y con un consumo medio de 186 litros por habitante y día, será necesario un caudal de permeado de 3000 m³/día.

6.4 Temperatura del agua de captación

Para conocer la temperatura aproximada (media) del agua que habrá en la ubicación correspondiente a los pozos de captación en Gran Canaria, se hace uso del recurso web 'Puertos del Estado'. Para ello, se buscan datos históricos sobre la temperatura del agua en la boya de Gran Canaria, que como se puede comprobar (fig. se encuentra muy cercana a Gáldar, la zona donde se ubicará la EDAM.



Figura 6.4: Boya de Gran Canaria. Fuente: Puertos del Estado

Se escogen los últimos datos disponibles, referentes al año 2019. Así es posible obtener una tabla con las temperaturas máximas y mínimas mensuales (tablas 6.1 y 6.2). Sin embargo, para algunos meses se toman múltiples medidas a diferentes horas del día, lo cual da lugar a una perturbación a la hora de calcular la media mensual real. Por tanto, se decide eliminar estos valores reiterativos de cara a su cálculo, como se muestra en las tablas 6.3 y 6.4. Así, obteniendo las respectivas medias para los valores de las tablas 6.3 y 6.4, se tiene:

- $T_{s \text{ mín}} = 21,5^{\circ}\text{C}$
- $T_{s \text{ máx}} = 20^{\circ}\text{C}$

Y obteniendo la media global, se comprueba que: $T_s = 20,75^\circ\text{C} \sim 21^\circ\text{C}$. Nótese que para el mes de octubre no existen datos, por tanto, se consideran 11 meses.

Boya de Gran Canaria Año 2019			
Mes/Month	Ts Min./Min. Ts	Día/Day	Hora/Hour
Enero/January	18.9	31	03
Febrero/February	18.6	4	09
Febrero/February	18.6	4	10
Marzo/March	18.4	23	23
Abril/April	18.8	11	03
Mayo/May	19.1	4	07
Junio/June	20.3	3	02
Julio/July	21.2	3	00
Agosto/August	21.6	1	05
Septiembre/September	21.9	4	07
Noviembre/November	20.6	29	07
Diciembre/December	20.6	13	12
Diciembre/December	20.6	13	10
Diciembre/December	20.6	13	14
Diciembre/December	20.6	13	11
Diciembre/December	20.6	13	13

Tabla 6.1: Temperaturas mínimas para la boya de Gran Canaria en 2019. Fuente: Puertos del Estado

Boya de Gran Canaria Año 2019			
Mes/Month	Ts Max./Max. Ts	Día/Day	Hora/Hour
Enero/January	20.3	1	15
Febrero/February	19.7	11	19
Marzo/March	19.8	31	17
Abril/April	20.1	17	01
Mayo/May	20.6	31	17
Junio/June	22.6	27	18
Junio/June	22.6	27	15
Julio/July	22.2	20	16
Julio/July	22.2	29	18
Agosto/August	23.1	21	14
Septiembre/September	23.7	22	17
Septiembre/September	23.7	5	15
Noviembre/November	23.3	14	14
Diciembre/December	21.6	2	14

Tabla 6.2: Temperaturas máximas para la boya de Gran Canaria en 2019. Fuente: Puertos del Estado

Boya de Gran Canaria Año 2019			
Mes/Month	Ts Min./Min. Ts	Día/Day	Hora/Hour
Enero/January	18.9	31	03
Febrero/February	18.6	4	09
Febrero/February	18.6	4	09
Marzo/March	18.4	23	23
Abril/April	18.8	11	03
Mayo/May	19.1	4	07
Junio/June	20.3	3	02
Julio/July	21.2	3	00
Agosto/August	21.6	1	05
Septiembre/September	21.9	4	07
Noviembre/November	20.6	29	07
Diciembre/December	20.6	13	12
Diciembre/December	20.6	13	12
Diciembre/December	20.6	13	14
Diciembre/December	20.6	13	11
Diciembre/December	20.6	13	12

Tabla 6.3: Temperaturas mínimas consideradas para la media anual. Fuente: Puertos del Estado

Boya de Gran Canaria Año 2019			
Mes/Month	Ts Max./Max. Ts	Día/Day	Hora/Hour
Enero/January	20.3	1	15
Febrero/February	19.7	11	19
Marzo/March	19.8	31	17
Abril/April	20.1	17	01
Mayo/May	20.6	31	17
Junio/June	22.6	27	18
Junio/June	22.6	27	18
Julio/July	22.2	20	16
Julio/July	22.2	29	18
Agosto/August	23.1	21	14
Septiembre/September	23.7	22	17
Septiembre/September	23.7	5	15
Noviembre/November	23.3	14	14
Diciembre/December	21.6	2	14

Tabla 6.4: Temperaturas máximas consideradas para la media anual. Fuente: Puertos del Estado

6.5 Composición del agua de captación

Los principales tipos de agua que son tratados por una membrana OI se dividen, básicamente, en agua de mar, agua salobre, aguas residuales, agua municipal y agua de permeado OI. En el caso del agua de mar, se considera como estándar un valor de TDS = 35000 mg/L. Sin embargo, la concentración real de sólidos disueltos puede variar desde TDS = 7000 mg/L hasta TDS = 45000 mg/L. La composición puede ser estimada de manera proporcional a partir de la composición estándar del agua de mar, que se muestra en la tabla 6.5. La composición del agua salobre y del agua residual puede llegar a variar enormemente en composición, y por tanto no se tienen valores estandarizados.

Ion	Concentración
Calcio [mg/L]	420
Magnesio [mg/L]	1320
Sodio [mg/L]	10880
Potasio [mg/L]	400
Bario [mg/L]	0.03
Estroncio [mg/L]	10
Hierro [mg/L]	< 0.02
Manganeso [mg/L]	< 0.01
Sílice [mg/L]	2
Cloro [mg/L]	19800
Sulfato [mg/L]	2660
Flúor [mg/L]	1.3
Bromo [mg/L]	65
Nitrato [mg/L]	< 0.7
Bicarbonato [mg/L]	150
Boro [mg/L]	4-5
TDS [mg/L]	35000
pH [adim]	8.1 - 8.2 [adim]

Tabla 6.5: Composición estándar de agua de mar. Fuente: Lanxess (guía de diseño)

Para aumentar la precisión, en el caso ideal se realizaría un análisis químico del agua de captación concretamente en la ubicación seleccionada, ya que esto proporcionaría los valores más exactos. Sin embargo, dado el limitado alcance de este proyecto, esto último no ha sido posible.

Se utilizará, no obstante, un análisis químico realizado en Santa Cruz de Tenerife por el laboratorio LABAQUA (tabla 6.6), que se considera lo suficientemente aproximado a los valores reales de composición del agua de mar en Gallar, Gran Canaria. Se asume que dicha aproximación no dará lugar a errores significativos en lo referente a los resultados finales de potencia específica de la planta.

Ión	Concentración
Calcio [mg/L]	431
Magnesio [mg/L]	1470
Sodio [mg/L]	11870
Potasio [mg/L]	451
Bario [mg/L]	0.017
Estroncio [mg/L]	10
Hierro [mg/L]	0.025
Manganeso [mg/L]	0.003
Sílice [mg/L]	1.1
Cloro [mg/L]	21280
Sulfatos [mg/L]	3148
Flúor [mg/L]	0.862
Bromo [mg/L]	0.5
Nitratos [mg/L]	0.7
Bicarbonatos [mg/L]	141.5
Boro [mg/L]	5.23
Cobalto [mg/L]	0,002
Cromo [mg/L]	0,002
pH [adim]	8

Tabla 6.6: Composición del agua de mar en Sta. Cruz de Tenerife. Fuente: Laboratorio Labaqua

La cantidad de sólidos disueltos totales (TDS) es obtenida automáticamente por el software de diseño (figura 6.5) a partir de los valores introducidos. En la tabla 6.7 se realiza una comparación entre el análisis de Labaqua y los valores estándar. La mayor desviación se produce para el bromo, bastante menor al caso típico. Consultando otras fuentes (figura 6.6), se llega a la misma conclusión.

No obstante, se tomarán los datos de la tabla 6.6 como válidos, dado el limitado alcance del presente proyecto y la falta de recursos para conocer con exactitud a qué se debe dicha variación y/o realizar un nuevo análisis del agua para confirmar los datos.

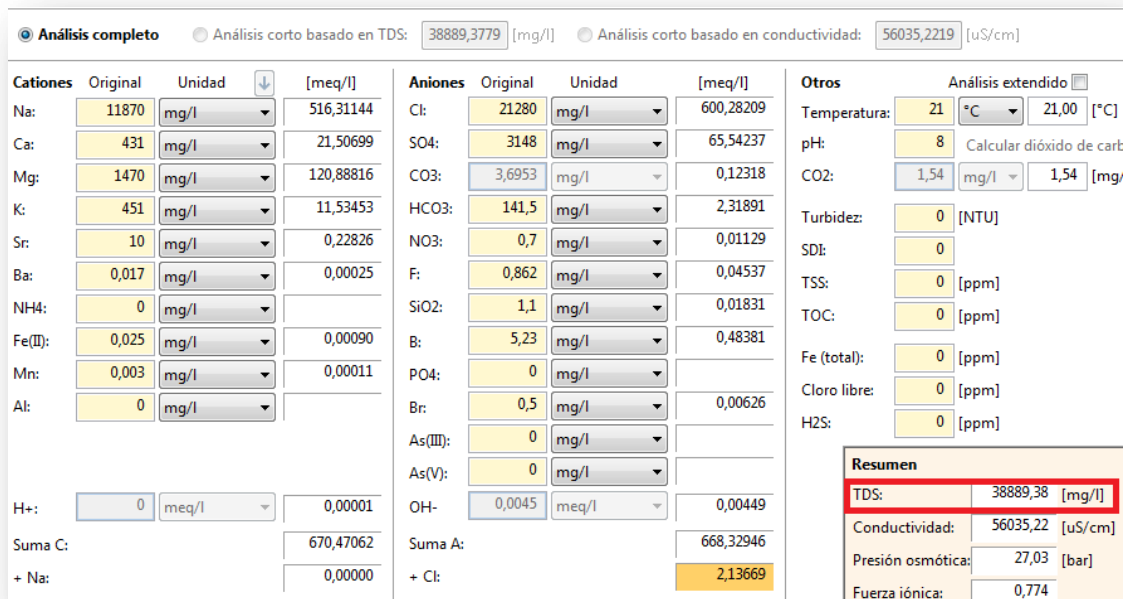


Figura 6.5: Análisis de agua introducido en el software. Fuente: LewaPlus

Parámetro	Intervalos de referencia
Temperatura, °C	15 – 35
pH	7,9 – 8,1
Sales disueltas, mg/L	30.000 – 45.000
Conductividad, µS/cm (a 20 °C)	44.000 – 58.000
Bicarbonatos, mg/L	120 – 170
Sulfatos, mg/L	2.425 – 3.000
Cloruros, mg/L	17.500 – 21.000
Bromuros, mg/L	59 – 120
Nitratos, mg/L	0,001 – 4,0

Figura 6.6: Intervalos de referencia de la composición del agua de mar. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)

	Estándar	Labauca	Desviación [%]
Calcio [mg/L]	420	431	3%
Magnesio [mg/L]	1320	1470	11%
Sodio [mg/L]	10880	11870	9%
Potasio [mg/L]	400	451	13%
Bario [mg/L]	0.03	0.017	-43%
Estroncio [mg/L]	10	10	0%
Hierro [mg/L]	0.02	0.025	25%
Manganeso [mg/L]	0.01	0.003	-70%
Sílice [mg/L]	2	1.1	-45%
Cloro [mg/L]	19800	21280	7%
Sulfato [mg/L]	2660	3148	18%
Flúor [mg/L]	1.3	0.862	-34%
Bromo [mg/L]	65	0.5	-99%
Nitrato [mg/L]	0.7	0.7	0%
Bicarbonato [mg/L]	150	141.5	-6%
Boro [mg/L]	5	5.23	5%
TDS [mg/L]	35000	38889	11%
pH [adim]	8.1	8	-1%

Tabla 6.7: Desviación respecto a composición de agua de mar estándar. Elaboración propia

6.6 Límites en la composición del agua de captación para consumo humano

Se incluyen los parámetros límite establecidos en Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano en cuanto a parámetros microbiológicos (tabla 6.9), químicos (tablas 6.10 y 6.11) e indicadores (tabla 6.12).

Para los parámetros microbiológicos, aunque no han sido medidos, se efectuarán tratamientos al agua para eliminar todos los posibles microorganismos.

En cuanto a los parámetros químicos e indicadores, se indican en un recuadro rojo aquellos parámetros para los cuales disponemos datos, asumiendo así que el resto

de valores es nulo y/o cumple con las recomendaciones tras efectuar el postratamiento. Se muestra en la tabla 6.8 un resumen con dichos parámetros seleccionados:

	Valor límite
Sodio	< 200 mg/L
Cloruro	< 250 mg/L
Sulfatos	< 250 mg/L
Nitratos	< 50mg/L
Fluoruros	< 1.5mg/L
Boro	< 1 mg/L
Amonio	< 0.5 mg/L
pH	€ [6.5,9.5]

Tabla 6.8: Criterios de calidad del agua de consumo humano. Fuente: RD 140/2003, de 7 de febrero

Parámetro	Valor paramétrico	Notas
1. Escherichia coli	0 UFC en 100 ml	
2. Enterococo	0 UFC en 100 ml	
3. Clostridium perfringens (incluidas las esporas)	0 UFC en 100 ml	1 y 2

Tabla 6.9: Parámetros microbiológicos. Fuente: RD 140/2003, de 7 de febrero

Parámetro	Valor paramétrico	Notas
28. Acrilamida	0,10 µg/l	1
29. Epiclorhidrina	0,10 µg/l	1
30. Cloruro de vinilo	0,50 µg/l	1

Tabla 6.10: Parámetros químicos que se controlan según las especificaciones del producto. Fuente: RD 140/2003, de 7 de febrero

Parámetro	Valor paramétrico
4. Antimonio	5,0 µg/l
Hasta el 31/12/2003	10,0 µg/l
5. Arsénico	10 µg/l
Hasta el 31/12/2003	50 µg/l
6. Benceno	1,0 µg/l
Hasta el 31/12/2003	- µg/l
7. Benzo(α)pireno	0,010 µg/l
8. Boro	1,0 mg/l
9. Bromato:	
A partir de 01/01/2009	10 µg/l
De 01/01/2004 a 31/12/2008	25 µg/l
Hasta el 31/12/2003	- µg/l
10. Cadmio	5,0 µg/l
11. Cianuro	50 µg/l
12. Cobre	2,0 mg/l
13. Cromo	50 µg/l
14. 1,2-Dicloroetano	3,0 µg/l
Hasta el 31/12/2003	- µg/l
15. Fluoruro	1,5 mg/l
16. Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (HPA)	0,10 µg/l
Suma de:	
Benzo(b)fluoranteno	µg/l
Benzo(ghi)perileno	µg/l
Benzo(k)fluoranteno	µg/l
Indeno(1,2,3-cd)pireno	µg/l
17. Mercurio	1,0 µg/l
18. Microcistina	1 µg/l
Hasta el 31/12/2003	- µg/l
19. Níquel	20 µg/l
Hasta el 31/12/2003	50 µg/l
20. Nitrato	50 mg/l
21. Nitritos:	
Red de distribución	0,5 mg/l
En la salida de la ETAP/depósito 0,1 mg/l	0,1 mg/l
22. Total de plaguicidas	0,50 µg/l
23. Plaguicida individual	0,10 µg/l
Excepto para los casos de:	
Aldrín	0,03 µg/l
Dieldrín	0,03 µg/l
Heptacloro	0,03 µg/l
Heptacloro epóxido	0,03 µg/l
24. Plomo:	
A partir de 01/01/2014	10 µg/l
De 01/01/2004 a 31/12/2013	25 µg/l
Hasta el 31/12/2003	50 µg/l

Tabla 6.11: Parámetros químicos. Fuente: RD 140/2003, de 7 de febrero

Parámetro	Valor paramétrico	
31. Bacterias coliformes	0 UFC	En 100 ml
32. Recuento de colonias a 22 °C		
A la salida de ETAP	100 UFC	En 1 ml
En red de distribución	Sin cambios anómalos	
33. Aluminio	200	µg/l
34. Amonio	0,50	mg/l
35. Carbono orgánico total	Sin cambios anómalos	mg/l
36. Cloro combinado residual	2,0	mg/l
37. Cloro libre residual	1,0	mg/l
38. Cloruro	250	mg/l
39. Color	15	mg/l Pt/Co
40. Conductividad	2.500	µS/cm ⁻¹ a 20 °C
41. Hierro	200	µg/l
42. Manganeseo	50	µg/l
43. Olor	3 a 25 °C	Índice de dilución
44. Oxidabilidad	5,0	mg O ₂ /l
45. pH:		
Valor paramétrico mínimo	6,5	Unidades de pH
Valor paramétrico máximo	9,5	Unidades de pH
46. Sabor	3 a 25 °C	Índice de dilución
47. Sodio	200	mg/l
48. Sulfato	250	mg/l
49. Turbidez: A la salida de ETAP y/o depósito	1	UNF
En red de distribución	5	UNF

Tabla 6.12: Parámetros indicadores. Fuente: Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero

6.7 Recomendaciones del fabricante

Lanxess recomienda un rango de valores para determinados parámetros de calidad del agua de alimentación y el concentrado (tabla 6.13), así como criterios de diseño en general (tabla 6.14).

Éstos serán comprobados automáticamente a través de su software de dimensionamiento (Lewaplust), mostrando un aviso en caso de que se sobrepasen los límites indicados.

PARAMETER	UNIT	VALUE
Feed stream:		
Temperature	°C (°F)	< 45 (113)
pH (continuous operation)	-	2 – 11
Color	APHA	< 3
Turbidity	NTU	recommended < 0,2 max 1,0
SDI (Silt Density Index)	-	recommended < 3 max 5
TOC (Total Organic Carbon)	mg/L	< 3 *
COD (Chemical Oxygen Demand)	mgO ₂ /L mgKMnO ₄ /L	< 5 < 20
Metals (Fe, Mn, Al, others)	mg/L	< 0,05 each
Oil, grease	mg/L	< 0,01
Free chlorine	mg/L	recommended < 0,02 max 0,1
Reject (concentrate) stream:		
LSI (Langelier Saturation Index)	-	< 0 or < 2,5 **
SDSI (Stiff&Davis Saturation Index)	-	< 0 or < 2,5 **
Silica	mg/L	< 140 – 240 ***

Tabla 6.13: Calidad recomendada para la alimentación y el concentrado. Fuente: Lanxess

Feed Water Type	Average Permeate Flux (range) [l/m ² ·hr]	Lead Element Permeate Flux [l/m ² ·hr]	Concentrate Flow Rate per Vessel [m ³ /hr]	Feed Flow Rate per Vessel [m ³ /hr]	Pressure Drop per Vessel [bar]	Element Recovery Rate [%]	Salt Passage Increase [%]
Municipal Supply	23 (20-26)	< 31	8-inch: > 3.6 4-inch: > 0.7	8-inch: < 15 4-inch: < 2.8	< 2.0	< 15	> 10
Brackish Wells	27 (23-29)	< 34	8-inch: > 3.0 4-inch: > 0.6	8-inch: < 16 4-inch: < 3.2	< 3.0	< 20	> 10
Surface Water Media Filtration	23 (20-26)	< 31	8-inch: > 3.6 4-inch: > 0.7	8-inch: < 15 4-inch: < 2.8	< 2.0	< 15	> 10
Surface Water MF/UF Filtration	27 (23-29)	< 34	8-inch: > 3.0 4-inch: > 0.6	8-inch: < 16 4-inch: < 3.2	< 3.0	< 20	> 10
Secondary Waste Media Filtration	17 (14-20)	< 24	8-inch: > 4.1 4-inch: > 0.8	8-inch: < 14 4-inch: < 2.6	< 2.0	< 12	> 15
Secondary Waste MF/UF Filtration	20 (17-23)	< 28	8-inch: > 3.6 4-inch: > 0.7	8-inch: < 14 4-inch: < 2.8	< 2.0	< 17	> 10
Seawater Intake Media Filtration	14 (11-17)	< 30	8-inch: > 3.6 4-inch: > 0.7	8-inch: < 14 4-inch: < 2.8	< 2.0	< 13	> 10
Seawater Intake MF/UF Filtration	17 (14-20)	< 35	8-inch: > 3.4 4-inch: > 0.7	8-inch: < 16 4-inch: < 3.0	< 3.0	< 15	> 10
Seawater Beach Wells	17 (14-20)	< 35	8-inch: > 3.4 4-inch: > 0.7	8-inch: < 16 4-inch: < 3.0	< 3.0	< 15	> 10
RO Permeate	37 (32-42)	< 48	8-inch: > 2.4 4-inch: > 0.5	8-inch: < 17 4-inch: < 3.6	< 3.0	< 30	> 5

Tabla 6.14: Criterios de diseño en función del tipo de agua de captación. Fuente: Lanxess

7. Análisis de soluciones

7.1 Ubicación

Se ha decidido, desde un primer momento, acotar el lugar de ubicación a las islas Canarias – motivado por el hecho de que se deben tener en cuenta diversas normativas, lo cual resulta más fácil más sencillo conocer en un ámbito local.

Para la selección de la ubicación final, se ha realizado un estudio previo en el anexo II, considerando el balance hidrológico y el recurso renovable de cada una de las islas Canarias.

Así, a partir de los datos obtenidos de la última actualización del Plan Hidrológico de cada isla (tabla 3.3), se ha descartado ubicar la planta en las islas de La Palma, La Gomera, y El Hierro, dado su nulo o muy bajo déficit de recursos hídricos naturales; así como la isla de Tenerife, al ser, de las opciones restantes, la que menor dependencia tiene de la desalación.

En cuanto al recurso renovable, sabiendo que tanto la energía solar como la eólica consiguen destacar frente a las demás en cuanto a su potencial de implantación en Canarias, desde un principio se pretende utilizar una de éstas (o ambas) para abastecer a la instalación. Finalmente se decide emplear un parque eólico, ya que se requiere una menor superficie de instalación para la misma generación energética que mediante paneles solares. Para suplir la variabilidad del recurso eólico, tanto el parque eólico como la EDAM se apoyarán en la red.

Al tomar en cuenta la velocidad media anual del viento en las zonas más favorables de las tres islas con mayor déficit de recursos hídricos (tabla 7.4), se observa que todas disponen de zonas con recurso eólico suficiente para poder abastecer una instalación de desalación por ósmosis inversa de mediana capacidad. Este criterio, por tanto, no resulta suficiente para la toma de una decisión final, por lo que se decide realizar un análisis más profundo en el anexo II.

En este estudio, se buscan alternativas de ubicación para la planta que cumplan simultáneamente las condiciones de suelo urbanizable fuera de espacios naturales protegidos, próximo a zonas con recurso eólico aceptable y alejado de otras EDAM de mediana o gran capacidad. Para ello se crean múltiples capas en el visor Grafcan, que sirven a modo de filtros solapados entre sí con el objetivo de facilitar la búsqueda de posibles lugares para la ubicación de la EDAM.

Para esta combinación de criterios se han encontrado tres zonas en Gran Canaria, tres zonas en Fuerteventura y una zona en Lanzarote, existiendo así un total de 7 alternativas de ubicación (figs. 7.1 a 7.9), detalladas en el anexo II.

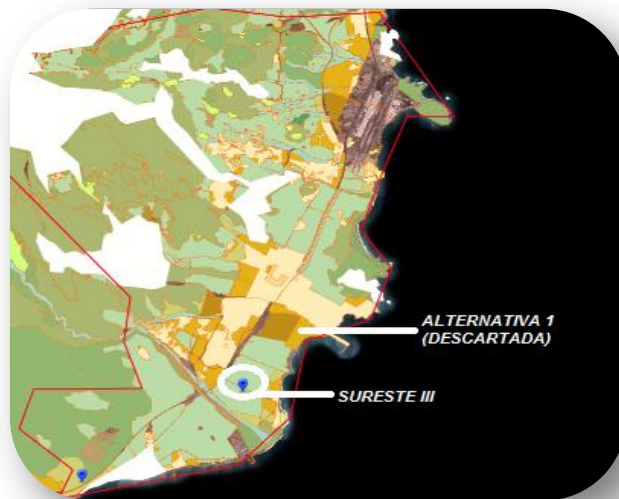


Figura 7.1: Alternativa 1 (Gran Canaria). Fuente: Grafcan

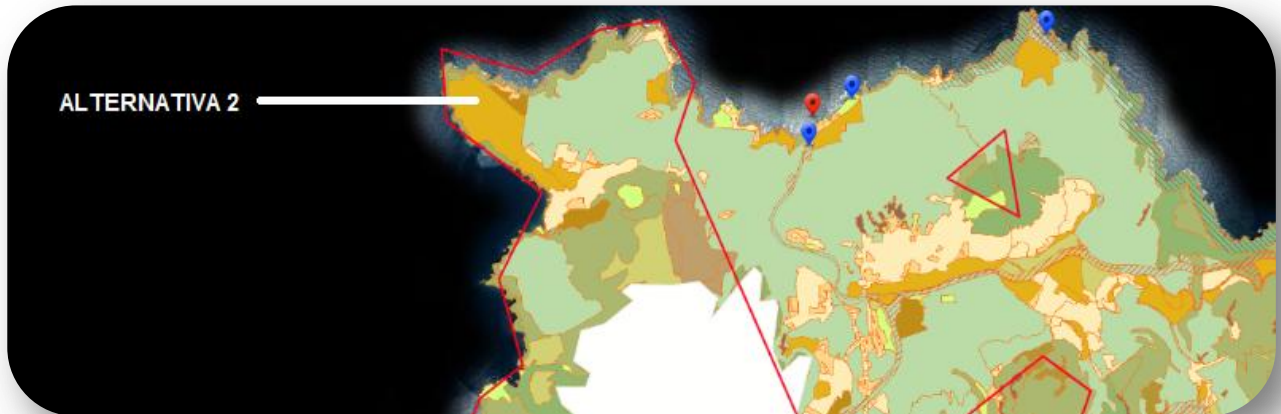


Figura 7.2: Alternativa 2 (Gran Canaria). Fuente: Grafcan



Figura 7.3: Alternativa 3 (Gran Canaria). Fuente: Grafcan

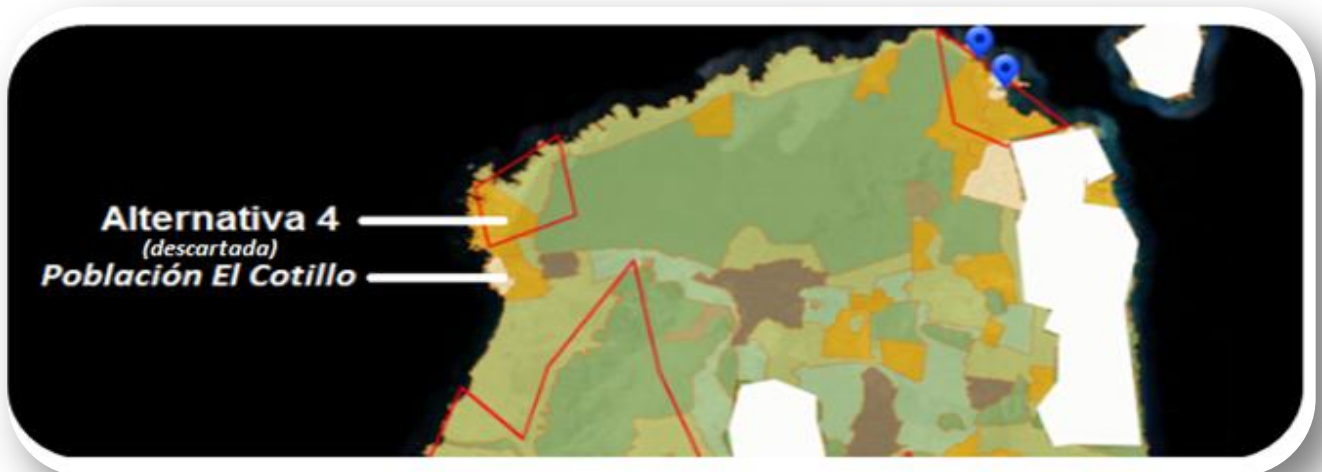


Figura 7.4: Alternativa 4 (Fuerteventura). Fuente: Grafcan

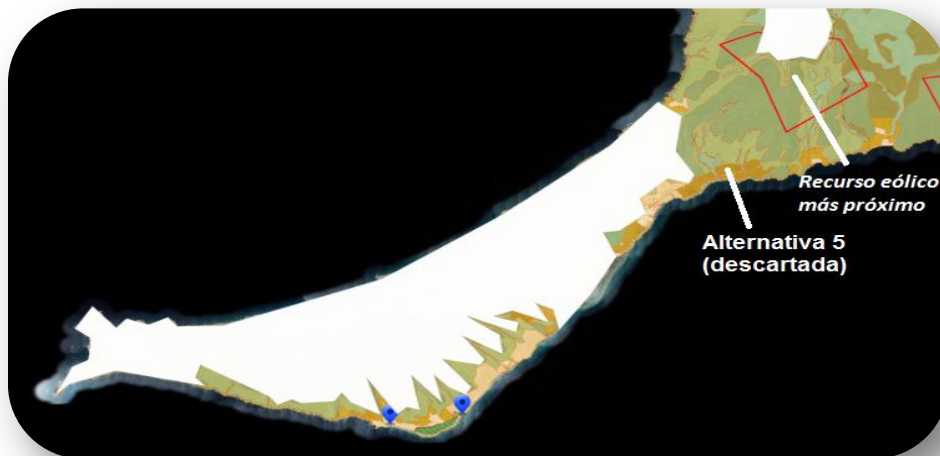


Figura 7.5: Alternativa 5 (Fuerteventura). Fuente: Grafcan

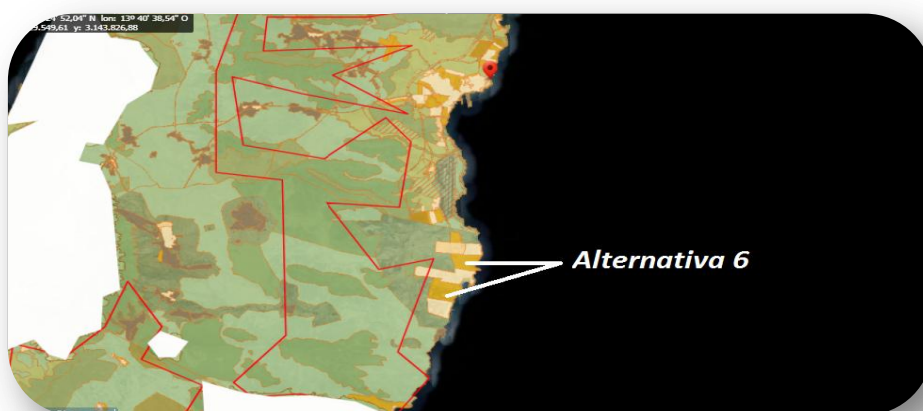


Figura 7.6: Alternativa 6 (Fuerteventura). Fuente: Grafcan

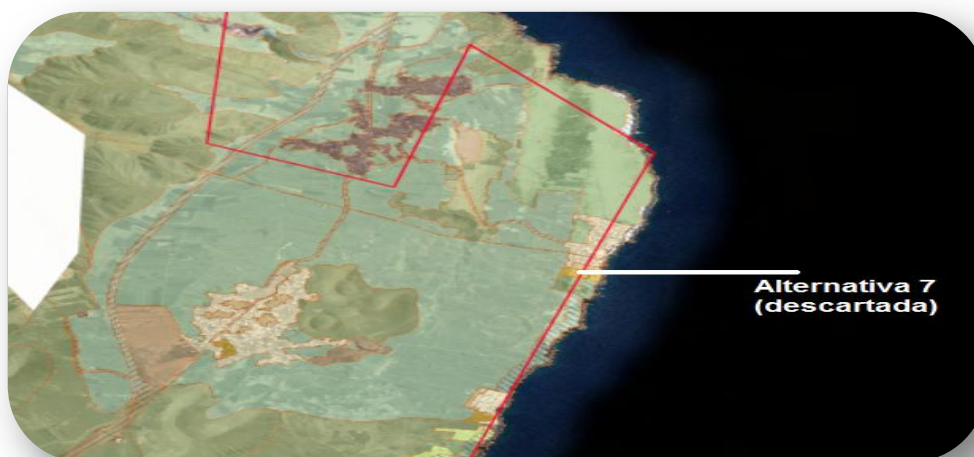


Figura 7.7: Alternativa 7 (Lanzarote). Fuente: Grafcan

Entre los motivos de descarte de unas alternativas frente a otras, se encuentra la cantidad de población circundante a abastecer, la proximidad al recurso eólico y otras EDAM, y el uso del suelo según los datos del catastro.

Tras una comparación final entre las alternativas encontradas (tabla 7.1), se concluye ubicar la planta en la alternativa 2: correspondiente al municipio de Gáldar, Gran Canaria (concretamente en 'Barranquillo del Vino'). En esta zona se decidió, en función de los usos del suelo y la información obtenida por la sede del catastro, colocar la desaladora, los pozos y el aerogenerador (figs. 7.8 y 7.9)

Ubicación	Velocidad media anual del viento	Distancia EDAM-aerogenerador	Ordenación del territorio	Capacidad de la planta [m ³ /día]
Gran Canaria (Alternativa 2)	8.5m/s	<1 km	Suelo urbanizable sectorizado ordenado	3000
Fuerteventura (Alternativa 6, opción A)	7.5m/s	4km	Suelo de protección agraria	2000
Fuerteventura Alternativa 6: (opción B)	8.5m/s	33km	Suelo rural común	
Fuerteventura Alternativa 6: (opción C)	7m/s	36km	Suelo apto para urbanizar	

Tabla 7.1: Potenciales alternativas de ubicación seleccionadas. Elaboración propia.



Figura 7.8: Suelo urbanizable en la alternativa finalmente seleccionada. Fuente: Grafcan

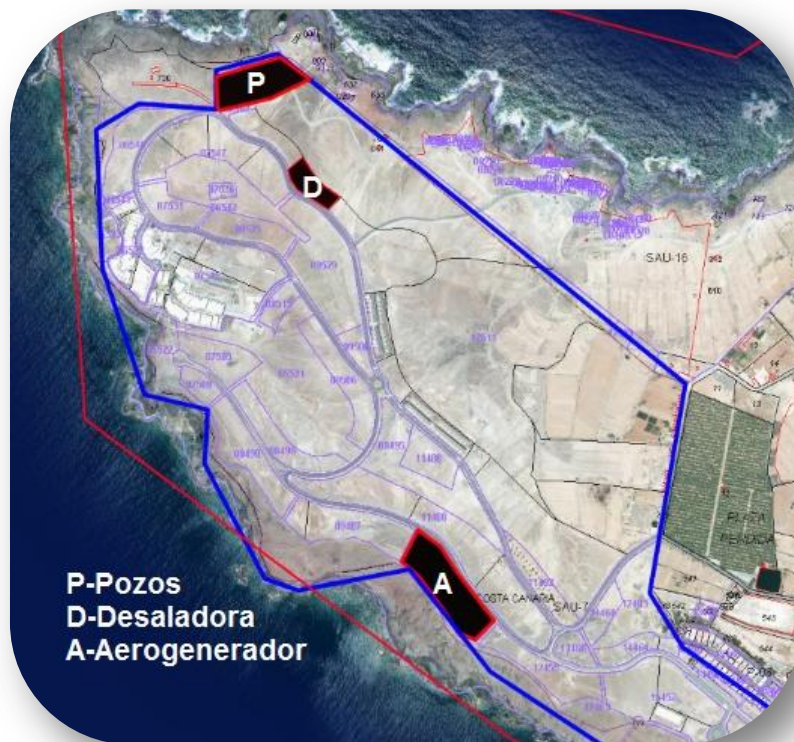


Figura 7.9: Pozos, desaladora y parque eólico ubicados en el terreno. Fuente: Grafcan

7.2 Capacidad de producción

Dado que el caudal de permeado de la EDAM se ha decidido usar como abastecimiento de agua para consumo humano, en primer lugar se buscaron núcleos poblacionales cercanos a la EDAM a los que satisfacer. Éstos serán Puerto de Sardina, Barrial y Gáldar capital.

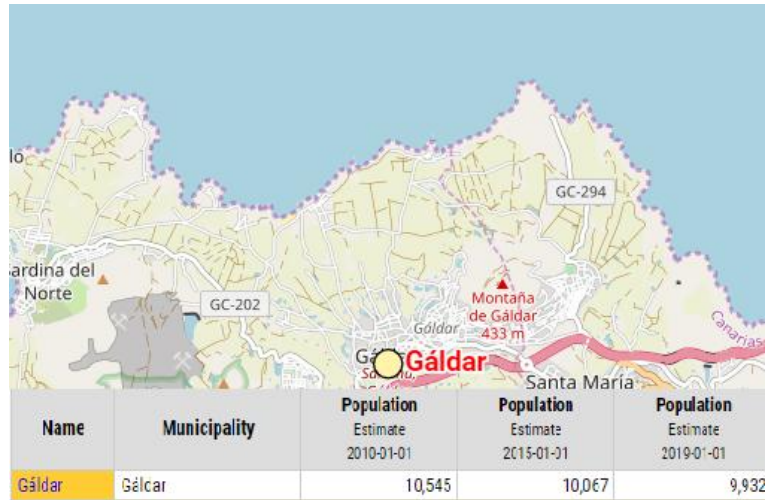


Figura 7.10: Población en Gáldar capital. Fuente: citypopulation.de

Sobre estas localidades se obtuvieron datos sobre la población actual y la variación anual de población, así como el consumo medio de agua en hogares por habitante (fig. 7.10). Con esta información, se estimó el caudal de agua total necesario hacia 2025 (tabla 7.2). Y para tener en cuenta posibles variaciones en cuanto a la población o al consumo de agua respecto a lo estimado, finalmente se decidió ampliar a 3.000 m³/día la capacidad de producción o caudal de permeado necesario – valor típico para una EDAM de tamaño medio.

	Puerto de Sardina (hab)	Barrial (hab)	Galdar capital (hab)	Total (hab)	Consumo (l/hab*día)	Capacidad mínima (m ³ /día)
2019	2897	2058	9932	14887	186	2769
2020	2885	2065	9898	14848	186	2762
2021	2873	2072	9865	14809	186	2755
2022	2862	2078	9831	14771	186	2747
2023	2850	2085	9798	14733	186	2740
2024	2838	2092	9764	14695	186	2733
2025	2826	2099	9731	14657	186	2726

Tabla 7.2: Estimación de la capacidad mínima de la planta. Elaboración propia.

7.3 Configuración del bastidor de membranas

El diseño de la configuración del bastidor de membranas requiere tomar decisiones, entre otros, sobre el fabricante y modelo de membrana, número de

membranas por tubo de presión, número de tubos de presión por etapa, número de etapas por paso y número de pasos. Se explican con detalle las decisiones para su dimensionamiento en el anexo III, y los conceptos teóricos que motivan algunas de estas decisiones en el anexo I.

Se ha seleccionado al fabricante Lanxess, que ofrece seis modelos de membranas especialmente diseñadas para la desalación mediante ósmosis inversa con agua de mar, de poliamida y con diseño en espiral (tabla 7.3). Tras un estudio en mayor profundidad de su catálogo de membranas y guía de diseño, se fijan una serie de parámetros que son conocidos o se pueden conocer de antemano.

Nombre comercial	Caudal de permeado medio [mínimo]	Rechazo de sales medio [mínimo]	Rechazo de boro típico
Lewabrane RO S085 HR	5.2 m ³ /d [4.2 m ³ /d]	99.8 % [99.6 %]	93.0 %
Lewabrane RO S085 HF	7.2 m ³ /d [5.8 m ³ /d]	99.8 % [99.6 %]	92.0 %
Lewabrane RO S400 HR	24.6 m ³ /d [19.7 m ³ /d]	99.8 % [99.5 %]	93.0 %
Lewabrane RO S400 HF	34.1 m ³ /d [27.3 m ³ /d]	99.8 % [99.6 %]	92.0 %
Lewabrane RO S440 HR 4040	27.3 m ³ /d [21.8 m ³ /d]	99.8 % [99.6 %]	93.0 %
Lewabrane RO S440 HF 4040	37.5 m ³ /d [30.0 m ³ /d]	99.8 % [99.6 %]	92.0 %

Tabla 7.3: Modelos y características de las membranas SWRO. Fuente: Lanxess

Se comienza con el análisis de composición del agua de alimentación o captación. Idóneamente, se realizaría un análisis químico del agua a captar, ya que esto proporcionaría los valores más precisos. Sin embargo, dado el limitado alcance de este proyecto, esto último no ha sido posible. Se ha utilizado, no obstante, un análisis químico del agua de mar en Santa Cruz de Tenerife, realizado por el laboratorio Labaqua, que se considera una aproximación aceptable a los valores promedio de composición del agua de mar (tabla 7.4), y en particular a la composición real que pudiera tener el agua en Gáldar, Gran Canaria. También se obtiene la temperatura media del agua de captación a partir de los datos estadísticos mensuales disponibles en la web de Puertos del Estado recabados para la boya de Gran Canaria en 2019.

Se continúa fijando otros parámetros a partir de las recomendaciones de la guía de diseño de Lewaplast (tabla 7.5) A partir de los valores límites del rango recomendado para el flujo de permeado medio, y realizando los cálculos pertinentes para obtener el número total de elementos, es posible descartar dos de los seis modelos disponibles (tabla 7.6): 085HF y 085HR, pues se requeriría un número total de membranas demasiado elevado – que se traduce en mayores requerimientos de espacio y tareas de mantenimiento.

	Estándar	Labaqua	Desviación [%]
Calcio [mg/L]	420	431	3%
Magnesio [mg/L]	1320	1470	11%
Sodio [mg/L]	10880	11870	9%
Potasio [mg/L]	400	451	13%
Bario [mg/L]	0.03	0.017	-43%
Estroncio [mg/L]	10	10	0%
Hierro [mg/L]	0.02	0.025	25%
Manganeso [mg/L]	0.01	0.003	-70%
Sílice [mg/L]	2	1.1	-45%
Cloro [mg/L]	19800	21280	7%
Sulfato [mg/L]	2660	3148	18%
Flúor [mg/L]	1.3	0.862	-44%
Bromo [mg/L]	65	0.5	-99%
Nitrato [mg/L]	0.7	0.7	0%
Bicarbonato [mg/L]	150	141.5	-6%
Boro [mg/L]	5	5.23	5%
TDS [mg/L]	35000	38889	11%
pH [adim]	8.1	8	-1%

Tabla 7.4: Desviación respecto a composición de agua de mar estándar. Elaboración propia

Feed Water Type	Average Permeate Flux (range) [l/m ² ·hr]	Lead Element Permeate Flux [l/m ² ·hr]	Concentrate Flow Rate per Vessel [m ³ /hr]	Feed Flow Rate per Vessel [m ³ /hr]	Pressure Drop per Vessel [bar]	Element Recovery Rate [%]	Salt Passage Increase [%]
Municipal Supply	23 (20-26)	< 31	8-inch: > 3.6 4-inch: > 0.7	8-inch: < 15 4-inch: < 2.8	< 2.0	< 15	> 10
Brackish Wells	27 (23-29)	< 34	8-inch: > 3.0 4-inch: > 0.6	8-inch: < 16 4-inch: < 3.2	< 3.0	< 20	> 10
Surface Water Media Filtration	23 (20-26)	< 31	8-inch: > 3.6 4-inch: > 0.7	8-inch: < 15 4-inch: < 2.8	< 2.0	< 15	> 10
Surface Water MF/UF Filtration	27 (23-29)	< 34	8-inch: > 3.0 4-inch: > 0.6	8-inch: < 16 4-inch: < 3.2	< 3.0	< 20	> 10
Secondary Waste Media Filtration	17 (14-20)	< 24	8-inch: > 4.1 4-inch: > 0.8	8-inch: < 14 4-inch: < 2.6	< 2.0	< 12	> 15
Secondary Waste MF/UF Filtration	20 (17-23)	< 28	8-inch: > 3.6 4-inch: > 0.7	8-inch: < 14 4-inch: < 2.8	< 2.0	< 17	> 10
Seawater Intake Media Filtration	14 (11-17)	< 30	8-inch: > 3.6 4-inch: > 0.7	8-inch: < 14 4-inch: < 2.8	< 2.0	< 13	> 10
Seawater Intake MF/UF Filtration	17 (14-20)	< 35	8-inch: > 3.4 4-inch: > 0.7	8-inch: < 16 4-inch: < 3.0	< 3.0	< 15	> 10
Seawater Beach Wells	17 (14-20)	< 35	8-inch: > 3.4 4-inch: > 0.7	8-inch: < 16 4-inch: < 3.0	< 3.0	< 15	> 10
RO Permeate	37 (32-42)	< 48	8-inch: > 2.4 4-inch: > 0.5	8-inch: < 17 4-inch: < 3.6	< 3.0	< 30	> 5

Tabla 7.5: Criterios de diseño en función del tipo de agua de captación. Fuente: Lanxess

Membrana	Área [m ²]	Flujo medio [lmh]	Nº membranas	Nº Tubos de presión	
				6 membranas/tubo	7 membranas/tubo
440HF Y 440HR	40.9	(14-20)	(153-218)	[26-36]	[22-31]
400 HF Y 400HR	37.2	(14-20)	(168-240)	[29-39]	[25-34]
085HF y 085HR	7.9	(14-20)	(791-1131)	[132-188]	[114-161]

Tabla 7.6: Número de tubos de presión para cada modelo de membrana. Elaboración propia

También se escoge el número de pasos (uno, dado que se considera suficiente para obtener la calidad del permeado deseado) y de etapas (también una, dado que se utilizará un sistema de desalación de agua de mar para una conversión típica). Se decide incorporar, además, un dispositivo de recuperación de energía isobárico para mejorar las prestaciones en cuanto al consumo de energía específico requerido por la instalación.

El resto de parámetros desconocidos: la conversión, el número de tubos de presión y el número de membranas por tubo, se comparan en diversos casos de estudio para cada modelo de membranas de tal manera que se cumplan todas las restricciones respecto a la calidad del agua producto y las recomendaciones del fabricante en cuanto al rango de valores recomendados para los distintos parámetros de diseño.

La calidad del agua producto viene determinada según los límites establecidos por 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*. Las recomendaciones del fabricante, que muestra avisos en su software de dimensionamiento (Lewaplust) en caso de incumplimiento, vienen establecidas en su guía de diseño.

A partir de los resultados obtenidos para los múltiples casos de estudio, se concluye que se obtienen valores óptimos globales de potencia específica para el modelo Lewabrane RO 400S HR, con la configuración de 45% de conversión, 7 membranas por tubo y 29 tubos de presión (tabla 7.7); optando finalmente por 28 tubos de presión tras tener en cuenta el pretratamiento del agua de alimentación.

Inicialmente se considera 40% de conversión al obtenerse, en principio, mejores resultados de consumo de energía específica, que es el parámetro de diseño prioritario en la selección. Sin embargo, tal y como se discute en el anexo III, una menor conversión también se traduce en mayores caudales para las bombas de captación o alimentación, lo que implica un consumo de energía asociada al bombeo mayor y con ello, un posible mayor consumo de energía global de toda la instalación. Por tanto, finalmente se opta por un término medio de conversión que minimice las posibles pérdidas.

Conversión	Configuración	Tubos de presión	Boro [mg/L]	Potencia específica [kW/m ³]
40%	6 membranas/tubo	36	0,99978	2,33
	7 membranas/tubo	31	0,99545	2,34
41%	6 membranas/tubo	35	0,98353	2,37
	7 membranas/tubo	30	0,97448	2,39
42%	6 membranas/tubo	35	0,99539	2,39
	7 membranas/tubo	30	0,98595	2,40
43%	6 membranas/tubo	34	0,97894	2,43
	7 membranas/tubo	30	0,99789	2,42
44%	6 membranas/tubo	34	0,99138	2,45
	7 membranas/tubo	29	0,97658	2,46
45%	6 membranas/tubo	33	0,97473	2,50
	7 membranas/tubo	29	0,98905	2,48
46%	6 membranas/tubo	33	0,98780	2,52
	7 membranas/tubo	28	0,96737	2,54
47%	6 membranas/tubo	32	0,97095	2,57
	7 membranas/tubo	28	0,98043	2,56
48%	6 membranas/tubo	32	0,98472	2,60
	7 membranas/tubo	28	0,99408	2,58
49%	6 membranas/tubo	32	0,99912	2,63
	7 membranas/tubo	27	0,97205	2,64
50%	6 membranas/tubo	31	0,98223	2,69
	7 membranas/tubo	27	0,98643	2,67

Tabla 7.7: Resultados para la membrana Lewabrane RO S400 HR. Elaboración propia

Sin embargo, la reducción del pH en la fase de pretratamiento del agua (indicada a posteriori) incrementará la concentración de boro en el permeado (fig. 7.11), lo que finalmente ha hecho necesario, con el fin de que se mantenga dentro de los límites indicados por la tabla 7.6, reducir un tubo de presión (fig 7.12) respecto a lo determinado anteriormente.

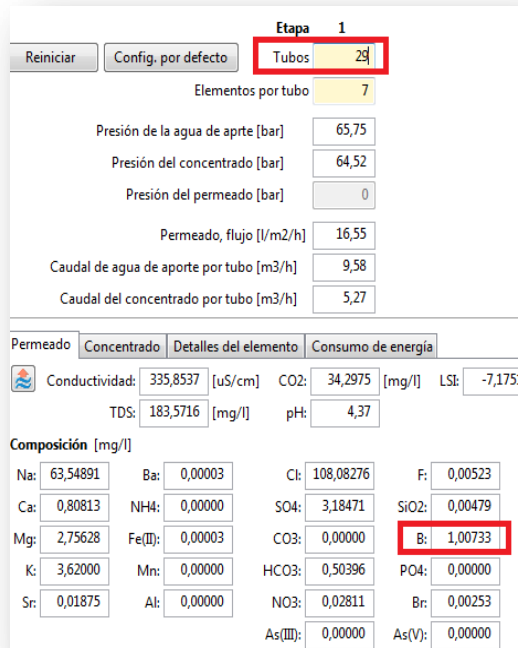


Figura 7.11: Composición del permeado previamente a la corrección del pH. Fuente: Lewaplus

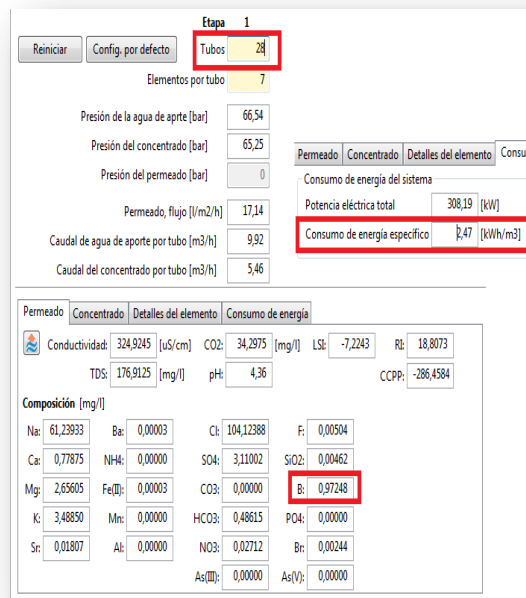


Figura 7.12: Composición del permeado tras la corrección del pH. Fuente: Lewaplus

En cuanto al ERD (dispositivo de recuperación de energía), se consultan dos fabricantes de remarcada reputación en este campo: Energy Recovery (fig. 7.13) y Danfoss (7.14). Tras simular las condiciones de la instalación con los datos conocidos y obtenidos anteriormente, se observa que se obtienen los mejores

resultados de consumo de energía específico con Energy Recovery – por lo cual se ha optado por éste.

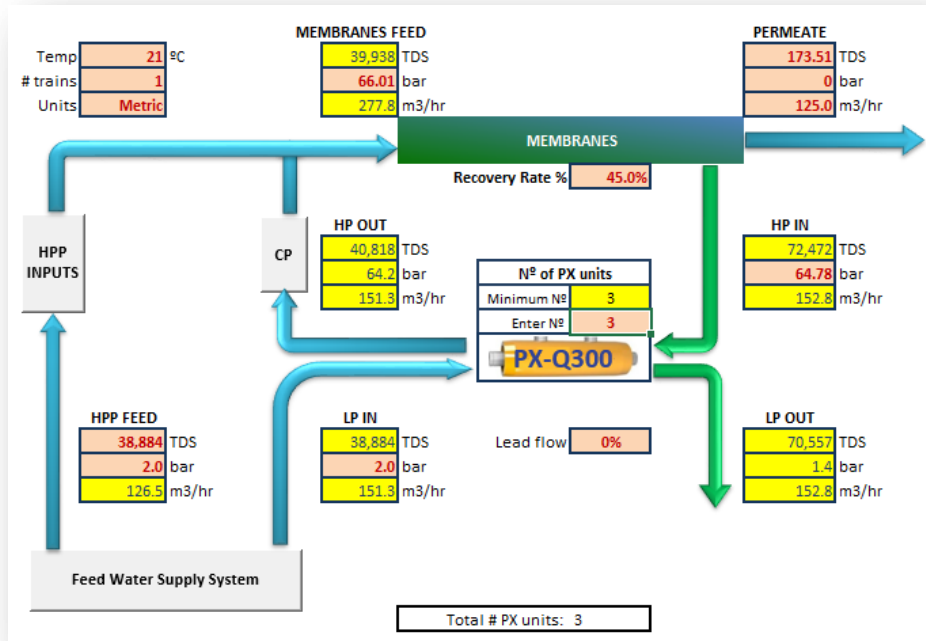


Figura 7.13: Datos introducidos para el dimensionamiento del ERD. Fuente: Energy Recovery

The screenshot shows the Danfoss iSave selection tool interface. The specific energy is calculated as **2.50 kWh/m³**. The interface includes a schematic of the ERD system with numbered nodes (1-8) and detailed data for pumps, membranes, and energy consumption.

Company: ULL
Project: TFG
 Alexander Hernández García

Specific energy: 2.50 kWh/m³

High pressure pump: Pump efficiency 80.9%, Motor efficiency 94.5%, VFD efficiency 100%, Power consumption 293.4 kW.

System feed pump: Pump efficiency -, Motor efficiency -, VFD efficiency -, Power consumption 0.0 kW.

Sea water: Salinity 38,884 ppm.

Membranes: Pressure 66.0 bar, Flow 277.8 m³/h, Salinity 39,869 ppm.

Permeate (8): Pressure 1.0 bar, Flow 125.0 m³/h, Salinity 173.51 ppm.

HP (6): Pressure 66.0 bar, Flow 149.0 m³/h, Salinity 40,758 ppm.

HP (7): Pressure 64.8 bar, Flow 152.8 m³/h, Salinity 72,347 ppm.

LP (2): Pressure 1.8 bar, Flow 149.0 m³/h, Salinity 38,884 ppm.

LP (3): Pressure 1.4 bar, Flow 152.8 m³/h, Salinity 70,519 ppm.

Input: Permeate flow (8) 3,000.00 m³/day, Recovery rate 45%, Feed pressure to membrane (6) 66.0 bar, Pressure drop (5-7) 1.2 bar, Brine discharge pressure (3) 1.4 bar, System feed pump pressure (1&2) 2 bar.

iSave: Size iSave50, Number of units 3, iSave unit HP inlet flow 50.9 m³/h, Salinity increase @ memb 2.5%, iSave total lubrication flow 3.75 m³/h, iSave total lubrication flow 2.5%, iSave efficiency 94.6%, iSave power savings 353.9 kW, iSave rotational speed 608 rpm, Motor efficiency 94.3%, VFD efficiency 100%, Power consumed 12.84 kW.

Total Energy Data: Choose currency Euro, Total power consumption 312.3 kW, Specific power consumption 2.50 kWh/m³, Specific cost 0.25 Euro/m³, Annual power cost 273,558 Euro/year, Annual power cost saving* 310,053 Euro/year, Energy Price 0.10 Euro/kWh.

Figura 7.14: Datos introducidos para el dimensionamiento del ERD. Fuente: Danfoss

7.4 Pretratamiento y postratamiento del agua

Para el pretratamiento físico del agua de alimentación, detallado también en el anexo III y explicado con detalle en sus aspectos teóricos en el anexo I, se opta por la solución típica en este tipo de instalaciones (tabla 7.8): filtros de arena y de cartucho, que permiten filtrar partículas de tamaño superior a 5 μm – que ocasionaría daños en las conducciones y las membranas.

Pretratamiento físico			
FASE	Tipo de filtro	Función	Pérdida de carga estimada
1	Filtros de arena	Filtración partículas >20 μm	1 bar
2	Filtros de cartuchos	Filtración partículas >5 μm	1 bar

Tabla 7.8: Dimensionamiento del pretratamiento físico. Elaboración propia

En cuanto al pretratamiento químico, con el objetivo de eliminar la actividad biológica, mantener un nivel de cloro aceptable, evitar el desgaste de las membranas, y evitar la precipitación de diversos compuestos químicos; se ha decidido emplear, de manera secuencial, una cloración para eliminar la actividad bacteriana, seguida de una decloración para proteger las membranas, emplear HCl para ajustar el pH, y finalmente incluir un dispersante o antiincrustante para garantizar que no ocurran incrustaciones (tabla 7.9).

Pretratamiento químico		
FASE	Tipo de tratamiento	Función
1	Cloración	Eliminar la actividad biológica
2	Decloración (mediante $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)	Reducir exceso de cloro producido en la fase anterior
3	Ajuste de pH a 6.5 (HCl 54,1mg/L)	Mantener el equilibrio químico del agua y prevenir la incrustación de carbonato de calcio
4	Dispersante / antiincrustante	Evitar la precipitación de BaSO_4 y CaF_2

Tabla 7.9: Dimensionamiento del pretratamiento químico. Elaboración propia

Y en cuanto al postratamiento del agua de permeado, se decidió usar el proceso por defecto del software de dimensionamiento de membranas, que adecúa algunos parámetros para el consumo de agua humano (fig. 7.15). Además, se decide incluir dos fases adicionales: una esterilización del agua mediante radiación UV (con motivo de prevenir la contaminación mediante microorganismos sin modificar la composición del agua) y como etapa final incluir filtros de lecho o carbón activado

para conseguir que el agua consumida por el usuario final sea insípida, inodora e incolora (tabla 7.10).

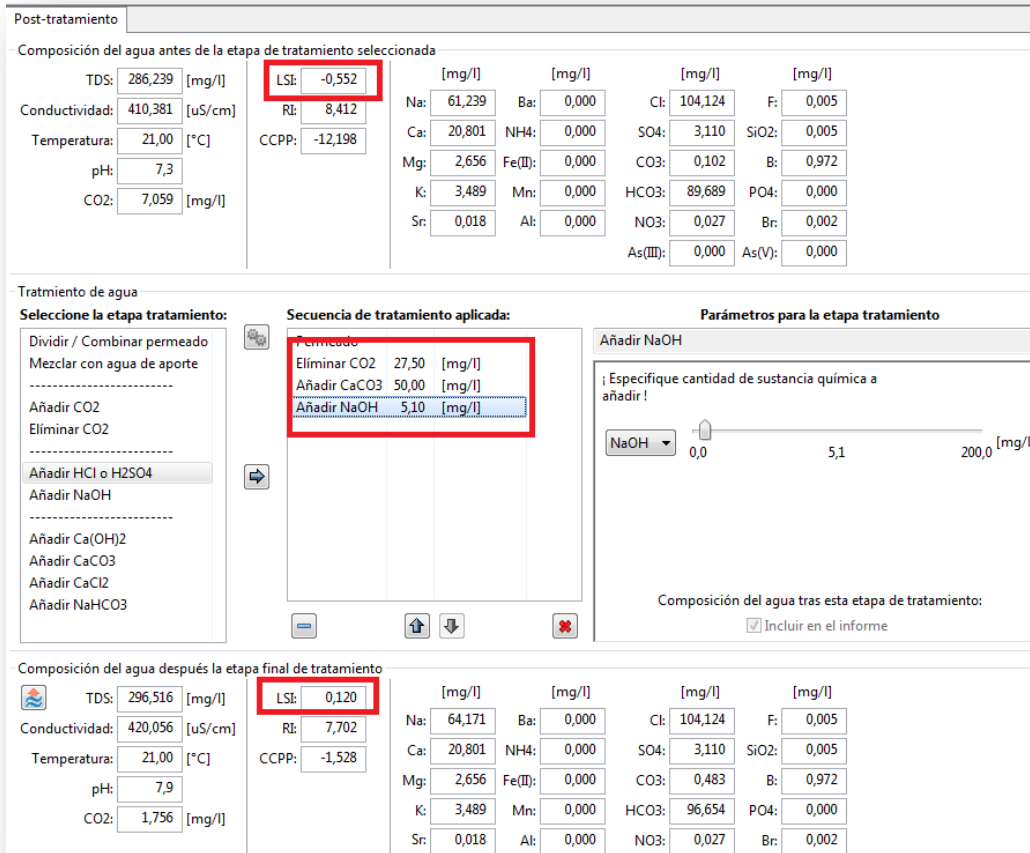


Figura 7.15: Postratamiento estándar. Fuente: LewaPlus

Postratamiento		
FASE	Tratamiento	Función
1	Eliminar CO2 hasta 27,5 mg/L	Preparación del permeado para fases posteriores
2	Añadir 50 mg/L de CaCO3	Incremento de la concentración de calcio Ajuste de pH al rango adecuado
3	Añadir 5,1 mg/L de NaOH	Mantener el agua en equilibrio químico, sin que sea corrosiva o con mayor facilidad para las incrustaciones
4	Esterilización mediante radiación UV	Prevenir contaminación mediante microorganismos
5	Filtros de lecho o carbón activado	Conseguir agua insípida, inodora e incolora

Tabla 7.10: Dimensionamiento del postratamiento. Elaboración propia

7.5 Sistema de captación

En cuanto al sistema de captación, detallado en el anexo IV, se optó por una toma cerrada mediante tres pozos de profundidad, uno de ellos usado como reserva, según una disposición en cruz (fig. 7.16).

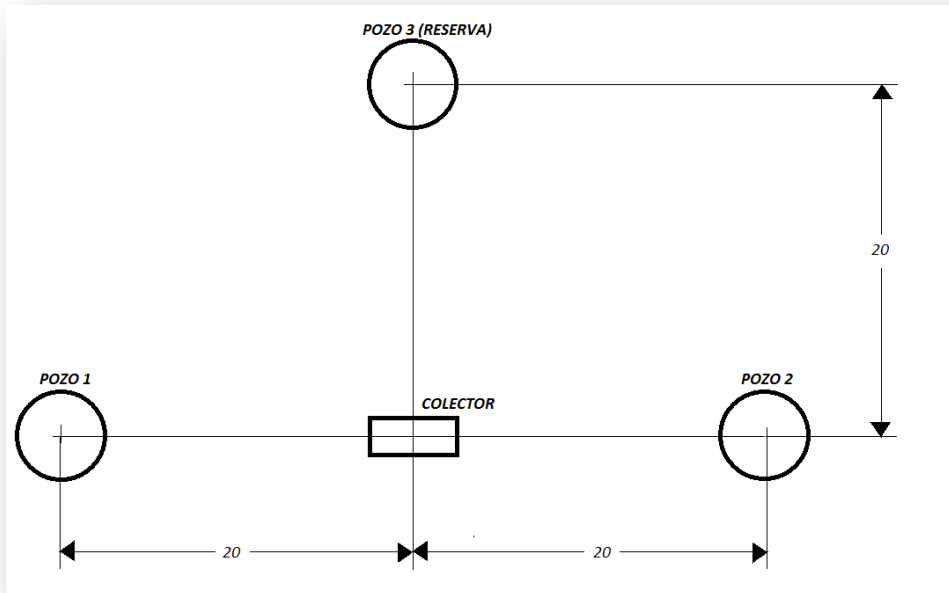


Figura 7.16: Disposición de los pozos de captación. Elaboración propia

Al ubicarlos en el terreno, se encontró que la cota respecto al nivel del mar sería mayor de lo esperado: 32 m, que teniendo en cuenta la bajamar máxima, pérdidas por cono de succión y filtración del terreno, así como un margen de seguridad para evitar la cavitación de la bomba, implicaría una profundidad total del pozo de 50 m (fig. 7.17)

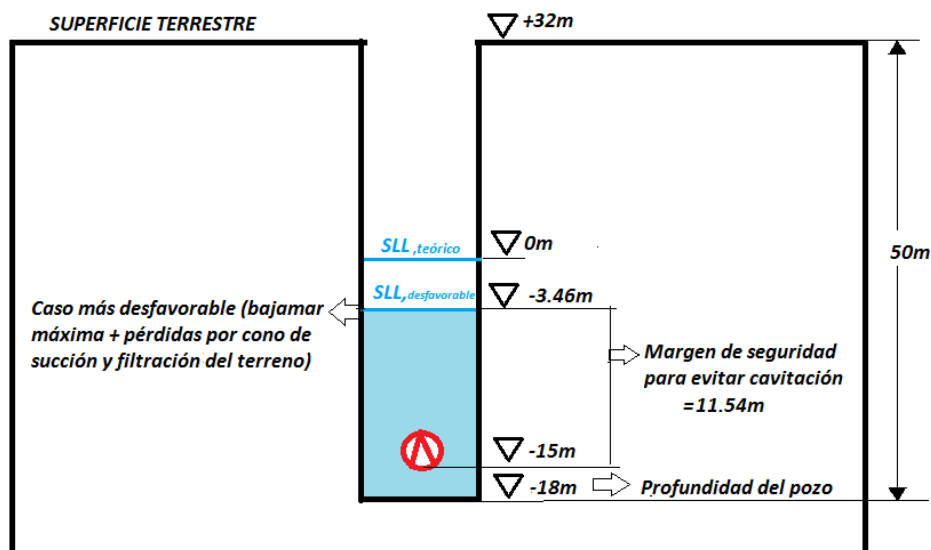


Figura 7.17: Esquema de los factores determinantes para la profundidad del pozo. Elaboración propia

7.6 Sistema de distribución

Este apartado también se detalla en el anexo IV. En primer lugar se ha buscado una posible ubicación para el depósito de regulación a partir del cual se suministrará, mediante gravedad, el agua producto a la población objetivo. Para ello ha sido necesario conocer la cota máxima de cada una de las localidades (tabla 7.11), lo cual ha sido posible mediante un análisis del perfil longitudinal del terreno en múltiples muestras a lo largo de cada región. Dicha cota máxima resulta ser 250m, encontrándose en Gáldar capital (fig. 7.18)

Población	Cota máxima [m]
Puerto de Sardina	100
Barrial	110
Gáldar (capital)	250

Tabla 7.11: Cota máxima a la que se sitúan las localidades a abastecer. Fuente: Goolzoom

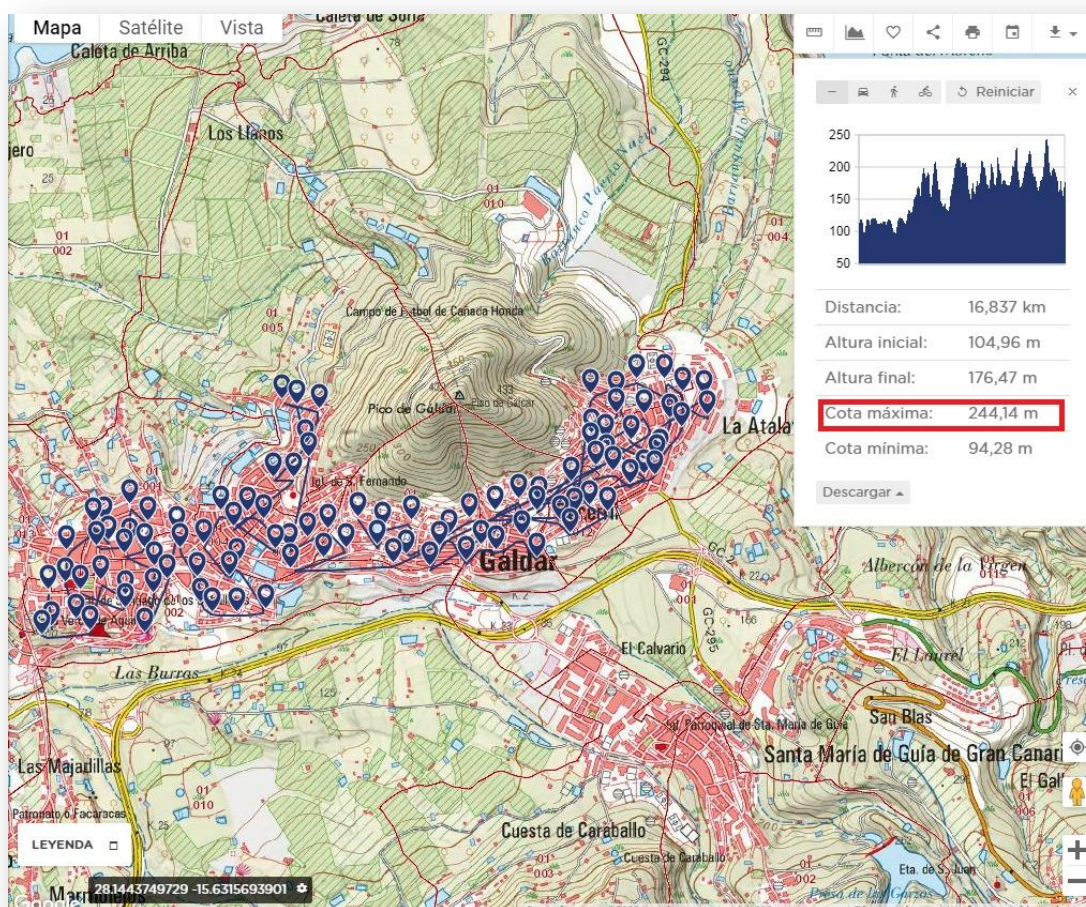


Figura 7.18: Cota máxima en Gáldar capital. Fuente: Goolzoom

Tras un análisis exhaustivo de los alrededores, se encuentra el inconveniente de que no existen lugares que simultáneamente cumplan la condición de estar cercanos a la EDAM, con suelo urbanizable y situados a una cota superior a 250m. Ante la falta de alternativas, se decide ubicar el depósito de distribución en Pico de Gáldar, a una cota de 273 m (fig. 7.19) y en una zona de suelo rústico de protección cultural (fig. 7.20). Se asume que podría ser viable, dado el beneficio a la población que supondría la EDAM y el bajo impacto ambiental que tendría colocar un depósito en esta zona, obtener un permiso del ayuntamiento para este fin.

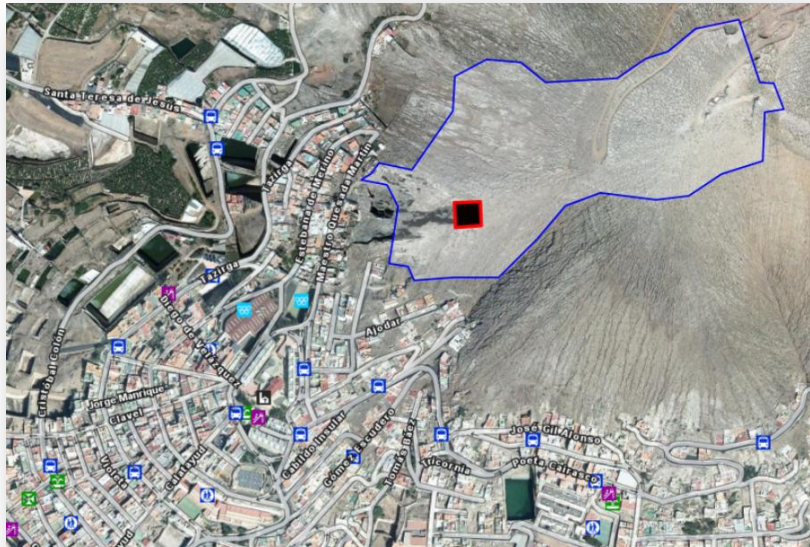


Figura 7.19: Ubicación exacta del depósito regulador en el terreno. Fuente: Grafcan



Figuras 7.20: Ordenación del territorio en Pico de Gáldar. Fuente: Grafcan

A continuación, se dimensionan las tuberías (tabla 7.12): determinando el material PRFV como el más adecuado por sus características mecánicas, así como calculando el diámetro mediante el criterio de Bonnet y midiendo la longitud mínima necesaria mediante los visores online Goolzoom y Grafcan. También se selecciona al fabricante Flowtite para el suministro de las mismas, por su remarcada reputación en este campo.

Tubería	Material	Fabricante	Ø_{comercial} [mm]	Longitud [m]
Captación (pozo 1)	PRFV	Flowtite	250	67
Captación (pozo 2)	PRFV	Flowtite	250	67
Captación (pozo 3)	PRFV	Flowtite	250	67
Alimentación	PRFV	Flowtite	350	200
Distribución	PRFV	Flowtite	250	10000
Rechazo	PRFV	Flowtite	250	1800

Tabla 7.12: Dimensionado final de las tuberías. Elaboración propia

Con estos datos se calculan las pérdidas de carga en las mismas (tabla 7.13), obteniendo las pérdidas primarias mediante la ecuación de Darcy Weisbach (y múltiples iteraciones en la ecuación de Colebrook para obtener el factor de fricción), y estimando las secundarias como un porcentaje de las primarias, teniendo en cuenta que serán inversamente proporcionales a la longitud del tramo debido a una menor 'densidad de accesorios'.

	H_{prim} [m]	H_{sec} [% respecto prim]	H_{total} [m]
Captación	0.14	20%	0.17
Alimentación	0.29	20%	0.35
Distribución	17.11	3%	17.62
Rechazo	4.47	10%	4.91

Tabla 7.13: Pérdidas de carga de las tuberías. Elaboración propia

7.7 Sistema de rechazo de salmuera

Como se explica en el Anexo IV, se ha decidido usar un emisario submarino que aleje lo suficientemente el rechazo de salmuera del lugar de captación del agua para que las concentraciones de sales de este último no se vean afectadas. Para ello se determinó, seleccionando la isóbata más cercana a partir de la capa de batimetría del visor online Grafcan (fig. 7.21), la profundidad y longitud idónea que tendría que tener la tubería del emisario submarino.

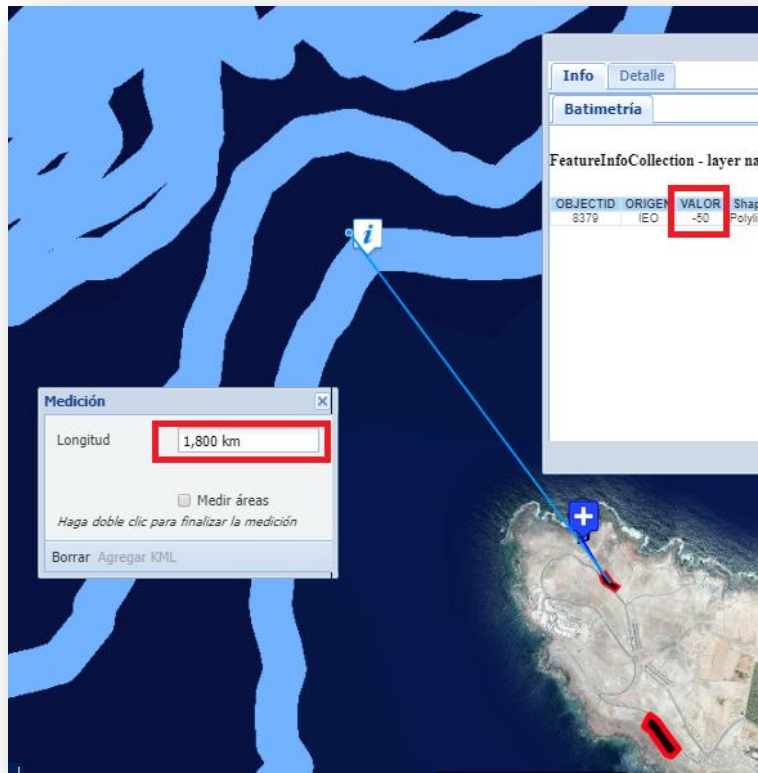


Figura 7.21: Longitud y profundidad necesarias para el emisario submarino. Fuente: Grafcan

7.8 Sistema de bombeo

El dimensionamiento del sistema de bombeo se detalla en el anexo V y la selección de las bombas disponibles en el mercado en el anexo VI.

En primer lugar se procede al cálculo de la altura útil (tabla 7.14) y de la altura neta de aspiración disponible de cada una de las bombas (tabla 7.15), cuyo esquema de funcionamiento se indica en la figura 7.22. Para ello se recogen e identifican todos los datos necesarios a introducir en las ecuaciones pertinentes. Con toda esta información (tabla 7.16), podemos proceder a la selección de bombas disponibles en el mercado

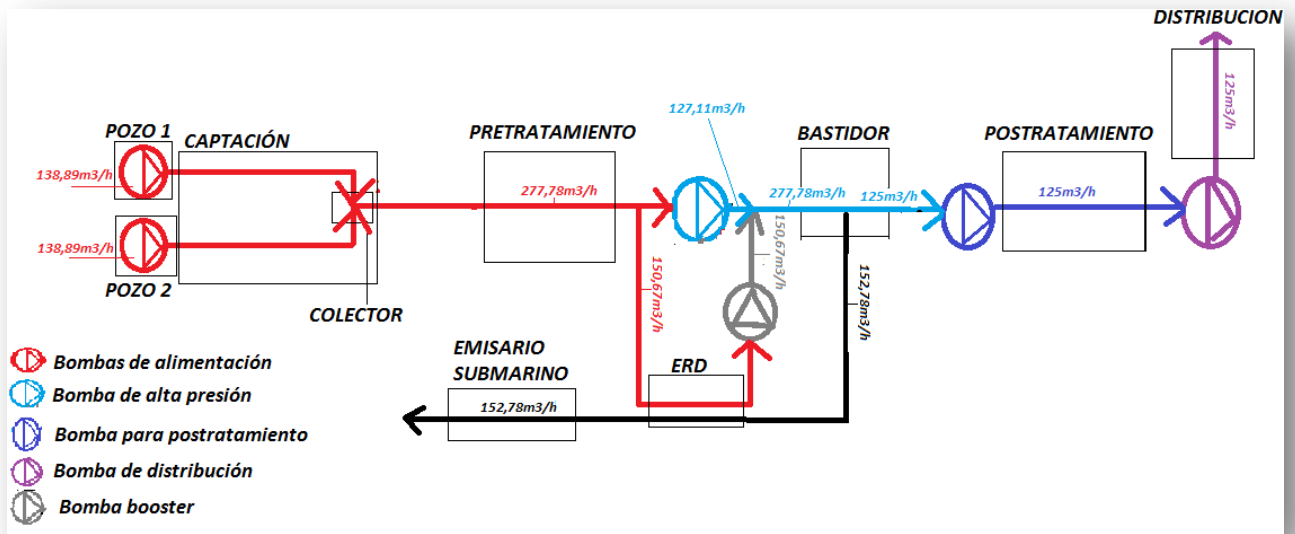


Figura 7.22: Esquema simplificado del sistema de bombeo. Elaboración propia

	H_{cota} [m]	$H_{cinética}$ [m]	$H_{presión}$ [m]	H_r [m]	H_b [m]
Bomba de alimentación	65	0	40,77	0,52	106,29
Bomba de alta presión	0	0	657,9	0	657,90
Bomba Booster	0	0	19,37	0	19,37
Bomba de distribución	244	0	0,0	17,62	261,62
Bomba de rechazo	-79	0	-12,08	4,91	-86,17
Bomba postratamiento	0	0	20,39	0	20,39

Tabla 7.14: Cálculo de la altura útil. Elaboración propia

	v_1 [m/s]	v_e [m/s]	p_1 [Pa]	p_s [Pa]	z_1 [m]	z_e [m]	NPSHd [m]
Bombas de alimentación	0	0,786	101325	2487	-3,46	-15	21,58
Bomba de alta presión	0	0	301325	2487	0	0	30,46
Bomba de distribución	0	0	101325	2487	0	0	10,08
Bomba Booster	0	0	6565325	2487	0	0	668,99
Bomba postratamiento	0	0	101325	2487	0	0	10,08

Tabla 7.15: Cálculo de NPSHd. Elaboración propia

	Q [m³/h]	H_b [m]	NPSH_d [m]
Bombas de alimentación	139	107	21
Bomba de alta presión	128	658	30
Bomba de postratamiento	125	21	10
Bomba de distribución	125	262	10
Bomba booster	151	20	656
Bomba de rechazo	No se requiere ($H_b < 0$)		

Tabla 7.16: Datos necesarios para el dimensionamiento de las bombas. Elaboración propia

En segundo lugar, tras el proceso de cálculo, se procede a la selección de bombas disponibles en el mercado (anexo VI), consultando 6 fabricantes de remarcada reputación a nivel mundial: Flowserve, Grundfos, KSB, Lowara, Sulzer y Wilo (fig. 7.23)



Figura 7.23: Fabricantes consultados. Fuente: Flowserve, Grundfos, KSB, Lowara, Sulzer y Wilo

Finalmente, optando siempre por el modelo que requiere un menor consumo de energía total, y obviando los costes económicos al encontrarse fuera del alcance de este proyecto, se llega a la selección definitiva de cada una de las bombas de la instalación (tablas 7.17 a 7.21), cuya ficha técnica se encuentra en el anexo VIII.

Fabricante	Modelo	Potencia absorbida [kW]	Rendimiento hidráulico [%]
Flowserve	-	-	-
Grundfos	SP 160-5	65,22	79,1
KSB	UPAS 250-135	49,04	82,8
Lowara	Z10150 03-L8W	55,6	81,7
Sulzer	XJ 900 HD	92,23	57,02
Wilo	K8.130	59,63	83,71

Tabla 7.17 Selección de la bomba de alimentación. Elaboración propia

Fabricante	Modelo	Potencia absorbida [kW]	Rendimiento hidráulico [%]
Flowserve	MSM-125-B	114,8	77,6
Grundfos	CRN 125-10	112,5	84,1
KSB	RPHb 100-350/2	134,93	65,97
Lowara	MPA100A/04A/BD1320	126,4	76,1
Sulzer	-	-	-
Wilo	K8.130	120,4	83,81

Tabla 7.18: Selección de la bomba de distribución. Elaboración propia

Fabricante	Modelo	Potencia absorbida [kW]	Rendimiento hidráulico [%]
Flowserve	3X10DMX -A	304	75,4
Grundfos	-	-	-
KSB	-	-	-
Lowara	MPAE100A/10A/	314,6	76,1
Sulzer	-	-	-
Wilo	-	-	-

Tabla 7.19: Selección de la bomba de alta presión. Elaboración propia

Fabricante	Modelo	Potencia absorbida [kW]	Rendimiento hidráulico [%]
Flowserve	VMB 25-15	10,1	81,1
Grundfos	NBE 65-125/144	10,83	81,3
KSB	Etaline 100-100-125	11,31	77,26
Lowara	NP 3153 HT 3	12,3	76,5
Sulzer	J 205 ND	22,92	58,27
Wilo	Atmos GIGA-N 100/250-11/4	10,59	84,64

Tabla 7.20: Selección de la bomba Booster. Elaboración propia

Fabricante	Modelo	Potencia absorbida [kW]	Rendimiento hidráulico [%]
Flowserve	4LR-11A	9,02	79,1
Grundfos	NBE 65-125/144	9,288	82,4
KSB	Etaline 100-100-125	8,1	82,8
Lowara	NP 3153 HT 3	10,4	74,6
Sulzer	XJC 110 ND	12,39	64,18
Wilo	Atmos GIGA-N 100/250-11/4	10,73	84,65

Tabla 7.21: Selección de la bomba de postratamiento. Elaboración propia

7.9 Consumo de energía total de la instalación

A partir de la energía total necesaria asociada al sistema de bombeo y teniendo en cuenta la capacidad de producción de la planta, se obtiene el consumo de energía de la instalación, que se corresponderá con la mínima generación de energía necesaria que debe aportarse el parque eólico (tabla 7.22). Como se puede comprobar, dicha energía será aproximadamente 4,65 GWh/año.

	Potencia absorbida [kW]	Consumo de energía específico [kWh/m ³]	Consumo de energía anual [kWh/año]	Contribución [%]
Alimentación(x2)	49,04x2=98,08	0,78	859180,8	18%
Distribución	112.5	0.90	985500	21%
Alta presión	304	2.43	2663040	57%
Booster	7.93	0.06	69466.8	1%
Postratamiento	9.02	0.07	79015.2	2%
Total	531.53	4.25	4656202.8	100%

Tabla 7.22: Consumo de energía de la instalación. Elaboración propia

7.10 Sistema de abastecimiento energético

Este apartado se desarrolla en profundidad en el anexo VII. Para la selección del aerogenerador se utiliza la herramienta online del Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), que automáticamente emplea la distribución de Weibull para el

recurso eólico según la ubicación escogida y la curva de potencia según el modelo de aerogenerador seleccionado para obtener así una estimación de la generación anual de energía.

En primer lugar se elabora una lista de todos los modelos existentes en la base de datos del ITC y se resaltan aquellos que se encuentran actualmente bajo producción según la web thewindpower.net, los cuales se resumen en la tabla 7.23

Modelo de aerogenerador	Altura de la góndola mín [m] – máx [m]	Potencia [Kw]
ENERCON E-44	45-55	900
ENERCON E-48	50-76	800
ENERCON E-82	78-138	2000
ENERCON E70 – 2300	57-113	2300
VESTAS V90/2000	95-125	2000

Tabla 7.23: Información sobre la potencia nominal y altura de la góndola. Fuente: TheWindPower.net

A continuación se realiza un estudio más pormenorizado de las características de los modelos actualmente existentes, y se obtiene mediante la herramienta del ITC la energía anual que se obtiene para la máxima y mínima altura de la góndola, empleando el número de unidades necesario que permita satisfacer al menos el 100% de la energía anual requerida por la EDAM (tabla 7.24)

Modelo	Unidades	Energía anual generada total [GWh/año]	
		Altura mínima	Altura máxima
ENERCON E-44	2	5,68702	5,806284
ENERCON E-48	2	6,179736	6,406532
ENERCON E-82	1	8,72847	9,086166
ENERCON E70 – 2300	1	7,615441	8,088049
VESTAS V90/2000	1	8,929844	9,091498

Tabla 7.24: Ajuste de unidades para garantizar exceso energético. Elaboración propia

Como primer criterio de selección, se calcula el exceso de energía anual generado por cada aerogenerador, que en principio interesa que sea mínimo (tabla 7.25). Como segundo criterio de selección, se calcula el factor de carga de cada aerogenerador (tablas 7.26 y 7.27), que da una idea de su aprovechamiento y por tanto se busca que sea máximo.

Modelo	Unidades	Exceso de energía anual generado [GWh/año]	
		Altura mínima	Altura máxima
<i>ENERCON E-44</i>	2	1,0308172	1,1500812
<i>ENERCON E-48</i>	2	1,5235332	1750329.2
<i>ENERCON E-82</i>	1	4,0722672	4,4299632
<i>ENERCON E70 – 2300</i>	1	2,9592382	3,4318462
<i>VESTAS V90/2000</i>	1	4,2736412	4,4352952

Tabla 7.25: Exceso energético respecto EDAM. Elaboración propia

Modelo de aerogenerador	FC [%]	Clasificación
<i>ENERCON E-44</i>	36%	Muy bueno
<i>ENERCON E-48</i>	44%	Excelente
<i>ENERCON E-82</i>	50%	Excelente
<i>ENERCON E70 – 2300</i>	38%	Muy bueno
<i>VESTAS V90/2000</i>	51%	Extraordinario

Tabla 7.26: Factor de carga para la altura mínima de góndola. Elaboración propia

Modelo de aerogenerador	FC [%]	Clasificación
<i>ENERCON E-44</i>	37%	Muy bueno
<i>ENERCON E-48</i>	46%	Excelente
<i>ENERCON E-82</i>	52%	Extraordinario
<i>ENERCON E70 – 2300</i>	40%	Excelente
<i>VESTAS V90/2000</i>	52%	Extraordinario

Tabla 7.27: Factor de carga para la altura máxima de góndola. Elaboración propia

Se opta por priorizar el primer criterio de selección frente al segundo, puesto que, si bien un mayor uso del potencial del aerogenerador es deseable, esto parte de la base de que el exceso energético sea aprovechado eficazmente. Ante la falta de datos más concretos, se desconoce si un mayor exceso energético resulta ventajoso de manera global.

Por tanto, al dar mayor importancia a la minimización del exceso energético se decide utilizar dos unidades ENERCON E-44, colocados a la menor altura de góndola. Se comprueba que cumplen las indicaciones del 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, en relación a la distancia que deben guardar los aerogeneradores entre sí y respecto al núcleo habitado más cercano (figs. 7.24 y 7.25)

Finalmente se proponen una serie de alternativas respecto a la utilización del exceso energético producido:

- Vender el exceso energético a la red eléctrica
- Generación de hidrógeno
- Bombeo hidráulico
- Compresión de aire
- Disipación (última prioridad)

La toma de una decisión final más concreta dependerá de las condiciones específicas del entorno, lo que requiere otro estudio en profundidad que queda fuera del alcance del presente proyecto.

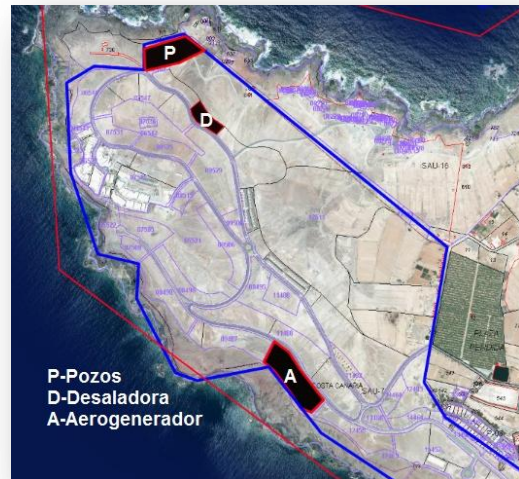
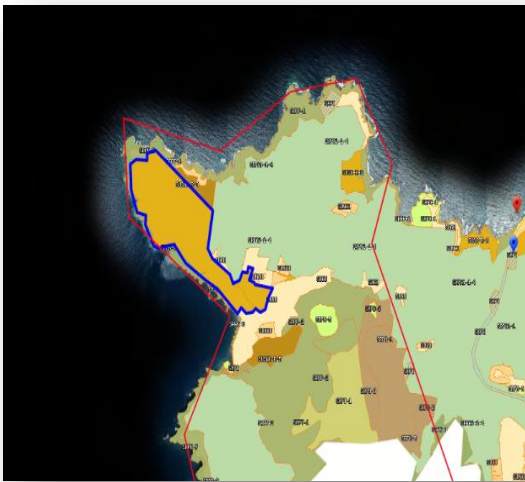


Figura 7.24 y 7.25: Distancia de los aerogeneradores entre sí (izq) y respecto al núcleo habitado más cercano (dcha), Fuente: Grafcan

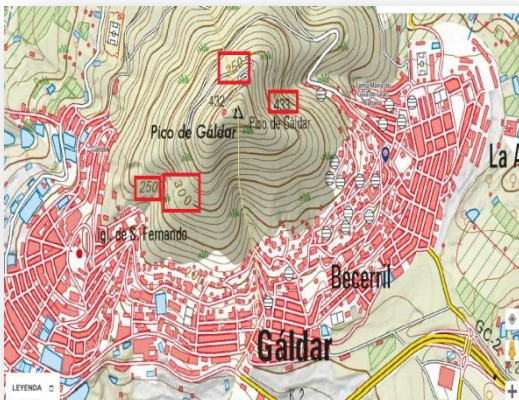
8. Resultados finales

8.1 Ubicación

Tras considerar las necesidades hídricas y el recurso eólico en Canarias, y tomando en cuenta la proximidad de otras instalaciones de desalación y la ordenación del territorio, se ha decidido que la planta se ubicará en Gran Canaria: en el municipio de Gáldar, en la zona conocida como 'Barranquillo del Vino'. Cercanamente a la misma se ubican los pozos y el parque eólico con dos aerogeneradores (figs. 8.1 y 8.2). En cuanto al depósito de distribución (figs. 8.3 y 8.4), se ubicará en Pico de Gáldar, a una cota de 300m respecto a nivel del mar y a 7,5 km de la EDAM. Véase anexos II y IV para más detalles.



Figuras 8.1 y 8.2: Región urbanizable seleccionada (izq) y ubicación exacta (dcha) Fuente: Grafcan



Figuras 8.3 y 8.4: Representación topográfica (izq.) y ubicación exacta (dcha). Fuente: Grafcan

8.2 Capacidad de producción

La planta producirá un caudal de permeado de 3.000 m³/día mediante ósmosis inversa, suficiente para satisfacer una población total estimada en los próximos 5 años de 2.726 habitantes, con un consumo medio de 186 litros por habitante y día, distribuidos en las localidades de Puerto de Sardina, Barrial y Gáldar capital. Véase anexo II para más detalles.

CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN (CAUDAL DE PERMEADO)	
Número estimado de habitantes a abastecer en 2025	2726 habitantes
Consumo medio de agua por habitante [l/hab*día]	186 l/hab*día
Consumo teórico de agua total [m ³ /día]	2726
Capacidad de producción de la EDAM [m ³ /día]	3000
Sistema de producción	Ósmosis Inversa

Figura 8.1: Capacidad de producción de la planta. Elaboración propia

8.3 Configuración del bastidor de membranas

Se utilizarán membranas del fabricante Lanxess, concretamente 28 tubos de presión con 7 membranas del modelo Lewabrane RO S400 HR en cada tubo. Como dispositivo de recuperación de energía se emplearán 3 unidades del modelo PX-Q300 del fabricante Energy Recovery. Véase anexo III para más detalles, y anexo VIII para conocer el informe final del software de dimensionamiento del bastidor de membranas, así como las correspondientes fichas técnicas.

BASTIDOR DE MEMBRANAS	
Fabricante de membranas	Lanxess
Modelo de membrana	Lewabrane RO S400 HR
Número de tubos de presión	28
Número de membranas por tubo de presión	7
Fabricante del dispositivo ERD	Energy Recovery
Modelo ERD y número necesario	PX-Q300 (3 unidades)

Figura 8.2: Configuración del bastidor de membranas. Elaboración propia

8.4 Pretratamiento y postratamiento del agua

Los tratamientos del agua: pretratamiento físico, pretratamiento químico y postratamiento se resumen en las tablas 8.3, 8.4 y 8.5 respectivamente. Véase anexo III para más detalles.

Fase	Tipo de tratamiento	Función	Pérdida de carga estimada
1	Filtros de arena	Filtración partículas >20 µm	1 bar
2	Filtros de cartuchos	Filtración partículas >5 µm	1 bar

Tabla 8.3: Pretratamiento físico. Elaboración propia

Fase	Tipo de tratamiento	Función
1	Cloración	Eliminar la actividad biológica
2	Decloración (mediante Na ₂ S ₂ O ₅)	Reducir exceso de cloro producido en la fase anterior
3	Ajuste de pH a 6.5 (mediante HCl 54,1mg/L)	Mantener el equilibrio químico del agua y prevenir la incrustación de carbonato cálcico
4	Dispersante / antiincrustante	Evitar la precipitación de BaSO ₄ y CaF ₂

Tabla 8.4: Pretratamiento químico. Elaboración propia

Fase	Tipo de tratamiento	Función
1	Eliminar CO ₂ hasta 27,5mg/L	Preparación del permeado para fases posteriores
2	Añadir 50mg/L de CaCO ₃	Incremento de la concentración de calcio Ajuste de pH al rango adecuado
3	Añadir 5,1mg/L de NaOH	Mantener el agua en equilibrio químico, sin que sea corrosiva o con mayor facilidad para las incrustaciones
4	Esterilización mediante radiación ultravioleta	Prevenir contaminación mediante microorganismos
5	Filtros de lecho o carbón activado	Conseguir agua insípida, inodora e incolora

Tabla 8.5: Postratamiento. Elaboración propia

8.5 Sistema de captación

Para la captación de agua de mar se emplearán tres pozos (toma cerrada), usando uno de ellos como reserva y en la disposición que se muestra en la figura 7.16. En la tabla 8.6 se muestra un resumen de los parámetros tenidos en cuenta para su dimensionado. Véase anexo IV para más detalles.

POZOS DE CAPTACIÓN	
Máxima altura sobre el nivel del mar [m]	32
Bajamar máxima [m]	1.46
Pérdidas de altura por filtración del terreno [m]	1
Pérdidas de altura por cono de succión [m]	1
Margen de seguridad para evitar cavitación [m]	11.54
Profundidad a la que debe situarse la bomba [m]	47
Profundidad total del pozo [m]	50

Tabla 8.6: Parámetros para conocer la profundidad del pozo de captación. Elaboración propia

8.6 Sistema de distribución

La ubicación del depósito de regulación se indica en la figura 8.4. Todas las tuberías serán de PRFV, suministradas por el fabricante Flowtite. Sus dimensiones se indican en la tabla 8.7. Véase anexo IV para más detalles.

Tubería	Material	Fabricante	\varnothing comercial [mm]	Longitud [m]
Captación (pozo 1)	PRFV	Flowtite	250	67
Captación (pozo 2)	PRFV	Flowtite	250	67
Captación (pozo 3)	PRFV	Flowtite	250	67
Alimentación	PRFV	Flowtite	350	200
Distribución	PRFV	Flowtite	250	10000
Rechazo	PRFV	Flowtite	250	1800

Tabla 8.7: Dimensionado final de las tuberías. Elaboración propia

8.7 Sistema de rechazo de salmuera

Para el drenaje de la salmuera se utilizará un emisario submarino, dimensionado en la tabla 8.8, según datos de la figura 7.21. Véase anexo IV para más detalles.

EMISARIO SUBMARINO	
Longitud de la tubería [m]	1800
Cota final respecto al nivel del mar [m]	-50

Tabla 8.8: Dimensionado del emisario submarino. Elaboración propia

8.8 Sistema de bombeo

Para la selección de las bombas se han consultado seis fabricantes: Flowserve, Grundfos, Lowara, KSB, Sulzer y Wilo, a partir de los datos calculados de caudal, altura útil y altura neta de aspiración disponible que se muestran en la tabla 8.9. El modelo concreto escogido para cada sistema se muestra en la tabla 8.10. Nótese que para la alimentación serán necesarias tres unidades (una para cada pozo), si bien solo dos actuarán simultáneamente. Véase anexos V y VI para más detalles. En el anexo VIII se pueden encontrar las fichas técnicas de cada una de las bombas seleccionadas.

8.9 Consumo de energía total de la instalación

Considerando todas las bombas de la instalación, se tiene un consumo específico de energía de $4,27 \text{ kWh/m}^3$, lo que se traduce en un consumo de energía anual de aproximadamente 4675 MWh (tabla 8.11). Véase anexo VII para más detalles.

	Q [m ³ /h]	H _b [m]	NPSH _d [m]
Bombas de alimentación	139	107	21
Bomba de alta presión	128	658	30
Bomba de postratamiento	125	21	10
Bomba de distribución	125	262	10
Bomba booster	151	20	656
Bomba de rechazo	No se requiere (H _b < 0)		

Tabla 8.9: Datos necesarios para el dimensionamiento de las bombas. Elaboración propia

Sistema	Fabricante	Modelo	Potencia absorbida [kW]	Rendimiento hidráulico [%]
Alimentación (x3)	KSB	UPAS 250-135	49,04	82,8
Distribución	Grundfos	CRN 125-10	112,5	84,1
Alta presión	Flowserve	3X10DMX -A	304	75,4
Booster	Flowserve	VMB 25-15	10,1	81,1
Postratamiento	Flowserve	4LR-11A	9,02	79,1
Rechazo	No es necesaria ninguna bomba para el rechazo de salmuera ($H_b < 0$)			

Tabla 8.10: Resumen de los modelos seleccionados para el sistema de bombeo. Elaboración propia

	Potencia absorbida [kW]	Consumo de energía específico [kWh/m ³]	Consumo de energía anual [kWh/año]	Contribución [%]
Alimentación(x2)	49,04x2=98,08	0,78	859180,8	18%
Distribución	112.5	0.90	985500	21%
Alta presión	304	2.43	2663040	57%
Booster	10.1	0.08	88476	2%
Postratamiento	9.02	0.07	79015.2	2%
Total	533.7	4.27	4675212	100%

Tabla 8.11: Resumen del consumo del sistema de bombeo. Elaboración propia

8.10 Sistema de abastecimiento energético

Para el suministro de energía, se utilizarán dos aerogeneradores del fabricante ENERCON, modelo E-44 de potencia nominal 900 kW, separados 100 m entre sí y con la góndola ubicada a 45 m de altura. En estas condiciones cada aerogenerador tiene un factor de carga de 36% (considerado como muy bueno), y suministran en conjunto 5,687 GWh/año, lo cual supone 22% (1,03GWh/año) de exceso energético respecto a lo que necesita la EDAM. En la tabla 8.12 se muestra un resumen de sus características y en el anexo VIII se encuentra su ficha técnica.

Este exceso energético, como primera prioridad, se venderá a la red eléctrica. Cuando esto no sea posible (debido a una baja demanda en la red), se acumulará usando pilas de combustible, invirtiendo la energía en la generación de hidrógeno – en el caso de que la adquisición de las pilas resulte rentable. En caso contrario,

se buscarán vías para el bombeo reversible (elevación de agua) o compresión de aire. Y si esto último tampoco fuera posible, se recurrirá a la disipación energética.

Fabricante del aerogenerador	ENERCON
Modelo del aerogenerador	E-44
Potencia nominal del aerogenerador [kW]	900
Número de unidades necesarias	2
Altura a la que estará la góndola [m]	45
Orientación de la góndola	Noreste
Factor de carga [%]	36
Suministro total de energía [MWh/año]	5687
Exceso energético respecto a la EDAM [%]	1012
Separación entre aerogeneradores [m]	100

Tabla 8.12: Resumen de las características del parque eólico. Elaboración propia

9. Conclusiones

Si bien se han tenido que asumir múltiples simplificaciones para el dimensionamiento de la EDAM, la mayoría de parámetros se encuentran en un rango típico para plantas reales actualmente en operación. Así, por ejemplo, el consumo de energía específico (en torno a 4 kWh/m³) es muy común en la industria de la desalación para instalaciones de ósmosis inversa en Canarias, que suele comprenderse entre 3 y 5 kWh/m³.

En cuanto al exceso energético producido, alrededor de 1 GWh/año, no ha de considerarse necesariamente como un factor desfavorable. Podría ser, de hecho, una ventaja añadida si se encuentran vías de aprovechamiento que resulten rentables de manera global para la instalación.

Aunque el proyecto no se pretende que sea ejecutable, su elaboración ha supuesto un enfrentamiento continuo a problemas de diversa índole y el aprendizaje autónomo de nuevos conocimientos para su resolución. Esta habilidad es especialmente necesaria en esta era digital, por lo que la experiencia adquirida podría resultar útil de cara a futuros proyectos con un alcance más real.

9.1 Conclusions

Despite the assumption of multiple simplifications for the design of the seawater desalination plant, most parameters are within the range of real operating plants in Canary Islands. For example, the specific energy consumption (about 4kWh/m³) is very common in the desalination industry through RO plants in Canary Islands, which use to be around 3-5 kWh/m³

Regarding the generated excess of energy, it shouldn't be considered necessarily as a drawback. In fact, it could actually be an additional advantage if globally profitable ways for its use are found.

Although this project isn't pretended to be executed, its elaboration has meant a constant battle against different kinds of problems, which required obtaining new knowledge autonomously in order to be solved. This skill is especially necessary in this digital era, thus the acquired experience might be useful for future projects with a more real scope.



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

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO I:

**CONCEPTOS TEÓRICOS BÁSICOS DE LA
DESALACIÓN MEDIANTE ÓSMOSIS INVERSA Y
DE LA ENERGÍA EÓLICA**

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

**DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA
ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES**

Autor: Alexander Hernández García

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Índice de contenido

1. ¿Qué es la ósmosis inversa (OI)?	1
1.1 Aplicaciones de la OI	1
1.2 Funcionamiento de la OI	1
1.3 Membrana de OI	2
1.4 Principales parámetros que definen el proceso de OI	6
1.4.1 Caudal	6
1.4.2 Flujo de permeado	6
1.4.3 Rechazo de sales	7
1.4.4 Conversión	7
1.4.5 Caída de presión	7
1.4.6 Presión transmembrana	7
2. ¿De qué maneras se puede configurar un sistema OI?	8
2.1 Configuración básica	8
2.2 Otras configuraciones	8
2.2.1 Simple etapa o múltiples etapas	8
2.2.2 Un paso o dos pasos	9
2.2.3 Con recirculación o no del permeado	10
2.2.4 Con mezcla o no del agua de alimentación con el permeado	11
2.2.5 Tabla resumen	11
2.3 Ecuaciones básicas que rigen el diseño	12
2.3.1 Flujo de permeado	12
2.3.2 Flujo de soluto	13
2.3.3 Rechazo y paso de sales	14
2.3.4 Correlación entre las condiciones de operación y las prestaciones	14
3. ¿Qué tratamientos se le aplican al agua?	15

3.1 Pretratamiento	15
3.1.1 Concepto de ensuciamiento (<i>fouling</i>).....	15
3.1.2 Parámetro SDI.....	17
3.1.3 Turbidez.....	17
3.1.4 Parámetro TDS	18
3.1.5 Conductividad.....	18
3.1.6 Concepto de ensuciamiento biológico.....	19
3.1.7 Concepto de incrustación (scaling)	21
3.1.8 Parámetro LSI	23
3.1.9 Parámetro SDSI	24
3.1.10 Microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración.....	24
3.1.12 Resumen de las posibles opciones de diseño del pretratamiento	27
3.2 Postratamiento	28
3.2.1 Ajuste de pH:.....	28
3.2.2 Desionización	29
3.2.3 Remineralización.....	29
3.2.4 Esterilización	29
3.2.5 Control de olor, color y sabor	30
4. ¿De qué otras maneras se puede desalar el agua?	30
4.1 Otros métodos de desalación mediante membranas	30
4.1.1 Electrodialisis	30
4.1 Desalación mediante la evaporación del agua	32
4.1.1 Evaporación instantánea multietapa (MSF)	32
4.1.2 Destilación multiefecto (MEF)	33
4.1.3 Compresión de vapor	34
5. ¿Qué son los dispositivos de recuperación de energía?	35
5.1 Descripción general	35

5.2 Turbina Francis	36
5.3 Turbina Pelton	36
5.4 Turbocharger	36
5.5 Intercambiador de presión isobárico	37
6. ¿Qué es la energía eólica?	39
6.1 Descripción de la energía eólica	39
6.2 Ventajas e inconvenientes de la energía eólica	39
6.2.1 Ventajas	39
6.2.2 Inconvenientes	39
6.3 El aerogenerador	40
6.4 Conceptos teóricos básicos	42
6.4.1 Distribución de Weibull	42
6.4.2 Límite de Betz	42
6.4.3 Coeficiente de potencia	42
6.4.4 Factor de carga	43
6.4.5 Clase de un aerogenerador en función del régimen de viento	43

Índice de figuras

Figura 1.1: Proceso de ósmosis inversa. Fuente: Lanxess (guía de diseño). 1	
Figura 1.2: Esquema de la configuración plato y marco. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009).....	2
Figura 1.3: Esquema de la configuración plato y marco. Fuente: acsmedioambiente.com.....	3
Figura 1.4: Esquema de la configuración fibra hueca. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009).....	4
Figura 1.5: Dirección del flujo en la membrana enrollada en espiral. Fuente: Lanxess (guía de diseño).	4

Figura 1.6: Fotografía de un tubo de presión real. Fuente: Lanxess (guía de diseño).....	5
Figura 1.7: Dirección del flujo en la membrana. Fuente: Lanxess (guía de diseño).....	5
Figura 2.1: Configuración básica de un sistema OI. Fuente: Lanxess (guía de diseño).....	8
Figura 2.2: Sistema OI de 2 y 3 etapas. Fuente: Lanxess (guía de diseño). .	9
Figura 2.3: Sistema OI con recirculación del concentrado. Fuente: Lanxess (guía de diseño).....	10
Figura 2.4: Sistema OI de 2 pasos. Fuente: Lanxess (guía de diseño).	10
Figura 2.5: Sistema OI con recirculación del permeado y 2 etapas. Fuente: Lanxess (guía de diseño).	11
Figura 2.6: Sistema OI con mezcla del agua de alimentación y permeado. Fuente: Lanxess (guía de diseño).	11
Figura 3.1: Escala de filtración de la microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)	25
Figura 3.2: Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y OI. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009).....	26
Figura 3.3: Membrana de nanofiltración con configuración en espiral. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009).....	26
Figura 4.1: Esquema del proceso de electrodiálisis. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009).....	31
Figura 4.2: Pila de electrodiálisis. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)	31
Figura 4.3: Proceso MSF. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009).....	32
Figura 4.4: Ciclo termodinámico MSF. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)	33

Figura 4.5: Proceso MEF. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009).....	33
Figura 4.6: Ciclo termodinámico MEF. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)	34
Figura 4.7: Proceso CV. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009).....	34
Figura 4.8: Ciclo termodinámico CV. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)	35
Figura 5.1: Esquema básico general de un ERD típico. Fuente: sciencedirect.com	35
Figuras 5.2 y 5.3: Fotografía de una turbina Francis (izq) y Pelton (dcha). Fuente: solar-energia.net.....	36
Figuras 5.4 y 5.5: Fotografía anterior (izq) y posterior (dcha) de un turbocharger. Fuente: theboostlab.com.....	37
Figura 5.6: Modelo iSave 50. Fuente: Danfoss	38
Figura 5.7: Modelo PX-Q300. Fuente: Energy Recovery	38
Figura 6.1: Esquema de formación del viento. Fuente: Chrvoje engineering	39
Figura 6.2: Diagrama básico de las partes del aerogenerador. Fuente: engineerlive.com.....	41
Figura 6.3: Fotografía de aerogenerador vertical. Fuente: lbaindustrial.com.mx	42

Índice de tablas

Tabla 2.1: Conversión según número de etapas. Fuente: Lanxess (guía de diseño).....	9
Tabla 2.2: Resumen de los modos de configuración en un sistema OI. Fuente: Lanxess (guía de diseño).	12
Tabla 3.1: Mecanismo de ensuciamiento según el tipo de material. Fuente: Lanxess (guía de diseño).	16

Tabla 3.2: Efecto en las prestaciones según el tipo de material. Fuente: Lanxess (guía de diseño).....	16
Tabla 3.3: Tipo de agua según su salinidad. Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000)	18
Tabla 3.4: ORP para distintos compuestos químicos Fuente: Lanxess (guía de diseño).....	21
Tabla 3.5: Método de prevención según el tipo de incrustación. Fuente: Lanxess (guía de diseño).....	22
Tabla 3.6: Valores recomendados para los parámetros de pretratamiento. Fuente: Lanxess (guía de diseño).....	27
Tabla 3.7: Opciones de pretratamiento según el tipo de ensuciamiento. Fuente: Lanxess (guía de diseño).....	28
Tabla 6.1: Factor de carga y valoración. Fuente: Ingeniería de la energía eólica, Miguel Villarrubia López.....	43

1. ¿Qué es la ósmosis inversa (OI)?

1.1 Aplicaciones de la OI

La ósmosis inversa (en adelante OI) es una técnica de separación que se puede usar en un amplio rango de aplicaciones, especialmente cuando la sal y/o sólidos disueltos necesitan ser eliminados de una solución. Entre sus principales aplicaciones cabe destacar:

- Producción de agua potable para consumo humano
- Producción de agua destinada a riego de cultivos
- Producción de agua destinada a aplicaciones industriales

Así, la OI está actualmente considerada como uno de los procesos más económicos y efectivos para la desalación de agua. Frecuentemente es la técnica apropiada para tratar soluciones con concentraciones de sal entre 100 y 50000mg/L, por lo que una membrana OI puede tratar el agua superficial o salobre, el agua de mar e incluso salmueras.

1.2 Funcionamiento de la OI

La ósmosis es un fenómeno natural que puede ser definido como el movimiento de agua pura a través de una membrana semipermeable desde una solución con una baja concentración de soluto a una de alta concentración (*fig. 1.1*). La membrana es permeable al agua y algunos iones, pero rechaza la mayoría de iones y sólidos disueltos. Este proceso (movimiento de agua) ocurre hasta que se alcanza el estado de equilibrio, o hasta que el equilibrio químico es igual en ambos lados de la membrana.

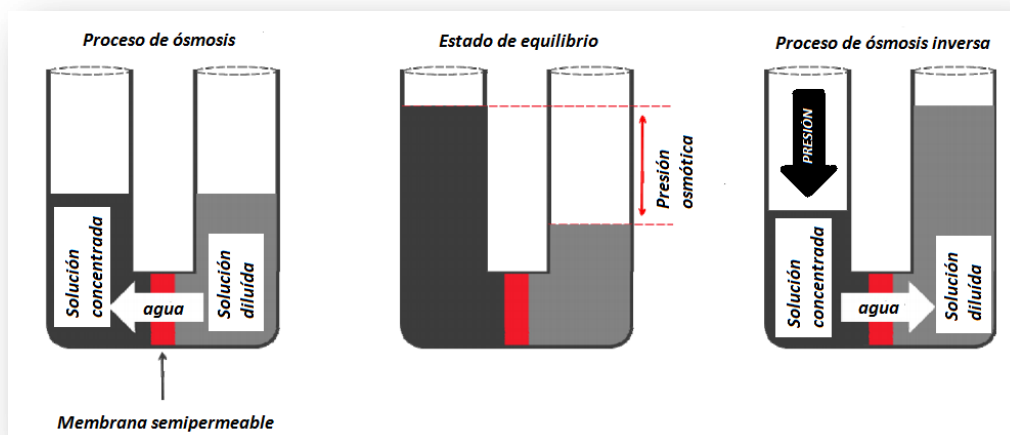


Figura 1.1: Proceso de ósmosis inversa. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

Se puede observar una diferencia de altura entre los compartimentos de solución diluida y solución concentrada cuando el equilibrio químico es alcanzado. La diferencia en altura expresa la diferencia de presión osmótica entre las dos soluciones.

La OI es el proceso que ocurre cuando una presión mayor que la presión osmótica es aplicada en la solución concentrada. El agua es forzada a fluir desde el lado de mayor concentración al lado más diluido, y los solutos son retenidos por la membrana.

1.3 Membrana de OI

Existen diversas configuraciones para un módulo de membranas:

- Plato y marco (fig. 1.2)

Consiste en emplear membranas planas, que se colocan unas sobre otras formando una columna, como soporte utilizando un marco circular o rectangular que le otorga la rigidez necesaria. Las membranas se disponen a ambos lados de un plato por el que se recoge el permeado producido

Históricamente, la OI comenzó a implementarse según esta configuración. Aunque es la configuración más simple, tiene una baja capacidad de producción – lo que implica la necesidad de utilizar muchísimas unidades (con el consecuente aumento en costes, volumen y peso). Esto limita sus aplicaciones a ciertos procesos químicos y de pretratamiento de productos alimenticios.

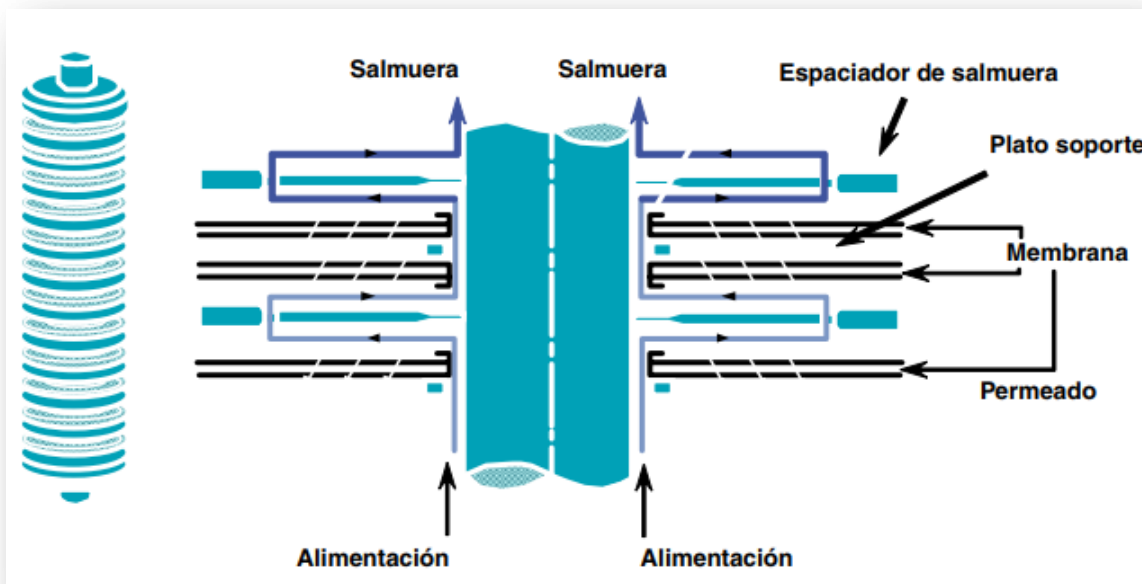


Figura 1.2: Esquema de la configuración plato y marco. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)

- Tubular (fig. 1.3)

Se introduce la membrana en el interior de un tubo poroso, típicamente de PVC, que sirve para soportar las presiones. Cuando el agua circula a presión por el interior de la membrana, el concentrado se va formando longitudinalmente a lo largo del tubo y circula hasta el otro extremo, mientras que el permeado fluye perpendicularmente al flujo de alimentación a través de los poros del tubo y cae en un depósito, donde se recoge.

Al igual que en la configuración de plato y marco, su capacidad de producción es pequeña. Sin embargo, como las membranas tubulares permiten ser limpiadas con facilidad, se suelen aplicar a procesos industriales que emplean líquidos con elevada turbidez.

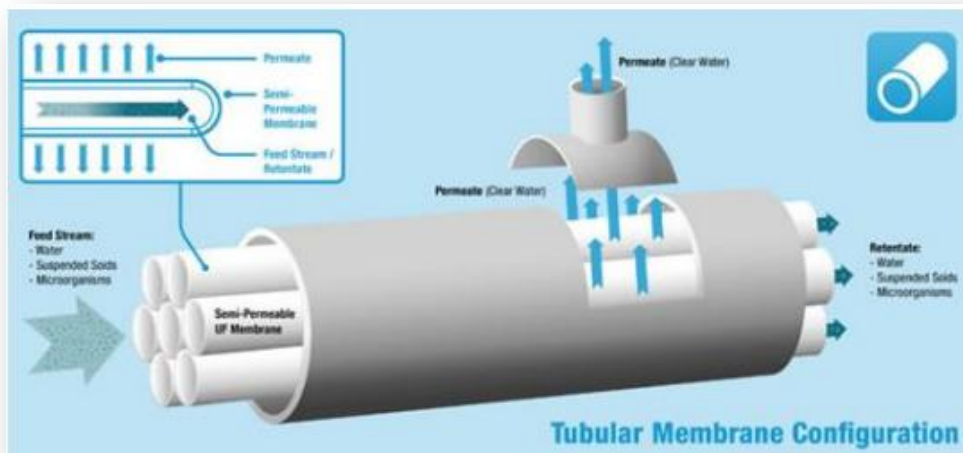


Figura 1.3: Esquema de la configuración plato y marco. Fuente: acsmedioambiente.com

- Fibra hueca (fig. 1.4)

En este caso se introducen una gran cantidad de fibras (tubos muy finos, de unas 84 micras) huecas en el interior de un tubo que actúa a modo de carcasa protectora, normalmente de PRFV. Las fibras se colocan paralelamente al tubo y lo recorren hasta su extremo, donde se doblan y vuelven de nuevo al otro lado, adoptando así una forma de U. El agua de alimentación se introduce a presión por un extremo del tubo. El permeado penetra a través de las paredes de las fibras, reuniéndose en el otro extremo. El concentrado, que va reteniendo las sales que no pasan a través de la membrana, se recoge en el extremo opuesto.

Dada el pequeño tamaño de las fibras, esta configuración tiene una gran densidad de empaquetamiento, pero como inconveniente, presenta una alta tendencia al ensuciamiento.

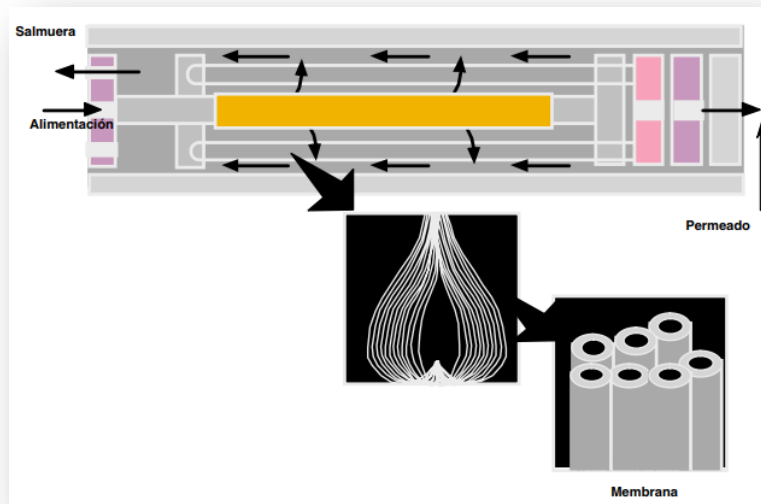


Figura 1.4: Esquema de la configuración fibra hueca. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)

- Arrollamiento en espiral (fig. 1.5)

Actualmente, la mayoría de las membranas son ensambladas de acuerdo a una configuración en espiral. Este formato proporciona un alto grado de densidad de empaquetamiento (300-1000 m²/m³), utilizando para ello membranas en forma de láminas planas rectangulares que son enrolladas alrededor de un tubo central que cuenta con orificios para recoger el agua producto.

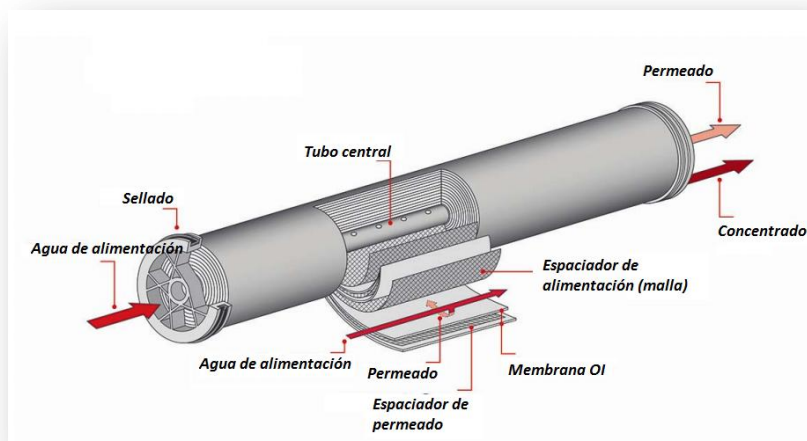


Figura 1.5: Dirección del flujo en la membrana enrollada en espiral. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

Las láminas se separan entre sí mediante un espaciador de permeado poroso que permite conducir al permeado hacia el tubo central. En el exterior se coloca una carcasa (fig. 1.6) en forma de recipiente cilíndrico, denominado tubo de presión porque su principal función consiste en resistir las altas presiones de operación.



Figura 1.6: Fotografía de un tubo de presión real. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

Bajo esta configuración, el flujo es cruzado. Como se muestra en la figura 1.6, la corriente de agua de alimentación, que se introduce exteriormente al tubo central por uno de sus extremos, fluye tangencialmente a la superficie de la membrana. Una fracción del agua, el permeado, pasa a través de la membrana (perpendicularmente al flujo de alimentación) recorriendo un camino en espiral hasta el tubo central - mientras que la fracción restante del flujo de alimentación continúa fluyendo a lo largo de la superficie hasta llegar al otro extremo. Por tanto, dos corrientes son capturadas:

- Permeado, consistente en agua casi pura con muy baja concentración de iones
- Concentrado, que contiene una alta concentración de pequeñas partículas e iones disueltos.

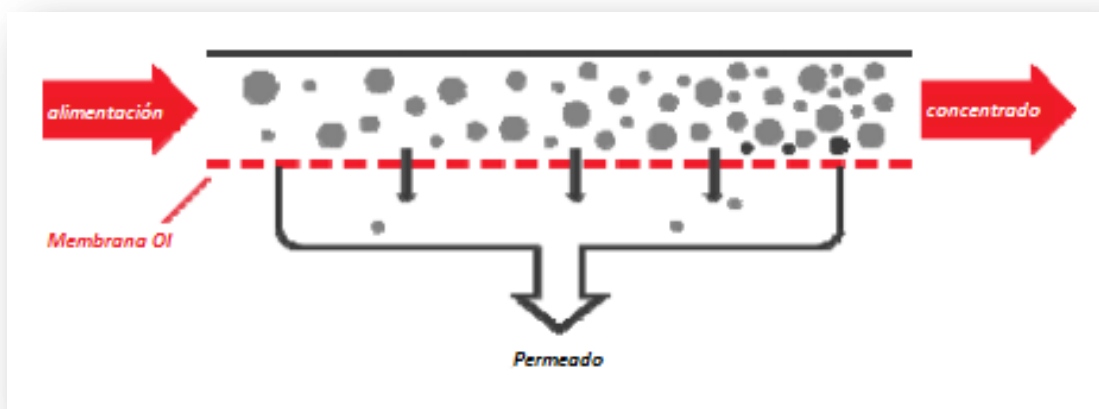


Figura 1.7: Dirección del flujo en la membrana. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

Así, por un extremo se introduce el agua de alimentación, y por el otro extremo sale el agua de rechazo o concentrado. El permeado normalmente sale a presión atmosférica por el tubo central, por cualquiera de los dos extremos.

En operación, el sistema de membranas de OI está continuamente abastecido con agua de alimentación que produce un movimiento constante de agua desde la alimentación al concentrado. Cuando se opera con flujo cruzado, existe poca acumulación de solutos rechazados, lo que permite minimizar el ensuciamiento e incrustación.

Las membranas actualmente se suelen fabricar de poliamida, dadas sus prestaciones frente al agresivo ambiente marino. Sus dimensiones, aunque variables en función de la capacidad de producción, suelen rondar 0.2m para aplicaciones industriales, y 1m para el abastecimiento.

1.4 Principales parámetros que definen el proceso de OI

Se definen a continuación los más importantes:

1.4.1 Caudal

En un dispositivo de OI hay tres corrientes o flujos. La corriente de alimentación se separa en la membrana en las corrientes de permeado y de concentrado. El caudal de estas corrientes suele expresarse en metros cúbicos por hora (m³/h) o en galones por minuto (gpm). El caudal de alimentación se define como el volumen de agua por unidad de tiempo que entra al sistema. El caudal de permeado se define como el volumen de agua por unidad de tiempo que pasa a través de la membrana, y el caudal de concentrado se define como el volumen de fluido por unidad de tiempo que no ha pasado a través de la membrana, y sale expulsado del sistema OI con los iones rechazados.

1.4.2 Flujo de permeado

El flujo de permeado describe la cantidad de permeado producido por unidad de tiempo y unidad de área de la membrana. El flujo se mide en litros por metro cuadrado por hora (lmh) o en galones por pie cuadrado por día (gfd).

El flujo es definido como:

$$J = \frac{Q_p}{S} \quad (1.1)$$

Donde: J=flujo de permeado, Q_p=Caudal de permeado S= Superficie de la membrana

1.4.3 Rechazo de sales

El rechazo de sales es un porcentaje que describe la cantidad de soluto retenido por la membrana, que da una idea de la calidad del permeado. La retención es definida como:

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_m}\right) * 100 \quad (1.2)$$

$$C_m = \frac{C_a + C_c}{2} \quad (1.3)$$

Donde: R= rechazo, C_p =concentración en permeado, C_m =concentración media, C_a =Concentración en alimentación, C_c =Concentración en el concentrado

1.4.4 Conversión

La conversión se define como la fracción de caudal de alimentación que pasa a través de la membrana. Normalmente se expresa en porcentaje:

$$Y = \frac{Q_p}{Q_a} \quad (1.4)$$

Donde: Y= Conversión, Q_p =Caudal de permeado, Q_a =Caudal de alimentación

1.4.5 Caída de presión

La caída de presión es la diferencia entre las presiones de alimentación y concentrado mientras el agua fluye a través de las membranas. Se define como:

$$dp = P_a - P_c \quad (1.5)$$

d_p = caída de presión, P_a =presión de alimentación, P_c =presión de concentrado

1.4.6 Presión transmembrana

La presión transmembrana (TMP) se define como la diferencia de presión entre el lado de alimentación y el lado de permeado en la membrana. Esta presión normalmente se mide en bar o psi, y es la que permite que ocurra la separación y se produzca permeado. En general, un aumento en la presión transmembrana aumenta el flujo a través de la membrana. Se define como:

$$TMP = \frac{P_a + P_c}{2} - P_p \quad (1.6)$$

Donde P_p =Presión del permeado; P_c =Presión del concentrado; P_a =Presión de alimentación

2. ¿De qué maneras se puede configurar un sistema OI?

2.1 Configuración básica

El bastidor de membranas de un sistema OI incluye una serie de membranas que se alojan en el interior de tubos de presión. Dentro de los tubos de presión, las membranas (también denominadas como 'elementos') son conectadas secuencialmente, con hasta un máximo de ocho elementos por tubo de presión – si bien las configuraciones típicas suelen tener 6 o 7 elementos por tubo de presión. Así, el concentrado del primer elemento resulta ser la alimentación del segundo, y así sucesivamente.

A continuación se muestra un balance de masa para un sistema OI típico (*fig. 2.1*). Como se puede comprobar, el caudal de alimentación se divide en los caudales de permeado y concentrado

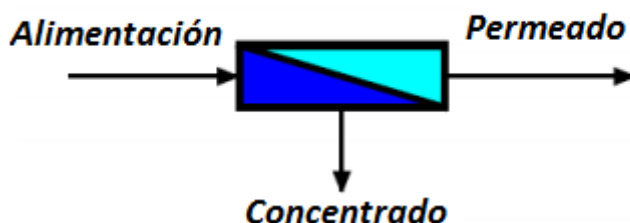


Figura 2.1: Configuración básica de un sistema OI. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

Se utiliza una bomba de alta presión (BAP o High Pressure Pump, HPP) para impulsar el agua a través de dichos tubos. El sistema opera mediante flujo cruzado, y se diseña para una operación continuada, donde los parámetros operativos (caudal de permeado y conversión) se mantienen constantes.

2.2 Otras configuraciones

Un sistema OI puede configurarse como:

2.2.1 Simple etapa o múltiples etapas

En un sistema de simple etapa, los tubos de presión se disponen en paralelo. Las líneas de alimentación, concentrado y permeado de los diferentes tubos de presión se conectan mediante los correspondientes colectores. Bajo esta configuración, la conversión no suele exceder 50-60% en desalación de agua de mar.

En los sistemas de múltiples etapas (fig. 2.2), el concentrado de una etapa se convierte en la alimentación de la siguiente. Esto se utiliza para obtener así mayores conversiones sin exceder el límite de conversión (caudal de permeado) que permite obtener cada elemento o membrana. Normalmente, dos etapas permiten alcanzar conversiones de hasta 75-80%. El número de tubos de presión por etapa disminuye en la dirección del flujo para mantener un caudal de flujo cruzado uniforme. Así, típicamente en un sistema de doble etapa, el ratio de número de tubos de presión es 2:1 (la segunda etapa cuenta con la mitad de tubos de presión que la primera).

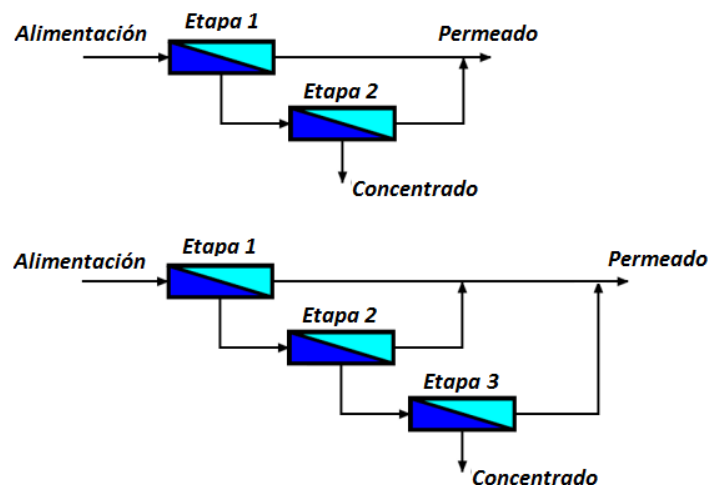


Figura 2.2: Sistema OI de 2 y 3 etapas. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

La relación entre conversión y número de etapas se muestra en la *tabla 2.1*:

Etapas	Conversión
1 etapa	< 50-60%
2 etapas	< 75-80%
3 etapas	< 85-90%

Tabla 2.1: Conversión según número de etapas. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

2.2.2 Un paso o dos pasos

En un sistema OI de un solo paso, la conversión suele rondar el 50%. Este valor es aplicable a sistemas estándares de desalación de agua de mar. Para conseguir un porcentaje de conversión mayor a 50%, se aplica una recirculación del concentrado (fig. 2.3). En esta configuración, parte del concentrado es reciclado y

añadido al lado de succión de la bomba de alta presión. Recircular una alta fracción del concentrado ayuda a reducir el riesgo de ensuciamiento o incrustación en las membranas. Sin embargo, la recirculación del concentrado tiene la desventaja de requerir mayores presiones para la bomba de alta presión, mayor consumo de energía, y producir una pérdida de calidad en el caudal de permeado.

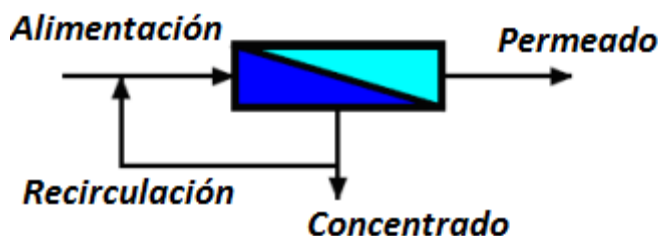


Figura 2.3: Sistema OI con recirculación del concentrado. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

Se utiliza un sistema de 2 pasos cuando se requiere una calidad de permeado muy alto. Con esta configuración, el permeado del primer paso es la alimentación del segundo paso. En la figura 2.4 se muestra la representación de un sistema de 2 pasos. El concentrado del segundo paso se recicla de nuevo a la alimentación del primer paso, porque su calidad es normalmente mejor que la del agua de alimentación. Como la alimentación del segundo paso es de alta calidad, la conversión del segundo paso puede ser muy alta – en torno a 85-95%.

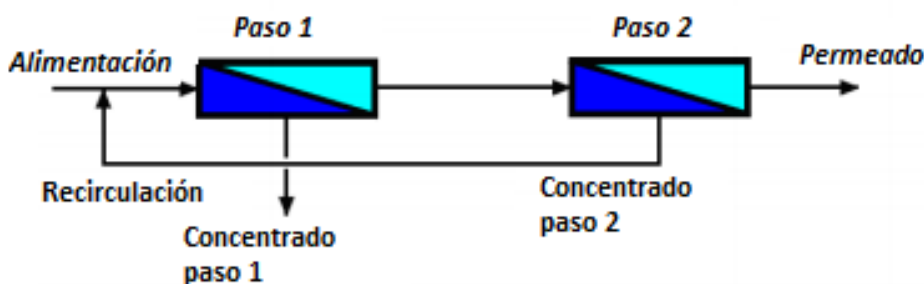


Figura 2.4: Sistema OI de 2 pasos. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

2.2.3 Con recirculación o no del permeado

En el caso de que la temperatura de alimentación varíe significativamente (por ejemplo, entre verano e invierno), la presión de alimentación debe ser modificada para mantener constante el permeado. Este cambio podría causar inestabilidad en la calidad del permeado. Para prevenir esto, una parte del permeado se recicla y añade a la parte de succión de la bomba de alta presión, donde el flujo de permeado es mayor que el valor estimado. Al mantener la presión de alimentación constante, la calidad del permeado es mantenida también constante. En la figura

2.5 se muestra un ejemplo de recirculación del permeado para un sistema OI de 2 etapas.

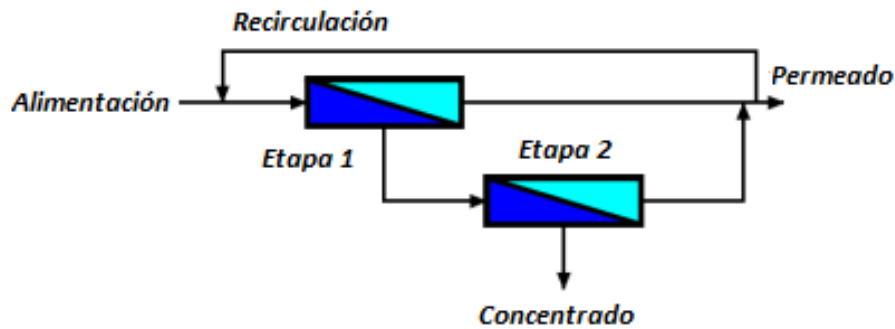


Figura 2.5: Sistema OI con recirculación del permeado y 2 etapas. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

2.2.4 Con mezcla o no del agua de alimentación con el permeado

Consiste en tomar algo de agua de alimentación adicional y añadirla al permeado (fig. 2.6), con el objetivo de reducir el número de elementos necesarios en la unidad OI. Esto se realiza cuando no exceda la salinidad requerida del agua producto, lo cual es normalmente el caso cuando se utiliza agua salobre.

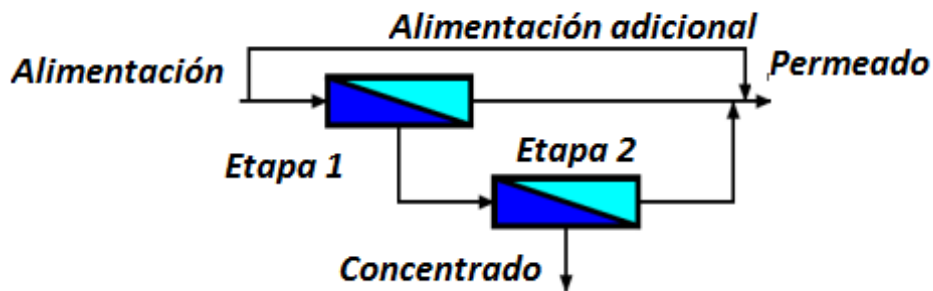


Figura 2.6: Sistema OI con mezcla del agua de alimentación y permeado. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

2.2.5 Tabla resumen

Se muestra a continuación en la *tabla 2.2* un resumen indicando el uso principal de cada uno de los modos de configuración:

Modo de configuración	Principal aplicación
Simple etapa y un paso	Permite una conversión de hasta 50%
Múltiples etapas	Permite <u>obtener conversiones >50%</u> sin exceder el límite de caudal de permeado de cada elemento
Doble paso	<u>Mejora la calidad del permeado</u>
Recirculación del concentrado	Ayuda a <u>reducir el riesgo de ensuciamiento o incrustación</u> , aunque implica mayor consumo y peor calidad de permeado
Recirculación del permeado	Se utiliza para <u>evitar causar inestabilidad en la calidad del caudal de permeado</u>
Mezcla del agua de alimentación con permeado	Se utiliza para <u>reducir el número de elementos necesarios</u> , siempre que no se exceda la salinidad requerida

Tabla 2.2: Resumen de los modos de configuración en un sistema OI. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

2.3 Ecuaciones básicas que rigen el diseño

Si bien se utilizará un software que trabaja automáticamente con estas ecuaciones (facilitando así la parte de cálculo correspondiente al diseño), se considera que su entendimiento ayuda a la comprensión teórica del funcionamiento del sistema OI. Por ello, se muestran a continuación las principales ecuaciones:

2.3.1 Flujo de permeado

El transporte de agua a través de la membrana se expresa como un flujo de permeado J_v . El flujo se define generalmente como el caudal volumétrico de agua que pasa a través de un área de membrana dada. En el caso de OI, la unidad de flujo se expresa como litros de agua por metro cuadrado de membrana por hora (lmh) o galones por pie cuadrado por día (gfd). El flujo de permeado es proporcional a la presión neta conductora (net driving pressure, NDP):

$$J_v = A * NDP \quad (2.1)$$

$$NDP = \Delta P - \Delta \pi - 0.5 * dp \quad (2.2)$$

$$\Delta P = P_a - P_p \quad (2.3)$$

$$\Delta \pi = \pi(C_{am}) - \pi(C_p) \quad (2.4)$$

$$C_{am} = (C_a + C_c)/2 \quad (2.5)$$

Donde:

ΔP , presión diferencial; $\Delta\pi$, presión osmótica diferencial media

$\pi(C_{am})$, presión osmótica media de alimentación; $\pi(C_p)$, presión osmótica media del permeado

A, permeabilidad del agua (flujo específico)

P_a , presión de alimentación; P_p , presión de permeado

C_{am} , concentración media de alimentación; C_a , concentración de alimentación

C_p , concentración del permeado; C_c , concentración del concentrado

dp, caída de presión

La caída de presión dp se calcula mediante el caudal medio Q_{am} (alimentación y concentrado):

$$dp = a * \{Q_{am}\}^b \quad (2.6)$$

$$Q_{am} = \frac{(Q_a + Q_c)}{2} \quad (2.7)$$

Donde a y b son coeficientes específicos para la configuración del elemento y el espaciador de la alimentación. Los valores para estos coeficientes son obtenidos experimentalmente.

El caudal del agua producto Q_p se puede obtener multiplicando el flujo de permeado por el área total de la membrana M_A :

$$Q_p = M_A * J_V \quad (2.8)$$

El flujo de permeado debe ser bajo si se anticipa (por ejemplo, mediante el SDI) la posibilidad de que exista un ambiente con alto potencial de ensuciamiento, pues la concentración de materiales que producen dicho ensuciamiento (véase apartado de pretratamiento) aumenta con el flujo de permeado, así como con conversiones mayores o un flujo de concentrado menor.

2.3.2 Flujo de soluto

El transporte de soluto que cruza una membrana OI es expresado mediante el flujo de soluto J_s , que es proporcional a la diferencia de concentración a través la membrana y a la permeabilidad del soluto B:

$$J_s = B * (C_{am} - C_p) \quad (2.9)$$

2.3.3 Rechazo y paso de sales

El rechazo de sales (rejection, R) y paso de sales (salt passage, SP) usualmente son expresados en porcentaje y se obtienen de la siguiente manera:

$$R = 1 - \left(\frac{C_p}{C_{am}} \right) \quad (2.10)$$

$$SP = 1 - R = C_p / C_{am} \quad (2.11)$$

2.3.4 Correlación entre las condiciones de operación y las prestaciones

Las prestaciones de un sistema de membranas OI (flujo y rechazo o paso de sales) son influenciadas por las condiciones de operación, como la presión, temperatura, concentración de alimentación, etc.

Así, los parámetros de flujo específico y paso de sales se relacionan con tales condiciones de operación de la siguiente manera:

$$A_s = A_n * TCF_1 * SCA_1 * FF \quad (2.12)$$

$$SP_S = SP_n \left\{ \frac{(J_V)_N}{(J_V)_S} \right\} * TFC_2 * SCA_2 \quad (2.13)$$

Donde:

A_s , flujo específico para las condiciones de operación; A_n , flujo específico para las condiciones nominales

SP_S , paso de sales para las condiciones de operación; SP_N , paso de sales para las condiciones nominales

TCF, factor de correlación con la temperatura (1 para el flujo específico, 2 para el paso de sales)

SCA, factor de correlación para la concentración en la alimentación (1 para el flujo específico, 2 para el paso de sales)

FF, factor de ensuciamiento (fouling factor)

Dichos factores de correlación son usados automáticamente en el software informático para estimar las prestaciones a partir del valor nominal.

3. ¿Qué tratamientos se le aplican al agua?

3.1 Pretratamiento

El pretratamiento es un paso crucial para la correcta operación de un sistema OI. Las prestaciones y la eficiencia dependen directamente de la calidad del agua de alimentación. Las impurezas en el agua de alimentación pueden reducir el desempeño de una membrana causando ensuciamiento, incrustación o degradación en la misma.

El pretatamiento debe ser diseñado para prevenir e impedir estas pérdidas de prestaciones, e incrementar así la capacidad del sistema para conseguir el flujo de permeado y rechazo de sales requerido. Un proceso de pretratamiento solo puede ser diseñado basándose en un completo y preciso análisis del agua de alimentación. Su diseño dependerá de la fuente de procedencia del agua.

Por ejemplo, el agua proveniente de un pozo tiene bajo potencial de ensuciamiento (bajo SDI) y típicamente basta con un pretratamiento muy simple. Por el contrario, el agua superficial tiene un alto potencial de ensuciamiento (alto SDI) y requiere un pretratamiento más extensivo.

El pretratamiento también debe tener en cuenta las fluctuaciones temporales en la composición del agua. Su configuración debe incluir la cloración y decoloración, dosis de anti-incrustante y/o acidificación para prevenir la formación de incrustaciones.

Otra tecnología implementada cada vez más es los sistemas de tratamiento de agua modernos es el uso de filtración mediante membrana, como la microfiltración o la ultrafiltración.

3.1.1 Concepto de ensuciamiento (*fouling*)

El concepto de 'ensuciamiento' significa que las prestaciones de la membrana OI disminuyen no debido a un cambio en la estructura de la misma, sino debido a los materiales que quedan adheridos en su superficie. El mecanismo asociado al fenómeno de ensuciamiento depende del tipo de material que lo provoca (*tabla 3.1*). Sus efectos en las prestaciones del sistema OI se muestran en la *tabla 3.2*

Para monitorizar los ensuciamientos por partículas y por compuestos orgánicos se usan parámetros como el SDI y la turbidez.

La microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) son cada vez más usadas en el pretratamiento. Estos procesos utilizan membranas que pueden eliminar microbios, algas y materiales suspendidos; y, en el caso de la ultrafiltración, también disolver compuestos orgánicos dependiendo de su peso molecular y el tamaño de poro de la membrana de ultrafiltración. La implementación de MF o UF en el pretratamiento puede ofrecer un valor $SDI < 3$, que implica una buena prevención de

ensuciamiento para la membrana OI. Sin embargo, las membranas UF o MF no eliminan iones disueltos y orgánicos más pequeños

Materiales	Ejemplos	Mecanismo de ensuciamiento
Sólidos insolubles	Arcilla, lodo, partículas	Asentamiento, acumulación
Óxidos metálicos	Fe, Mn, Cu, Ni, Zn	Asentamiento, acumulación
Ensuciamiento microbiológico	Bacterias, algas	Asentamiento, crecimiento, acumulación
Orgánicos solubles	Ácido húmico, ácido fúlvico	Adsorción (interacción hidrofóbica)
Orgánicos insolubles	Aceite, extractos de n-hexano	Adsorción (interacción hidrofóbica)
Materiales cargados catiónicamente	Coagulantes, detergentes, biocidas	Adsorción (interacción electrostática)

Tabla 3.1: Mecanismo de ensuciamiento según el tipo de material. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

Materiales	Efecto en las prestaciones del sistema OI		
	Caída de presión	Caudal de agua producto	Rechazo de sales
Sólidos insolubles	Gran aumento	Gran disminución	Ligera disminución
Óxidos metálicos	Aumento	Disminución	Ligera disminución
Ensuciamiento microbiológico	Gran aumento	Gran disminución	Ligera disminución
Orgánicos solubles	Aumento	Disminución	Ligera disminución
Orgánicos insolubles	Constante	Gran disminución	Constante
Materiales cargados catiónicamente	Constante	Gran disminución	Constante

Tabla 3.2: Efecto en las prestaciones según el tipo de material. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

Los filtros por cartuchos suelen usarse para proteger a la bomba de alta presión y a la superficie de la membrana de las partículas. Normalmente se instalan al final del sistema de pretratamiento. Un tamaño de poro de al menos 5µm es

recomendado para el filtro por cartuchos, aunque si existe riesgo de ensuciamiento con sílice coloidal o sílice metálico, un tamaño de poro tan pequeño como 1-3 μm resulta ser más conveniente. Típicamente estos filtros se reemplazan cada 3 meses, y si fuera necesario hacerlo más frecuentemente, esto podría indicar la existencia de problemas en el equipo de pretratamiento.

3.1.2 Parámetro SDI

El índice de colmatación (Silt Density Index, SDI) es la prueba más usada para medir el potencial de ensuciamiento por partículas y materiales coloidales en el proceso OI. Esta prueba está definida en el estándar ASTM (American Standard for Testing Material) D4189.

La prueba consiste en una filtración usando un filtro con 0.45 μm de tamaño de poro. La presión de alimentación se mantiene constante a 2.07 bar (o 30psi) durante todo el test. A continuación se siguen tres pasos: Primero, el agua de alimentación es forzada a fluir a través del filtro, y se mide el tiempo (t_i) en recolectar 500ml de permeado. Luego, se continúa con la filtración durante 15 minutos (T). Después de este período de filtración, se recolectan 15 ml de permeado de nuevo.

El periodo de 15 minutos es la duración estándar entre las dos medidas, aunque la prueba también se puede realizar para intervalos de 5 y 10 minutos. Así, a partir de los tres valores medidos (t_i , t_f y T), el parámetro SDI puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$SDI = \left(1 - \frac{t_i}{t_f}\right) * \left(\frac{100}{T}\right) \quad (3.1)$$

Donde, T= tiempo total transcurrido (normalmente 15 minutos); t_i =tiempo inicial requerido para recolectar la muestra de 500ml; t_f =tiempo requerido para recolectar la muestra de 500ml tras el tiempo transcurrido T

La prueba SDI es usada para predecir la agresividad del agua de alimentación, y diseñar apropiadamente un sistema para prevenir el ensuciamiento de partículas en la superficie de la membrana. Cuanto más bajo es el SDI, más bajo será el potencial ensuciamiento de la membrana con sólidos suspendidos o partículas. Un SDI < 5 suele ser idóneo, aunque un valor SDI < 3 es típicamente requerido para minimizar el potencial ensuciamiento hasta un límite aceptable.

3.1.3 Turbidez

La turbidez se debe a coloides y sólidos suspendidos como arcilla, partículas orgánicas finamente dividida, materia inorgánica, plancton y otros organismos microscópicos.

Es cuantificada por la medida en que la intensidad de la luz que pasa a través de una muestra de agua es reducida debido a materiales suspendidos. Así, la turbidez del agua se basa en la comparación de la cantidad de luz que pasa a través de

una determinada muestra de agua con la cantidad de agua que pasa a través de una muestra estándar. La medida se realiza mediante un turbidímetro, o nefelómetro, y el resultado se da normalmente en unidades de turbidez nefelométricas (Nephelometric Turbidity Unit, NTU).

El parámetro de la turbidez se suele usar para el control de partículas en procesos de filtración. A menudo se recomienda para el agua de alimentación de un proceso OI que $NTU < 0.5$.

3.1.4 Parámetro TDS

El parámetro TDS (Total Dissolved Solids, o sólidos disueltos totales) se utiliza para medir la salinidad del agua, que a su vez permite clasificar el agua en diversos tipos: desde la salmuera hasta el agua ultrapura. Se suele expresar en mg/L o ppm. Así, de manera aproximada, se tiene la tabla 3.3

TDS [ppm]	Tipo de agua
0.03	Ultrapura
0.3	Pura
3	Desionizada
30	Industrial
300	Potable
3000	Salobre
30000	De mar
300000	Salmuera

Tabla 3.3: Tipo de agua según su salinidad. Fuente: "Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis inversa". Medina San Juan, José Antonio (2000)

3.1.5 Conductividad

La conductividad se relaciona con la facilidad que tiene la corriente de pasar a través de un elemento. En la industria de la desalación, se utiliza para medir la salinidad de manera indirecta, en tanto que la conductividad del agua será proporcional al número de partículas en forma de sales que ésta contenga. Para obtener valores estandarizados, se mide a 20°C.

3.1.6 Concepto de ensuciamiento biológico

La prevención del ensuciamiento biológico es una consideración extremadamente importante en el diseño de sistemas que utilizan membranas OI. Esto es así porque cuando los microbios se adhieren a la superficie de la membrana se forma una película consistente en células de microbios embebidas en una matriz extracelular de sustancias poliméricas. Los microorganismos que se encuentran en dicha película pueden ser algas, bacterias, microbios y otros compuestos no vivientes producidos por los microorganismos. En conjunto provocan inferiores prestaciones en el sistema OI, ya que se ve disminuido el caudal de agua producto y el rechazo de sales, y también puede incrementarse la caída de presión.

El ensuciamiento biológico es un proceso dinámico de colonización de microbios en crecimiento. Los polímeros extracelulares forman una capa de protección que protegen a los organismos y, una vez iniciada dicha película, es difícil de suspender ya que se encuentra protegida contra efectos de biocidas (debido a la limitación que supone para el mecanismo de difusión).

Algunos oxidantes químicos, incluyendo ozono, cloro y peróxido, pueden ser usados para controlar el ensuciamiento biológico, actuando como agentes desinfectantes que aniquilan bacterias y microorganismos – pero cualquier oxidante presente en el agua de alimentación debe ser reducido previamente a la entrada de las membranas, de lo contrario se pueden producir daños irreversibles en las mismas.

El potencial de ensuciamiento biológico necesita ser considerado, y para ello existen múltiples métodos para asistir con esta evaluación. Se mencionan algunos de ellos a continuación:

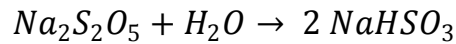
- Carbón orgánico asimilable (Assimilable Organic Carbon, AOC)
- Cuenta total bacteriana (Total Bacteria Count, TBC)
- Razón de formación de biopelícula (Biofilm Formation Rate, BFR)

Para la evaluación del ensuciamiento biológico, se recomienda que se tomen múltiples puntos de muestra, como por ejemplo la fuente del agua (superficie, pozo, etc.), la salida del sistema de pretratamiento o punto más cercano a la entrada al sistema OI, el concentrado y por supuesto el permeado.

El cloro es comúnmente usado para aniquilar microbios en el pretratamiento previamente a la entrada a las membranas. Tiene un alto potencial de oxidación-reducción, y está disponible en diferentes formas (como gas, hipoclorito sódico, cloraminas, etc.). Sin embargo, aunque el cloro es eficiente para exterminar microorganismos, también puede causar daños irreversibles en algunos tipos de membranas. Por tanto, si el cloro es usado en el pretratamiento, debe realizarse un proceso posterior de dechloración, empleando para ello filtros de carbón activado o

añadiendo bisulfito sódico. La adición de bisulfito sódico es la técnica más comúnmente empleada.

Cuando se añade metabisulfito sódico ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) a una solución de agua, éste se convierte en bisulfito sódico:



Y el bisulfito sódico reacciona produciendo ácido hipocloroso de la siguiente manera:



La reacción muestra que 1.35mg de bisulfito sódico es requerido por miligramo de cloro libre a reducir. Sin embargo, se suele recomendar usar 2mg de metabisulfito sódico por miligramo de cloro libre. Dicha dosis es aplicada en la última fase antes del proceso OI, y se monitoriza que la reacción de reducción sea completada mediante un potenciómetro. De esta manera, se garantiza que todo el cloro libre haya sido eliminado del agua de alimentación.

Las membranas OI, especialmente de poliamida, tienen una resistencia muy limitada a la oxidación, y ello implica por tanto una limitada resistencia al cloro. Si bien puede soportar un contacto leve y ocasional con el cloro sin sufrir daños severos, se produce una degradación progresiva en la membrana expuesta a oxidantes debido a la pérdida de enlaces cruzados de polímeros, que son cortados por la oxidación. Dicha degradación es más rápida a bajos niveles de pH y puede ser catalizada por la presencia de metales transición y pesados (ej. Fe).

Dado que la membrana de poliamida es muy sensible al cloro libre, el proceso de degradación ocurre inmediatamente tras la exposición al mismo, durando todo el tiempo en el que exista dicho contacto. Además, la degradación podría mantenerse incluso si todo el cloro es eliminado del agua de alimentación. Un daño significativo en la membrana y reducción en el rechazo de sales puede ocurrir tras una exposición al cloro.

El potencial de oxidación-reducción (oxidation/reduction potential, ORP) mide la tendencia de las especies químicas a adquirir electrones, y con ello, atravesar por un proceso de reducción. Cada especie tiene su propio valor ORP, y cuanto mayor sea su valor positivo, mayor es la tendencia para ser reducido, y consecuentemente su capacidad para oxidar otros compuestos. Se muestra en la *tabla 3.4* el ORP para distintos compuestos típicos:

Como se puede comprobar, el cloro no es el desinfectante más eficiente en comparación con el ozono, hidroxilo o peróxido, si bien es el más comúnmente usado gracias a su habilidad para provocar desinfección residual. Debe advertirse, sin embargo, que la aplicación de cloración continua al agua de alimentación no está siempre recomendada. La cloración rompe la materia orgánica disuelta en fragmentos más pequeños que podrán servir como fuente de alimento para

bacterias que hayan sobrevivido al tratamiento de cloración-decloración. Frecuentemente, los sistemas OI que utilizan una cloración-decloración continuada experimentan importante ensuciamiento biológico tras la fase de decloración.

Compuestos	ORP [V]
Hidroxilo	2,8
Ozono	2,1
Peróxido	1,8
Gas cloro	1,4
Hipoclorito	0,9

Tabla 3.4: ORP para distintos compuestos químicos Fuente: Lanxess (guía de diseño).

Además del daño químico provocado por la oxidación, las membranas pueden ser afectadas por un fenómeno físico de degradación: partículas o cristales de incrustaciones podrían provocar abrasión en la superficie de la membrana, disminuyendo sus prestaciones (rechazo de sales).

Todas estas situaciones en las que la integridad de la membrana se pierde, normalmente se pueden prevenir mediante un diseño cuidadoso y apropiado del sistema de pretratamiento.

3.1.7 Concepto de incrustación (scaling)

La incrustación (*scaling*) se debe a la formación de sales solubles e inorgánicas. Al ser expulsadas por las membranas OI, su concentración en el rechazo o concentrado aumenta. Cuando la solubilidad de las sales excede la saturación, éstas precipitan en la superficie de las membranas. Este fenómeno es causado por altos niveles de calcio, sílice, carbonato, sulfato, fosfato y otros iones. La localización más probable de formación de incrustaciones se encuentra al final del último elemento del sistema OI, donde la concentración de sales rechazadas por la membrana es mayor.

La formación de incrustaciones no puede ser tolerada porque causa una disminución del flujo de permeado o producto, aumenta la caída de presión y disminuye el rechazo de sales o soluto. Por tanto, la incrustación tiene un efecto adverso en la capacidad de producción, calidad del producto y consumo de energía. Es claramente esencial incorporar en el proceso de desalación unos parámetros de control que permitan medir el potencial de incrustación, como el LSI o SDSI.

Los tipos de incrustación y los métodos de prevención se muestran en la *tabla 3.5*

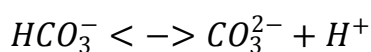
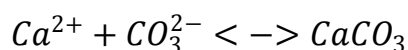
:

Tipo de incrustación	Método de prevención
Carbonato de calcio	Ajuste de pH (reducción). Anti-incrustante
Fosfato de calcio	Ajuste de pH (reducción). Anti-incrustante
Fluoruro de calcio	Anti-incrustante
Sulfatos (Calcio, Bario, Estroncio)	Anti-incrustante
Sílice	Ajuste de pH (incremento). Anti-incrustante

Tabla 3.5: Método de prevención según el tipo de incrustación. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

Para prevenir la formación de incrustaciones, se deben considerar diversas estrategias a implementar, como la adición de un ácido, dosificar un anti-incrustante (inhibidor de incrustación) o ablandamiento del agua y desalcalinización. Debe tenerse en cuenta que el pH y la temperatura influyen en la precipitación de compuestos incrustantes. Además, si resultara necesario, la conversión puede ser ajustada para evitar un aumento en las concentraciones más allá del límite de saturación

- La adición de un ácido puede emplearse para controlar la incrustación causada por el carbonato de calcio y el fosfato de calcio. En el caso del carbonato de calcio, se puede explicar mediante las siguientes ecuaciones químicas:



La dosificación del ácido inclina el equilibrio de la reacción química hacia la izquierda (una disminución del ión de carbonato), y por tanto mantiene al calcio disuelto en la solución. Por otro lado, la adición del ácido disminuye el pH, que puede ser igual o menor que el pH de saturación (pH_s). De esta manera, los valores de LSI o SDSI disminuyen, reduciendo el riesgo de la incrustación de carbonato de calcio sin tener que eliminar el calcio. Normalmente se usa ácido sulfúrico para ajustar el pH, aunque debe tenerse cuidado para minimizar las incrustaciones basadas en sulfatos. En general, al añadir un ácido se debe tener en cuenta qué ocurrirá con el valor de pH del permeado, y diseñar el proceso de postratamiento acorde.

- Los anti-incrustantes son usados para minimizar la potencial formación de incrustaciones mediante el mantenimiento de las sales sobresaturadas en solución, mediante dispersión (que consiste en impartir una carga altamente negativa para la precipitación de cristales, manteniendo así estos separados en la solución y evitando su propagación), o mediante la modificación de la forma de los cristales (de forma que produzcan incrustaciones blandas y poco adherentes). Los componentes de un anti-incrustante son fosfato inorgánico (ej. SHMP, sodium hexametaphosphate), fosfato orgánico, entre otros.
- Cuando la concentración de sólidos disueltos es alta, una fase de coagulación o floculación es comúnmente usada en el diseño del pretratamiento para reducir la concentración en el agua de alimentación. Los coagulantes son sales inorgánicas como sulfato férrico o de aluminio, o bien ciertos compuestos orgánicos.

3.1.8 Parámetro LSI

El índice de saturación de Langelier (Langerier Saturation Index, LSI) es un índice que evalúa la incrustación del carbonato de calcio y la tendencia a la corrosión del agua. Para el proceso de OI, el LSI debe ser calculado para el flujo de concentrado, donde los iones de calcio y bicarbonato tienen la concentración más alta. Se basa en el pH, la dureza del calcio, la alcalinidad, la temperatura y la concentración de sólidos disueltos totales (Total Dissolved Solids, TDS). Así,

$$LSI = pH - pH_s \quad (3.2)$$

Donde:

$$pH_s = pCa + pAlk + C \quad (3.3)$$

$$pCa = 5 - \text{Log}_{10}[Ca^{2+}] \quad (3.4)$$

$$pAlk = 4 - \text{Log}_{10}\left\{\frac{[alcalinidad]}{5}\right\} \quad (3.5)$$

$$C = A + B \quad (3.6)$$

$$A = \frac{(\text{Log}_{10}[TDS]-1)}{10} \quad (3.7)$$

$$B = -13.12 * \text{log}_{10}(^{\circ}C + 273) + 24.55 \quad (3.8)$$

Los parámetros alcalinidad y Ca^{2+} deben introducirse en mg/L (para $CaCO_3$), así como el parámetro TDS.

- Si el valor de LSI > 0, la incrustación del carbonato de calcio podría ocurrir.
- Si LSI = 0, el agua se considera que está en equilibrio químico, y no deberían ocurrir incrustaciones.
- Si LSI < 0, el agua es corrosiva

Para prevenir la incrustación de carbonato de calcio, el ajuste de pH (para reducirlo añadiendo un ácido) es muy efectivo.

El parámetro LSI es usado hasta una concentración TDS= 4000 mg/L. A mayores concentraciones, por ejemplo en la desalación de agua de mar, se suele aplicar el índice de saturación de Stiff y Davis (Stiff and Davis Saturation Index, SDSI)

3.1.9 Parámetro SDSI

Se podría decir que el índice de saturación de Stiff y Davis (Stiff and Davis Saturation Index, SDSI) es el equivalente al parámetro LSI cuando se tratan concentraciones superiores a TDS= 4000 mg/L, y por tanto también se usa para medir el potencial de incrustación. El SDSI se calcula de una manera similar al LSI:

$$SDSI = pH - pH_s \quad (3.9)$$

Donde:

$$pH_s = pCa + pAlk + K \quad (3.10)$$

K, constante basada en la fuerza iónica y la temperatura

Nuevamente, si SDSI>0, la incrustación de carbonato de calcio es considerado como una posibilidad.

3.1.10 Microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración

A diferencia de la ósmosis inversa, que actúa mediante *difusión*, los procesos de microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración actúan únicamente mediante un proceso físico de filtración. La diferencia fundamental entre cada uno de ellos radica en el tamaño de partícula que deja pasar: las membranas de microfiltración permiten filtrar hasta 0.1 μm, las de ultrafiltración permiten filtrar hasta 0.005 μm, y las de nanofiltración permiten filtrar hasta 0.001 micras (fig. 3.1)

La microfiltración, cuando se utiliza como pretratamiento en plantas OI, permite reducir considerablemente los coloides (orgánicos e inorgánicos), que suelen ser tener un tamaño de 0.1-10 μm. Esto supondrá una disminución del SDI del agua de alimentación, con lo cual resulta especialmente conveniente para aquellos casos en los que el ensuciamiento debido a coloides en el agua captada sea considerable. Además, también permite filtrar bacterias y otras micropartículas. En cuanto a sus membranas, pueden ser de flujo cruzado o directo, y la mayoría son de naturaleza orgánica.

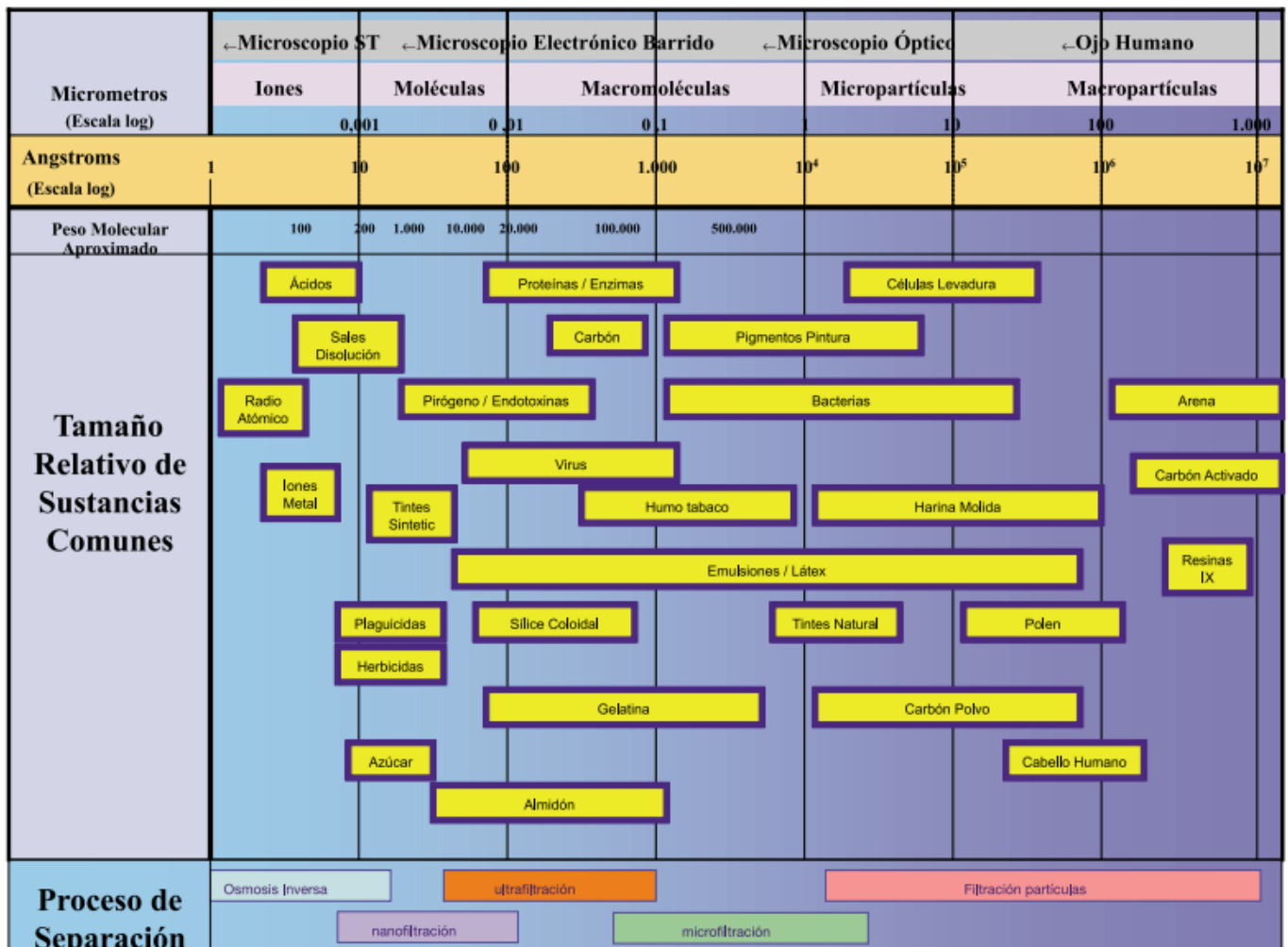


Figura 3.1: Escala de filtración de la microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)

Las membranas de ultrafiltración son una solución intermedia entre la microfiltración y la nanofiltración, permitiendo además, respecto a las primeras, la retención de virus, proteínas, y en general macromoléculas y moléculas de menor tamaño (fig. 3.2)

La nanofiltración es el último paso en lo que a filtración se refiere, dado que las membranas tienen un tamaño de poro en torno a un nanómetro, pudiendo considerarse como membranas selectivas de iones. Esto último se debe a que pueden filtrar fácilmente iones divalentes, trivalentes, tetravalentes... pero los iones monovalentes son filtrados en una mucha menor medida que con la ósmosis inversa.

Del mismo modo que para la ósmosis inversa, se requiere un pretratamiento del agua para evitar su atascamiento; es decir, debe realizarse un filtrado progresivo hasta llegar a las mismas. En la figura 3.3 se muestra una membrana de nanofiltración con configuración en espiral.

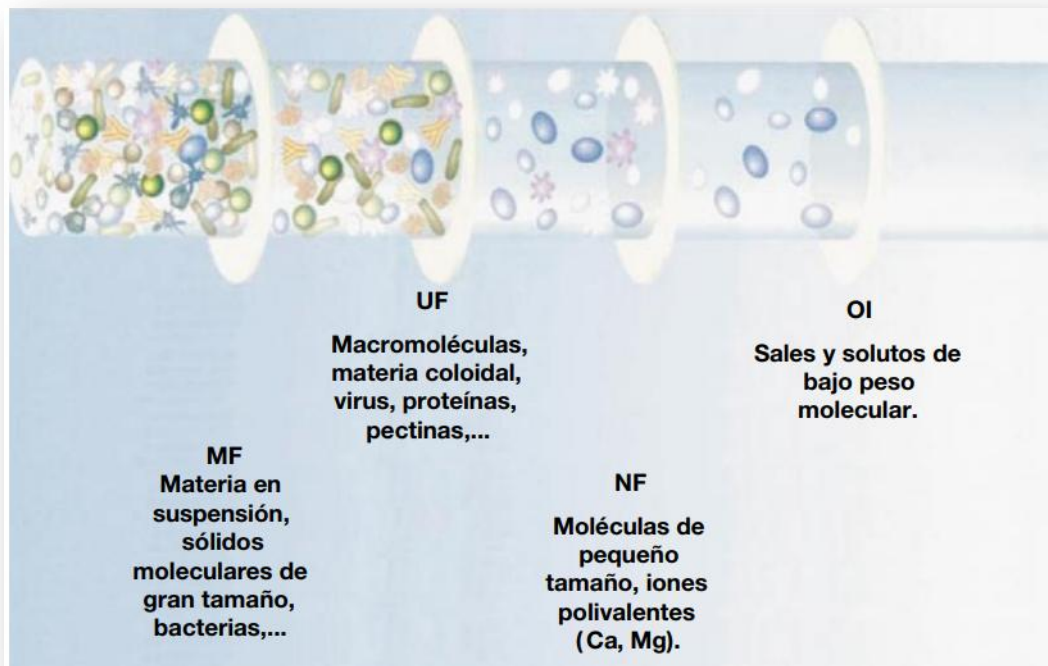


Figura 3.2: Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y OI. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)

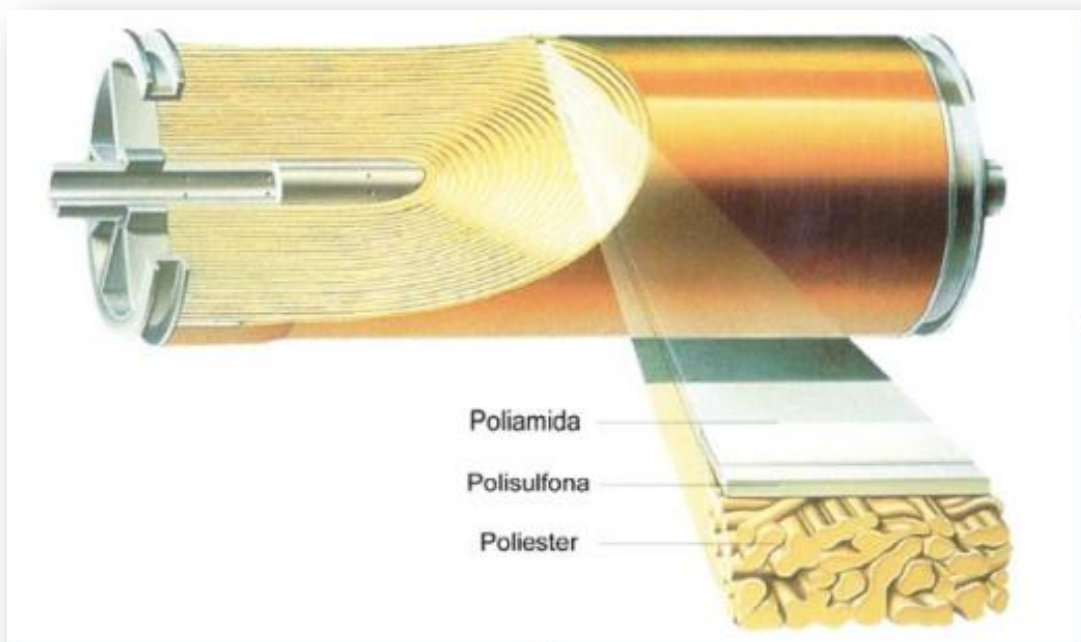


Figura 3.3: Membrana de nanofiltración con configuración en espiral. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)

3.1.12 Resumen de las posibles opciones de diseño del pretratamiento

En relación al ensuciamiento y la formación de incrustaciones, se pueden distinguir dos tipos de mecanismos:

- Material que daña químicamente la membrana
- Material que bloquea físicamente el flujo

Los materiales de la primera categoría se considera que modifican la estructura química de la membrana mediante oxidación, hidrólisis y disolución, lo cual ocurre por medio de agentes oxidantes como el cloro o el oxígeno libre, bases o ácidos fuertes, y solventes orgánicos.

Los materiales de la segunda categoría corresponden al ensuciamiento y materiales incrustantes. El ensuciamiento puede ser debido a bacterias, coloides y compuestos orgánicos, incluyendo proteínas, carbohidratos, hidrocarburos, materia natural orgánica y compuestos orgánicos catiónicos. El incrustamiento en las membranas se debe al aumento en la concentración de sales por encima de sus límites de solubilidad, y su precipitación en la superficie de la membrana. Ensuciantes inorgánicos (incrustaciones) incluyen a las sales de calcio, hidróxidos metálicos, sílice, entre otros.

En general, se debe mejorar el pretratamiento, o añadir más fases para el mismo, cuando los siguientes parámetros se encuentran fuera de los valores recomendados (*tabla 3.6*):

Parámetro	Valor deseado
SDI [adim]	< 3
Turbidez [NTU]	< 0.5
LSI [adim]	≤ 0
SDSI [adim]	≤ 0

Tabla 3.6: Valores recomendados para los parámetros de pretratamiento. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

Finalmente, se muestra en la tabla 3.7 un resumen las opciones de pretratamiento para los diversos tipos de ensuciamiento e incrustaciones.

Pretratamiento	Ensuciamiento por partículas	Ensuciamiento orgánico	Incrustaciones	Ensuciamiento biológico
Filtración	SÍ	NO	NO	SÍ
Microfiltración/ ultrafiltración	SÍ	NO	NO	SÍ
Filtración por cartuchos	SÍ	NO	NO	NO
Coagulación / floculación	SÍ	SÍ	NO	NO
Cloración / decloración	NO	NO	NO	SÍ
Adición de ácido	NO	NO	SÍ	NO
Adición de antiincrustante	NO	NO	SÍ	NO
Ablandamiento	NO	NO	SÍ	NO
Desalcalinización	NO	NO	SÍ	NO

Tabla 3.7: Opciones de pretratamiento según el tipo de ensuciamiento. Fuente: Lanxess (guía de diseño).

3.2 Postratamiento

El postratamiento se emplea para adaptar la calidad del agua producto al uso final que se le quiera dar. Se mencionan a continuación los postratamientos más comúnmente empleados:

3.2.1 Ajuste de pH:

Un pH demasiado bajo (< 6.5) del agua aumenta su agresividad, y no es apta para consumo humano. Para incrementar de nuevo el pH existen diversos modos:

- Mediante dosificación de componentes químicos: La sosa caustica y el carbonato sódico son componentes químicos que permiten reducir el pH.
- Mediante descarbonadores : Permiten reducir las concentraciones de CO₂, lo cual contribuye a disminuir el pH. Los descarbonadores son dispositivos que consisten básicamente en una torre por donde entra el agua a través de difusores. A continuación, el agua es filtrada por un lecho de material, con un caudal de aire a contracorriente que arrastra el gas disuelto (CO₂) y lo evacúa por la parte superior de la torre hacia la atmósfera. Este dispositivo,

por tanto, producirá una pérdida de carga en el fluido, lo que puede justificar la necesidad de una bomba adicional para el postratamiento.

3.2.2 Desionización

Mediante intercambio iónico con resinas, que permite eliminar iones del agua y adaptar el agua a un uso más específico. Se usará un intercambio iónico usando resinas para eliminar iones del agua para determinados usos del agua cuando se requiera.

3.2.3 Remineralización

La remineralización es necesaria en tanto que el agua de permeado suele salir con baja dureza (bajas concentraciones en minerales) y alcalinidad, lo cual debe corregirse antes de ser distribuida para el consumo humano o incluso el regadío. Deben aportarse minerales como bicarbonatos, magnesio y calcio. Esta corrección, que suele realizarse previamente a la esterilización, puede realizarse mediante varias maneras:

- Mediante mezcla de aguas: consiste en mezclar el agua producto con otra que haya sido tratada previamente, con el fin de remineralizar la misma. Esta opción resulta especialmente conveniente cuando se dispone de agua para mezclar de origen dulce o pozos de agua salobre, o bien en los casos en el que el agua a desalar sea salobre y no de mar. Si se pretende desalar agua de mar y sólo se dispone de agua de mar para la mezcla, no resulta práctica esta opción dada la alta contaminación en forma de sales que se produciría en el permeado.
- Mediante dosificación de componentes químicos: También se pueden dosificar componentes químicos para remineralizar el agua producto. Esta es la opción viable para el caso en el que se pretenda desalar agua de mar y no se disponga de agua dulce o salobre para la mezcla de aguas. Entre los procedimientos empleados se encuentra la dosificación de sosa cáustica; de bicarbonato sódico + cloruro magnésico; o de CO₂ + cal viva, calcita, hidróxido de calcio o torres de dolomitas.

3.2.4 Esterilización

Normalmente, antes de la llegada del agua al consumidor final, ésta debe almacenarse en algún depósito. Este hecho aumenta la probabilidad de que el agua pueda de nuevo contaminarse. Por ello, la normativa requiere esterilizar nuevamente el agua, con el fin de eliminar posibles microorganismos y garantizar la calidad del agua. Para ello se puede emplear:

- Cloración. Es lo más común. Se puede usar gas cloro (de bajo coste, aunque de manipulación más peligrosa), hipoclorito sódico (de bajo coste) o hipoclorito cálcico (bajo coste, y además aportando una cierta

remineralización de calcio). En cualquier caso, el cloro añadido se eleva hasta una concentración de aproximadamente 1ppm. A posteriori se requiere una decloración mediante bisulfito sódico para evitar daños en las membranas, especialmente si éstas son de poliamida.

- Ozonización.
- Radiación ultravioleta. La ventaja es que no requiere añadir más componentes químicos al agua, por lo que su composición queda inalterada.

3.2.5 Control de olor, color y sabor

Con filtros de lecho y carbón activado se consigue, normalmente en la fase final, que el agua sea inodora, incolora e insípida.

4. ¿De qué otras maneras se puede desalar el agua?

Además de la ósmosis inversa, existen otros procesos que cumplen el mismo objetivo (la desalación del agua) de otras formas - algunos usando también membranas, y otros mediante un proceso de evaporación. Así, cabe destacar:

4.1 Otros métodos de desalación mediante membranas

4.1.1 Electrodialisis

La electrodialisis consigue separar los iones disueltos positivos y negativos (aniones y cationes) del agua a desalar. Para ello se emplea:

- Membranas selectivas de cationes y de aniones
- Un electrodo negativo y otro positivo.

Cuando se hace pasar *corriente eléctrica* a través de los electrodos, los iones son atraídos por el electrodo de polaridad opuesta, y forzados a pasar a través de las respectivas membranas selectivas, quedando así el agua libre de sales – es decir, desalada.

Por tanto, en el caso de la electrodialisis, a diferencia de la ósmosis inversa, lo que se mueve a través de las membranas es el soluto. Normalmente se apilan varios pares de células electrolíticas en lo que se conoce como pilas de electrodialisis (figura 4.2)

También se suele invertir la polaridad de los electrodos periódicamente (cada 2-4 horas) para cambiar el sentido de paso de los iones a través de las membranas, con el objetivo de prevenir incrustaciones y distintas formas de suciedad en su superficie.

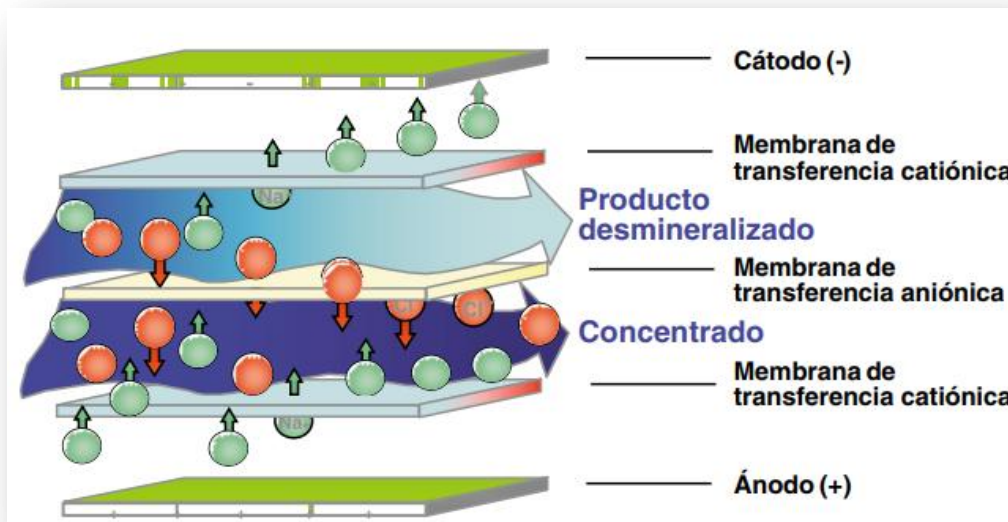


Figura 4.1: Esquema del proceso de electrodiálisis. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)

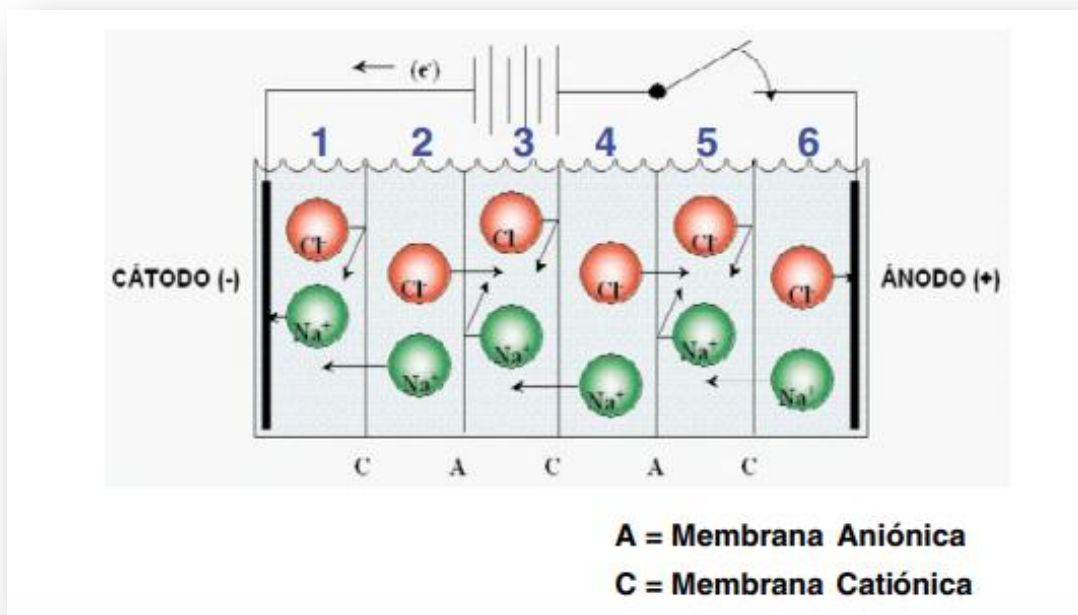


Figura 4.2: Pila de electrodiálisis. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)

Cabe decir que, para la desalación de agua de mar, la electrodiálisis no se considera competitiva con la ósmosis inversa.

4.1 Desalación mediante la evaporación del agua

En general, se busca transformar el agua de mar desde su estado líquido inicial, a un estado de vapor. De esta manera, se consigue separar el agua de sus sales – pues éstas quedan en la base del depósito, en forma de salmuera. El vapor producido deberá luego condensarse para obtener agua desalada en estado líquido.

La fuente térmica empleada para la evaporación, y el proceso seguido a continuación para su posterior condensación, define cada método o proceso industrial de desalación en particular.

4.1.1 Evaporación instantánea multietapa (MSF)

Este proceso requiere de cámaras que mantengan una presión inferior a la presión de saturación del agua. Así, cuando se introducen gotas de agua de mar en su interior, éstas *evaporan instantáneamente*, dejando la salmuera acumulada en el fondo del depósito. Dicho vapor se condensa a posteriori, para obtener de nuevo el agua en estado líquido.

Sin embargo, un único proceso de evaporación y condensación no es suficiente para una desalación completa, ya que parte del fluido queda sin evaporar. Se requiere repetirlo en *múltiples etapas* (en algunos casos hasta más de veinte veces), y cada etapa requiere presiones decrecientes.

En la figura 4.3 se muestra un diagrama del proceso MSF completo, y en la figura 4.4 su ciclo termodinámico.

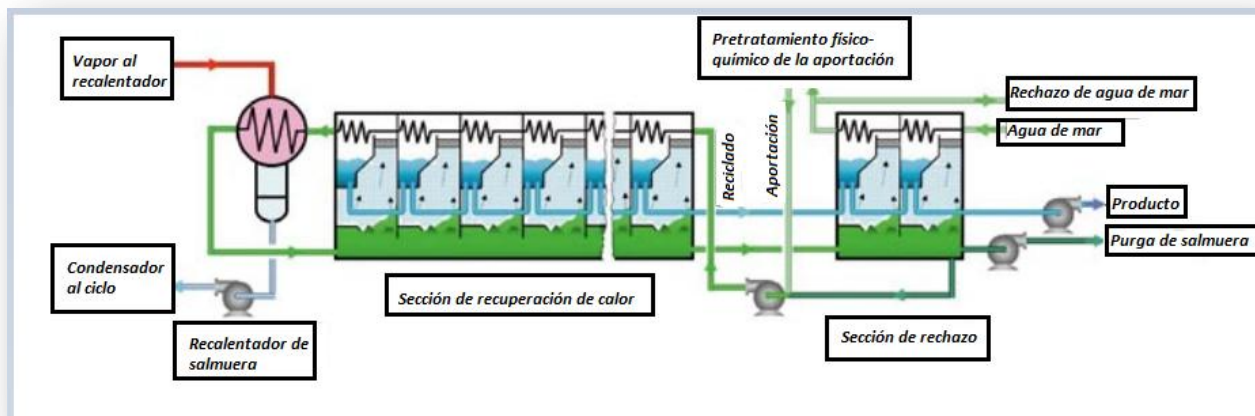


Figura 4.3: Proceso MSF. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)

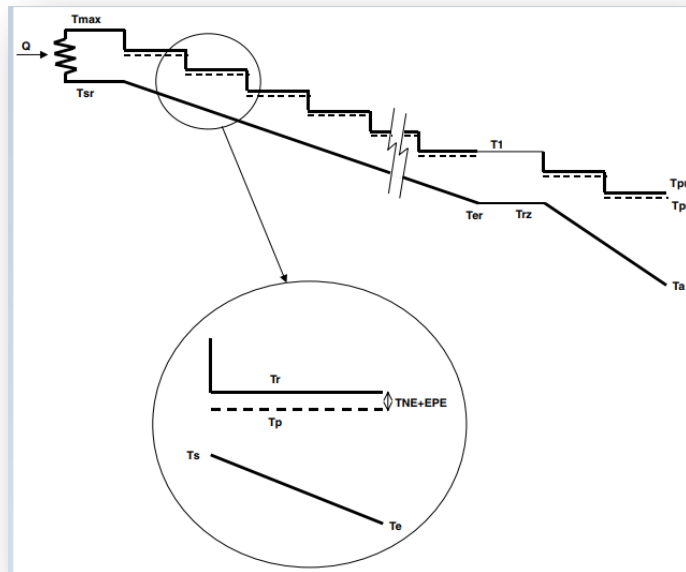


Figura 4.4: Ciclo termodinámico MSF. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)

4.1.2 Destilación multiefecto (MEF)

En este caso se utilizan intercambiadores de calor, idóneamente aprovechando el calor residual de otras plantas o procesos industriales. Sobre éstos y en condiciones de vacío se pulveriza el agua de mar, que evapora – dejando en el fondo la salmuera. El vapor obtenido luego se condensa para obtener agua líquida. Al igual que para MSF, MEF requiere de repetir este proceso múltiples veces, en este caso recirculando la salmuera para obtener la máxima conversión con la máxima conversión. En la figura 4.5 se muestra un diagrama del proceso, y en la figura 4.6 el ciclo termodinámico seguido.

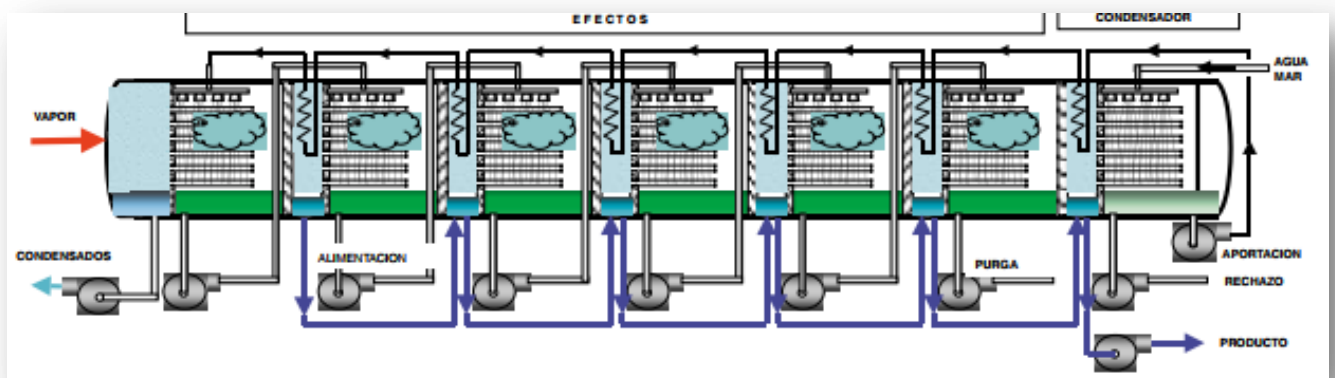


Figura 4.5: Proceso MEF. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)

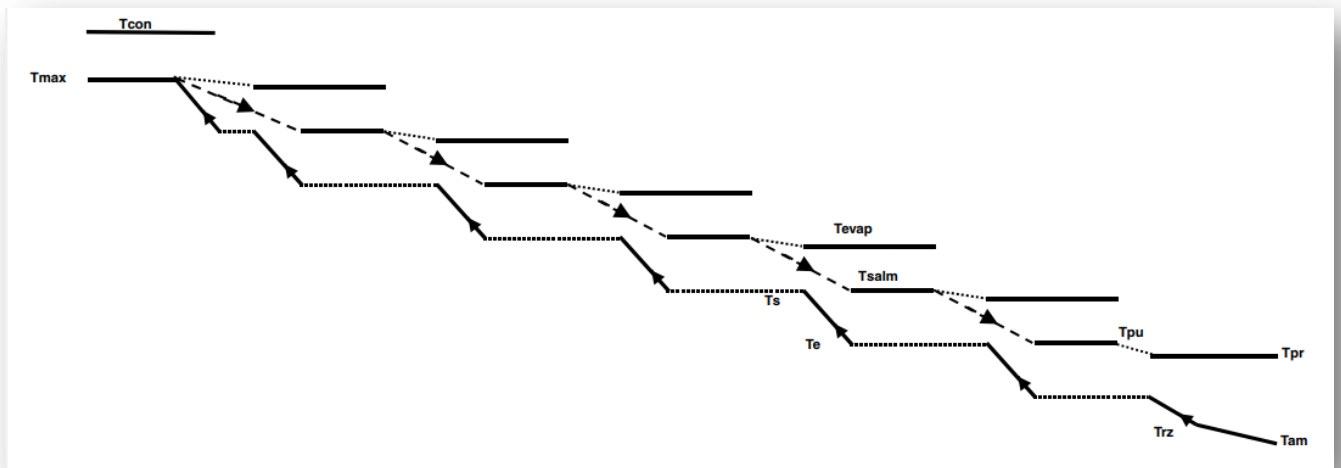


Figura 4.6: Ciclo termodinámico MEF. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)

4.1.3 Compresión de vapor

En este caso se utiliza un *compresor*, cuyo calor residual provocado durante el proceso de compresión provoca la evaporación del agua – donde se separa el agua de sus sales. Dicho compresor aumenta la presión de este vapor producido, y lo lleva a un intercambiador de calor, donde el agua se condensa y obtiene en estado líquido. Este calor absorbido en la condensación del agua se puede aprovechar para otros procesos industriales.

En la figura 4.7 se muestra un diagrama del proceso, y en la figura 4.8 su ciclo termodinámico.

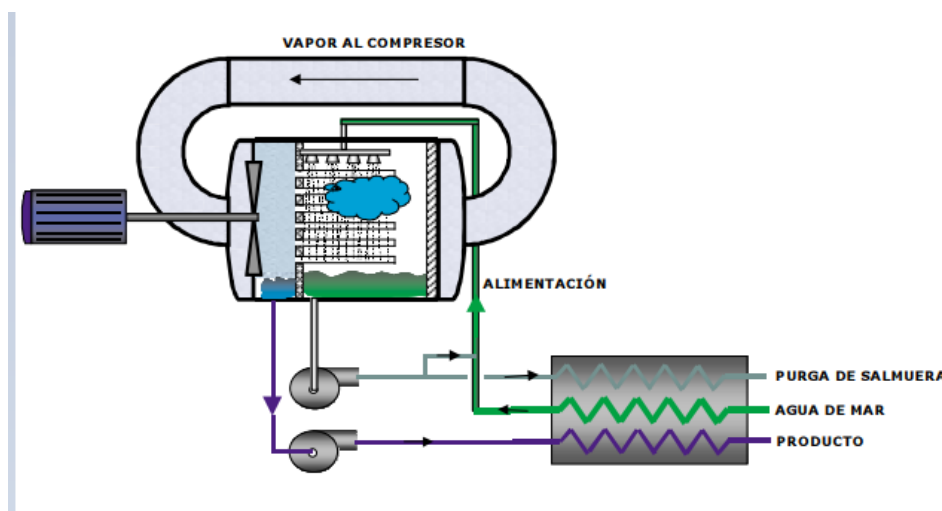


Figura 4.7: Proceso CV. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)

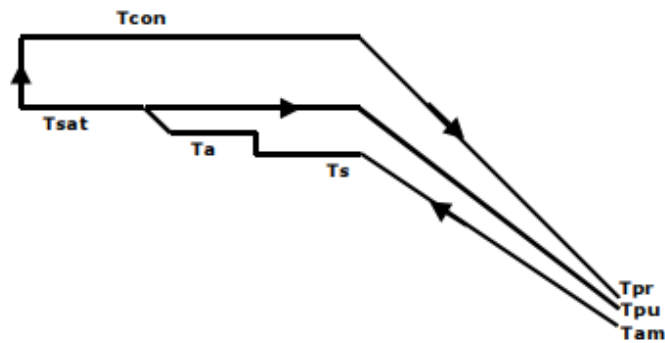


Figura 4.8: Ciclo termodinámico CV. Fuente: Guía de Desalación, aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano (2009)

5. ¿Qué son los dispositivos de recuperación de energía?

5.1 Descripción general

El agua de rechazo o concentrado sale con una cierta energía en forma de presión que, en lugar de ser vertida al mar, se puede aprovechar para el propio sistema OI. Para ello se emplean los dispositivos de recuperación de energía (Energy Recovery Device, ERD), que consiguen capturar dicha presión y transferirla al fluido de alimentación, reduciendo así el consumo de energía necesario para la bomba de alimentación (fig. 5.1) Los equipos que más comúnmente se emplean para este propósito son la turbina Pelton, el turbochanger, y el intercambiador de energía isobárico.

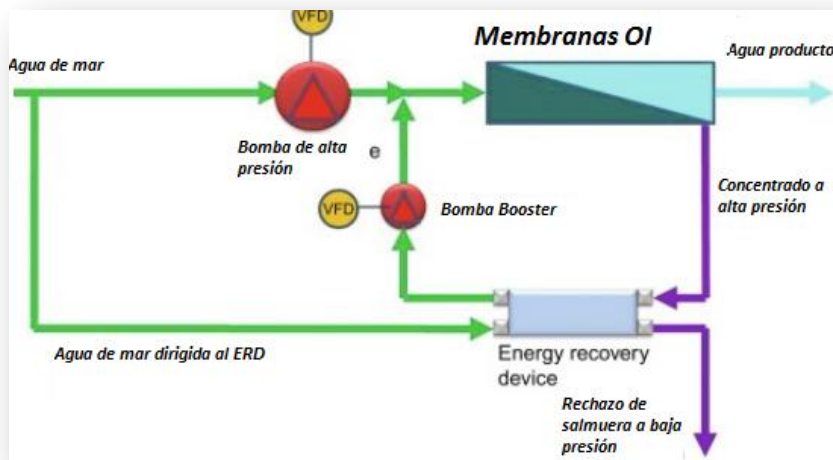


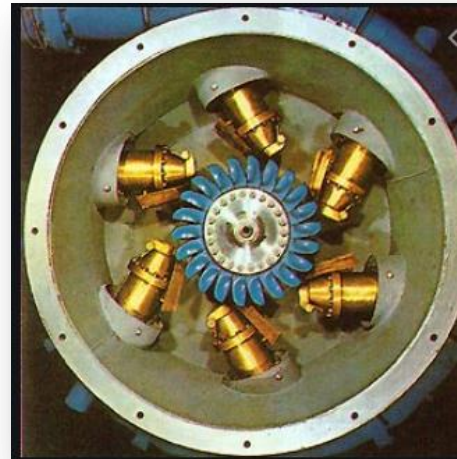
Figura 5.1: Esquema básico general de un ERD típico. Fuente: sciencedirect.com

5.2 Turbina Francis

Actualmente, dado su bajo rendimiento (en torno a 77%), se encuentra en desuso, si bien fue el primer recuperador de energía en desarrollarse. Consistía en una bomba invertida, movida por el flujo de rechazo. Ésta es conectada a un motor que alimenta a su vez a la bomba de alta presión (fig. 5.2)

5.3 Turbina Pelton

El agua de rechazo se hace pasar a través de una turbina con álabes en forma de cuchara, conocida como 'turbina Pelton', que es movida por el flujo de rechazo, transformando así su energía de presión en energía mecánica (cinética) mediante el movimiento rotativo producido en sus álabes. Sobre su eje se acopla el motor de la bomba de alta presión, consiguiendo de ésta manera transmitir la energía del flujo de rechazo al flujo de alimentación (fig.5.3). Cuenta con un rendimiento mayor a la turbina Francis (en torno a 88%).



Figuras 5.2 y 5.3: Fotografía de una turbina Francis (izq) y Pelton (dcha). Fuente: solar-energia.net

5.4 Turbocharger

Se trata, básicamente, de un conjunto bomba-turbina.

Este equipo se sitúa entre la bomba de alimentación y el bastidor de membranas, y está formado por una turbina y una bomba instaladas sobre el mismo eje – eliminando así la necesidad de utilizar un motor de accionamiento eléctrico para la misma (figs. 5.4 y 5.5)



Figuras 5.4 y 5.5: Fotografía anterior (izq) y posterior (dcha) de un turbocharger. Fuente: theboostlab.com

De nuevo, se transforma la energía asociada a la presión del fluido en energía mecánica a través de la turbina, la cual es transmitida directamente a la bomba para así cumplir con la función del aumento de presión del agua de alimentación.

5.5 Intercambiador de presión isobárico

En este caso, se introducen tanto el agua de rechazo o concentrado como una fracción del agua de captación en la cámara del dispositivo, donde se produce un 'intercambio de presión' (el agua de captación 'absorbe' la presión del agua del concentrado). Tras esto, el concentrado se dirige hacia la salida del sistema y el agua de captación, ahora a alta presión, se añade al agua de alimentación ya impulsada por la bomba de alta presión. El proceso anterior se puede conseguir de dos maneras: mediante cámaras de desplazamiento positivo y mediante cámaras de desplazamiento rotativo.

El funcionamiento mediante desplazamiento positivo básicamente consiste en introducir a través de una cámara el fluido de agua de captación (o agua de alimentación a baja presión) y el fluido de rechazo (a alta presión), que al entrar en contacto entre sí (que puede ser tanto directa como indirectamente, separados por un pistón) se transmiten la presión mutuamente, dando lugar, a la salida de la cámara, de agua de alimentación a alta presión. Para sistemas de dos pasos, se utilizan dos cámaras en paralelo que alternan su operación mediante válvulas.

En el caso del funcionamiento mediante desplazamiento rotativo, se utiliza un rotor con una serie de canales abiertos que permiten el paso de una corriente de fluido u otra, lo que permite prescindir de válvulas, si bien el contacto entre fluidos es siempre directo (no existe la opción de colocar un pistón separador). En primer lugar, se produce el llenado de una tobera con agua de captación (o agua de alimentación a baja presión), que desplaza al agua de rechazo a baja presión que

quedaba en la tobera del ciclo anterior. A continuación, la tobera comienza a llenarse también del flujo de rechazo a alta presión, que provoca la expulsión del agua de alimentación, ahora a alta presión.



Figura 5.6: Modelo iSave 50. Fuente: Danfoss



Figura 5.7: Modelo PX-Q300. Fuente: Energy Recovery

Este dispositivo suele alcanzar el mejor rendimiento (superior a 90%). Dado que la presión de salida del agua de alimentación tras el ERD es un poco inferior a la presión de salida del agua de alimentación tras la BAP, se necesita, no obstante, una bomba adicional a la salida del intercambiador, conocida como 'booster', y cuya función es igualar la presión entre ambos flúidos. En las figuras 5.6 y 5.7 se pueden observar ERD isobáricos de los principales fabricantes en este campo: Energy Recovery y Danfoss.

6. ¿Qué es la energía eólica?

6.1 Descripción de la energía eólica

La energía asociada al movimiento del aire (viento) se denomina energía eólica. Dicho movimiento se genera por una densidad heterogénea, a consecuencia de un calentamiento desigual de la superficie terrestre por medio del Sol (fig. 6.1)

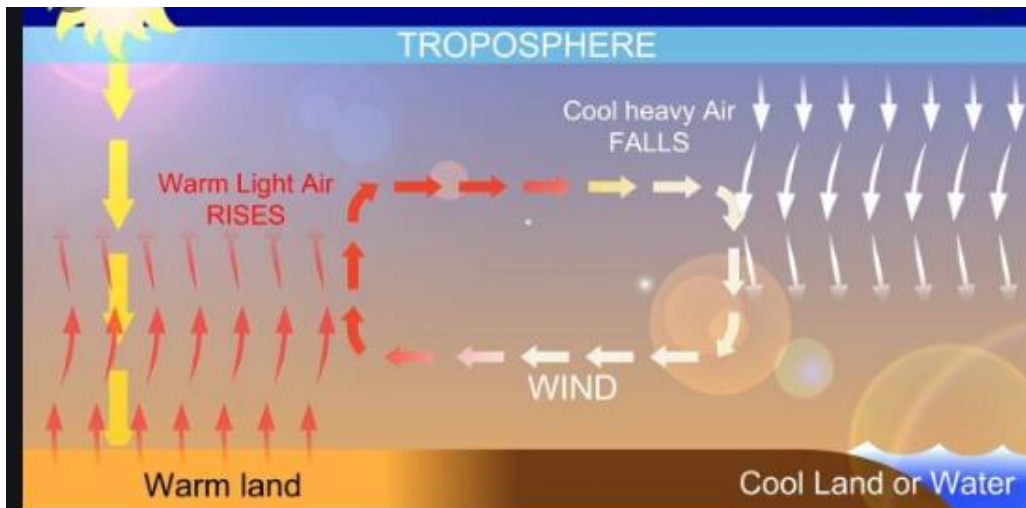


Figura 6.1: Esquema de formación del viento. Fuente: Chrvoje engineering

6.2 Ventajas e inconvenientes de la energía eólica

6.2.1 Ventajas

En general, presenta las ventajas de las energías renovables, es decir:

- Prácticamente inagotable
- No contaminante

Además, desde un punto de vista práctico, y en comparación con la energía solar, normalmente necesita menores requerimientos de superficie para la misma generación energética.

6.2.2 Inconvenientes

Destaca principalmente su variabilidad en función del lugar, y su aleatoriedad e intermitencia a lo largo del tiempo. Todo ello impide conocer con seguridad la cantidad exacta de generación de energía que se puede obtener en un momento futuro determinado – pudiendo únicamente estimarse su comportamiento en función de datos históricos medidos previamente en el mismo lugar, o aproximarse mediante técnicas como el proceso estadístico de la distribución de Weibull.

6.3 El aerogenerador

Un aerogenerador es una turbina eólica que captura y transforma la energía cinética del viento en energía mecánica, y ésta última en eléctrica.

- El rotor se encarga de captar y transformar la energía eólica en energía mecánica. Para ello emplea unas palas (normalmente tres) que comienzan a rotar a consecuencia del viento. Sus dimensiones determinan la superficie de barrido, lo cual determinará a su vez su capacidad de captación.

En la práctica, se requiere una velocidad del viento mínima o de arranque para que las palas comiencen a girar (en torno a 3 m/s), y existe una velocidad máxima o de parada de seguridad que bloquea el rotor en caso de vientos muy fuertes (>25 m/s) para evitar que se produzcan tensiones excesivas que produzcan daños en el aerogenerador.

El rotor normalmente se encuentra situado sobre una corona al final de la torre, que permite su giro para orientarse automáticamente en la dirección predominante o de mayor energía cinética del viento. Para ello cuenta además con una veleta y un anemómetro en la parte superior,

- La góndola es el lugar donde se transforma la energía mecánica del rotor en energía eléctrica. Para ello se utilizan engranajes multiplicadores acoplados a un generador eléctrico, que permiten elevar la velocidad de giro desde 13rpm hasta unas 1500 rpm.

En cuanto a la altura idónea de la góndola, hay que tener en cuenta que la energía cinética del viento es proporcional a su velocidad y a su masa. Por tanto, un viento a menor temperatura (que, debido a la diferencia de densidades, se encontrará a menor altitud), tendrá una mayor densidad y con ello, una mayor masa – lo que implica un mayor potencial para generar energía. Sin embargo, el aerogenerador debe situarse a una altitud lo suficientemente elevada para impedir que los obstáculos circundantes del terreno actúen de pantalla frente al viento, frenándolo y disminuyendo su velocidad.

- La torre soporta la estructura y sitúa a la góndola a una determinada altura, lo cual tendrá influencia sobre la cantidad de energía cinética captada, como se ha comentado anteriormente.

Por el interior de la torre se conduce la energía eléctrica generada en la góndola hasta la base del aerogenerador, y desde allí normalmente continúa subterráneamente hasta la subestación, donde se eleva la tensión y se incorpora a la red eléctrica.

En la figura 6.2 se muestra un diagrama básico de sus partes.

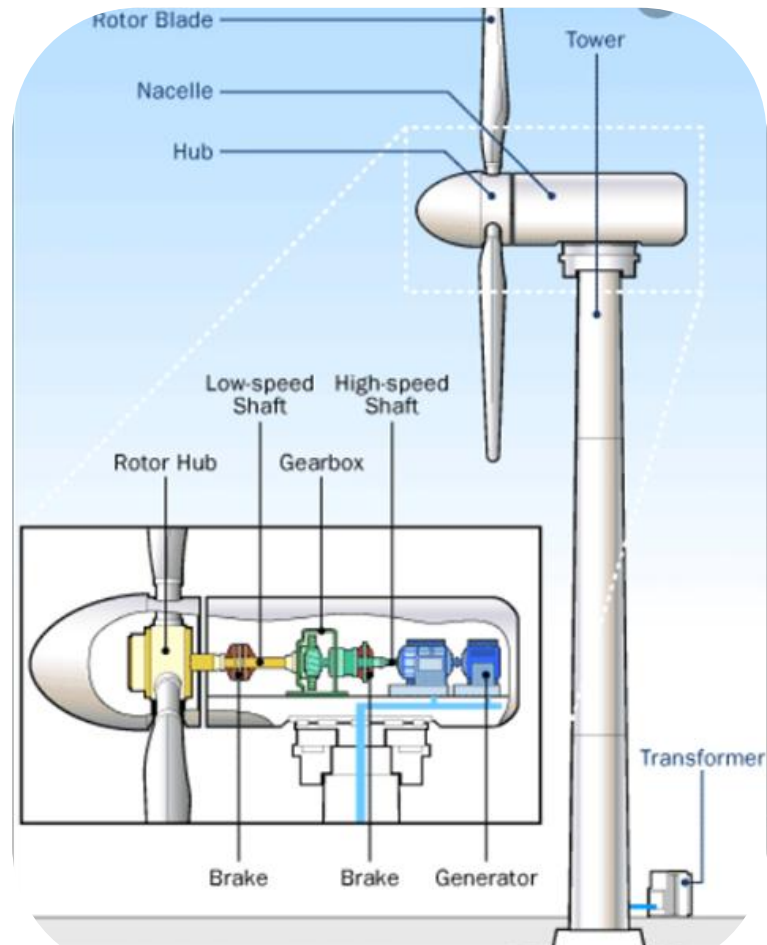


Figura 6.2: Diagrama básico de las partes del aerogenerador. Fuente: engineerlive.com

También existen aerogeneradores con su eje de rotación dispuesto verticalmente (fig. 6.3), de tal manera que las palas del rotor quedan horizontales, pero es mucho menos usado que el anterior, debido a que:

- No permite aprovechar la variación de la velocidad del viento con la altura respecto al suelo
- La superficie barrida es menor respecto al aerogenerador de eje vertical
- Sus características de velocidad y par son menos adecuadas para el accionamiento de un generador eléctrico
- En general, presenta un rendimiento menor, y para menores de intervalos de velocidad del viento

Como ventajas:

- El generador y la transmisión se ensambla cerca del suelo, lo que facilita las labores de mantenimiento al prescindir de una torre
- Pueden servir como alternativa para aquellos lugares en los que instalar un aerogenerador horizontal no está permitido debido a la altura de la torre.

- Pueden ser instalados en pequeñas laderas o colinas donde los vientos de mayor velocidad son más frecuentes
- Este tipo de aerogenerador no necesita mecanismo de parada de seguridad, lo que permite seguir funcionando con vientos fuertes y caóticos.



Figura 6.3: Fotografía de aerogenerador vertical. Fuente: lbaindustrial.com.mx

6.4 Conceptos teóricos básicos

6.4.1 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull de dos parámetros (factor de escala C y factor de forma K) es una técnica que permite conocer la probabilidad asociada a una determinada velocidad del viento v en un lugar concreto.

$$f(v) = \frac{K}{c} * \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (6.1)$$

6.4.2 Límite de Betz

Más de un tercio de la energía del viento no puede ser obtenida por ningún sistema de captación. El límite de Betz indica la máxima cantidad de energía que puede ser extraída del viento desde un punto de vista teórico: 59.3%. En el hipotético caso de que fuera posible extraer la totalidad de su energía, se estaría deteniendo el viento por completo (es decir, su velocidad final pasaría a ser cero), y de ser así, éste no podría continuar pasando de manera continua a través de las aspas de la turbina eólica – lo que pone de manifiesto la imposibilidad de que esto ocurra.

6.4.3 Coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia es el cociente entre la potencia específica (por unidad de área de rotor) generada por el sistema de captación y la potencia incidente en esa misma área. Expresa la cantidad de energía que, en la práctica, un aerogenerador es capaz de extraer del viento. Típicamente se sitúa entre el 35 y el 45%, no

existiendo ninguno que alcance el límite teórico de Betz debido a las pérdidas mecánicas que suceden inevitablemente en el proceso de transformación de la energía cinética del viento en energía cinética de rotación.

6.4.4 Factor de carga

El factor de carga es la relación que existe entre la energía que genera el aerogenerador y la energía que generaría si operase a plena carga (máxima potencia) durante el mismo período de tiempo.

$$\text{Factor de carga (FC)} = \frac{\text{Energía generada}}{\text{Energía que generaría a plena carga}} \quad (4.1)$$

Así, un factor de carga del 100% implicaría que el aerogenerador ha estado actuando a plena carga (en su potencia nominal) todo el tiempo. Esta situación ideal prácticamente no se cumple nunca, ya que la variabilidad de las condiciones eólicas impide que el aerogenerador se mantenga a plena carga (en su potencia nominal). Es decir, la energía generada siempre será menor que la energía que generaría a plena carga.

Existe un criterio común para clasificar la idoneidad de utilizar un cierto aerogenerador respecto a otro en función del factor de carga (tabla 6.1)

Factor de carga	Valoración
< 20%	Insuficiente
20% a 25%	Aceptable
25% a 30%	Bueno
30% a 40%	Muy bueno
40% a 50%	Excelente
> 50%	Extraordinario

Tabla 6.1: Factor de carga y valoración. Fuente: Ingeniería de la energía eólica, Miguel Villarrubia López

6.4.5 Clase de un aerogenerador en función del régimen de viento

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), en la norma IEC-61400-1, clasifica a las turbinas eólicas según la velocidad y turbulencia del viento. Así, si tenemos únicamente en cuenta el parámetro de la velocidad media del viento (ignorando el parámetro de turbulencia para simplificar el análisis), se establecen las siguientes clases:

- Clase 0: Para velocidad media del viento superior a 10m/s
- Clase I: Para velocidad media del viento hasta 10m/s
- Clase II: Para velocidad media del viento hasta 8.5m/s
- Clase III: Para velocidad media del viento hasta 7.5m/s
- Clase IV: Para velocidad media del viento hasta 6 m/s

Así, conocido el recurso eólico del entorno, y conocida la clase de cada aerogenerador, se puede elegir aquél que mejor se adapta. Las clases menores (asociadas a mayores velocidades del viento) se relacionan con aerogeneradores más grandes, que permiten soportar mejor las tensiones causadas por vientos más fuertes (dada su mayor área de barrido).

De esta manera, una turbina eólica o aerogenerador de clase II, por ejemplo, podrá operar como clase III o IV, si bien no como clase I o 0, ya que estará condicionado por su tamaño y correspondiente área de barrido.

Los aerogeneradores no incluidos en estas clases se consideran como clase S, donde valores de diseño son especificados directamente por el proyectista.



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

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO II:

**ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE
EMPLAZAMIENTO EN CANARIAS**

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

**DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA
ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES**

Autor: Alexander Hernández García

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Índice de contenido

1. Estudio de alternativas en Gran Canaria	1
1.1 Filtrado de zonas naturales protegidas	1
1.2 Filtrado de recurso eólico aceptable	2
1.3 Filtrado según la proximidad a otras EDAM	3
1.4 Filtrado según la ordenación del territorio.....	3
1.5 Búsqueda de potenciales alternativas de ubicación.....	3
1.5.1 Alternativa 1 (descartada)	4
1.5.2 Alternativa 2 (seleccionada)	4
1.5.3 Alternativa 3 (descartada)	11
2. Estudio de alternativas en Fuerteventura	12
2.1 Filtrado de zonas naturales protegidas	12
2.2 Filtrado de zonas con recurso eólico aceptable.....	12
2.3 Filtrado según la proximidad a otras EDAM	13
2.4 Filtrado según la ordenación del territorio.....	14
2.5 Estudio de alternativas en Fuerteventura	14
2.5.1 Alternativa 4 (descartada)	14
2.5.2 Alternativa 5 (descartada)	15
2.5.3 Alternativa 6 (seleccionada)	15
3. Estudio de alternativas en Lanzarote	22
3.1 Filtrado de zonas naturales protegidas	22
3.2 Filtrado de zonas con recurso eólico aceptable.....	22
3.3 Filtrado según la proximidad a otras EDAM	23
3.4 Filtrado según la ordenación del territorio.....	23
3.5 Estudio de alternativas en Lanzarote	24
3.5.1 Alternativa 7	24

4. Resumen de alternativas seleccionadas y solución final...25**Índice de figuras**

Figura 1.1: Filtrado de zonas protegidas en Gran Canaria. Elaboración propia.....	1
Figura 1.2: Filtrado de zonas con recurso eólico aceptable en Gran Canaria. Elaboración propia.....	2
Figura 1.3: Comparativa de los filtros aplicados. Elaboración propia.....	2
Figura 1.4: Ubicación de otras EDAM en Gran Canaria. Elaboración propia.	3
Figura 1.5: Alternativa 1. Fuente: Grafcan.....	4
Figura 1.6: Alternativa 2. Fuente: Grafcan.....	4
Figura 1.7: Suelo urbano en la alternativa 2. Fuente: Grafcan.....	5
Figura 1.8: Usos del suelo en la alternativa 2. Fuente: Grafcan	5
Figura 1.9: Información catastral, parcela para la EDAM (alternativa 2). Fuente: Catastro	6
Figura 1.10: Ubicación provisional, parcela para la EDAM (alternativa 2). Fuente: Catastro	6
Figura 1.11: Información catastral, parcela para los pozos (alternativa 2). Fuente: Catastro	7
Figura 1.12: Información catastral, parcela para los pozos (alternativa 2). Fuente: Catastro	7
Figura 1.13: Información catastral, parcela para aerogenerador (alternativa 2). Fuente: Catastro.....	7
Figura 1.14: Información catastral, parcela para aerogenerador (alternativa 2). Fuente: Catastro.....	8
Figura 1.15: Información catastral, parcela para aerogenerador (alternativa 2). Fuente: Grafcan.....	8
Figura 1.16: Población en Puerto de Sardina. Fuente: citypopulation.de	9
Figura 1.17: Población en Barrial. Fuente: citypopulation.de	10
Figura 1.18: Población en Gáldar capital. Fuente: citypopulation.de	10

Figura 1.19: Alternativa 3. Fuente: Grafcan.....	12
Figura 2.1: Filtrado de zonas protegidas, Fuerteventura. Elaboración propia	12
Figura 2.2: Filtrado de zonas con recurso eólico aceptable, Fuerteventura. Elaboración propia.....	13
Figura 2.3: Ubicación de otras EDAM, Fuerteventura. Elaboración propia..	13
Figura 2.4: Alternativa 4. Elaboración propia	14
Figura 2.5: Alternativa 5. Elaboración propia	15
Figura 2.6: Alternativa 6. Elaboración propia	15
Figura 2.7: Información catastral de la parcela inferior (alternativa 6). Fuente: Catastro	16
Figura 2.8: Información catastral de la parcela inferior (alternativa 6). Fuente: Catastro	16
Figura 2.9: Ubicación provisional para la EDAM y los pozos (alternativa 6). Fuente: Grafcan.....	17
Figura 2.10: Localidades a abastecer, alternativa 6. Fuente: Citypopulation.de	17
Figura 2.11: Población en Costa de Antigua. Fuente: Citypopulation.de	18
Figura 2.12: Población en El Castillo. Fuente: Citypopulation.de.....	18
Figura 2.13: Población en Caleta de Fuste. Fuente: Citypopulation.de	19
Figura 2.14: Ubicación para el aerogenerador (punto verde). Opción A, alternativa 6. Fuente: Grafcan	21
Figura 2.15: Ubicación para el aerogenerador (punto verde). Opción B, alternativa 6. Fuente: Grafcan	21
Figura 2.16: Ubicación para el aerogenerador (punto verde). Opción C, alternativa 6. Fuente: Grafcan	21
Figura 3.1: Filtrado de zonas naturales protegidas en Lanzarote. Elaboración propia.....	22
Figura 3.2: Filtrado de zonas con recurso eólico aceptable en Lanzarote. Elaboración propia.....	22
Figura 3.3: Ubicación de otras EDAM en Lanzarote. Elaboración propia	23

Figura 3.4: Filtrado según la ordenación del territorio en Lanzarote. Elaboración propia.....	23
Figura 3.5: Alternativa 7. Fuente: Grafcan.....	24

Índice de tablas

Tabla 1.1: Estimación de la capacidad mínima de la planta. Elaboración propia.....	11
Tabla 2.1: Estimación de la capacidad mínima de la planta. Elaboración propia.....	19
Tabla 4.1: Potenciales alternativas de ubicación seleccionadas. Elaboración propia.....	25

1. Estudio de alternativas en Gran Canaria

El visor online Grafcan (IDECanarias) no permite visualizar múltiples capas simultáneamente. Es decir: no es posible activar, por ejemplo, las capas de 'recurso eólico' y de 'zonas naturales protegidas' al mismo tiempo – al intentar activar una segunda capa, la primera queda desactivada automáticamente.

Esto es un inconveniente, en tanto que se requiere 'memorizar visualmente' las zonas de interés. Así, si quisiéramos encontrar potenciales regiones para ubicar la planta de desalación que cumplan las condiciones de poseer un recurso eólico aceptable, no estar situado en el interior de zonas naturales protegidas, poseer suelo urbanizable y encontrarse relativamente lejano a otras EDAM, sería necesario un laborioso y repetitivo contraste entre las diferentes capas.

Por tanto, para facilitar esta tarea de filtración de lugares que cumplan simultáneamente todas estas condiciones, se ha decidido crear manualmente una serie de capas o 'filtros' que se pueden solapar sin inconvenientes. Para ello, se ha utilizado la herramienta 'dibujo' que ofrece el propio visor online.

1.1 Filtrado de zonas naturales protegidas

Así, el primer filtro a aplicar ha sido el correspondiente a las zonas naturales protegidas, que se han coloreado en blanco opaco (fig. 1.1):

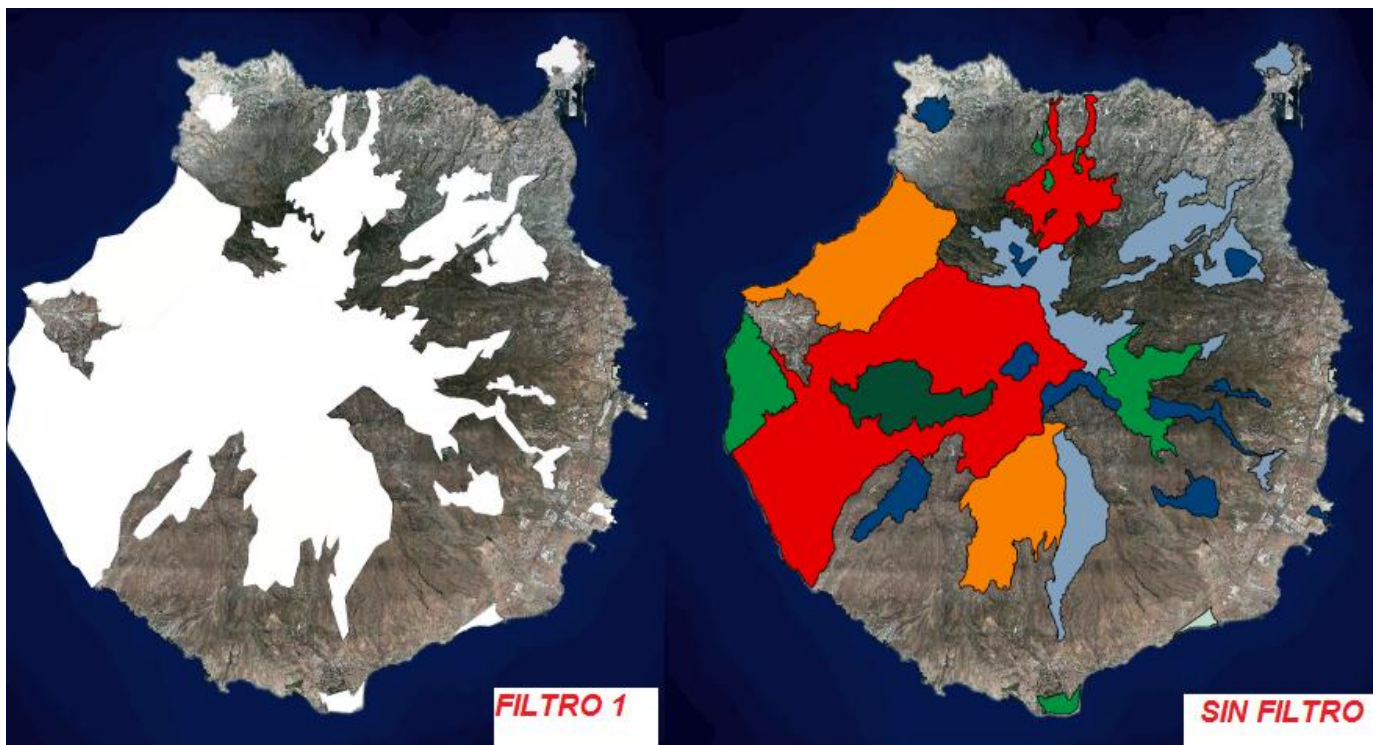


Figura 1.1: Filtrado de zonas protegidas en Gran Canaria. Elaboración propia

1.2 Filtrado de recurso eólico aceptable

Como segundo filtro (*fig 1.2*), se han situado bajo un contorno rojo las zonas con recurso eólico aceptable, entendidas como aquellas cuya velocidad del viento es igual o superior a 7 m/s (colores rosados, naranjas y rojos), filtrando así el resto de lugares en los que la velocidad del viento es inferior (verdes y blancos).

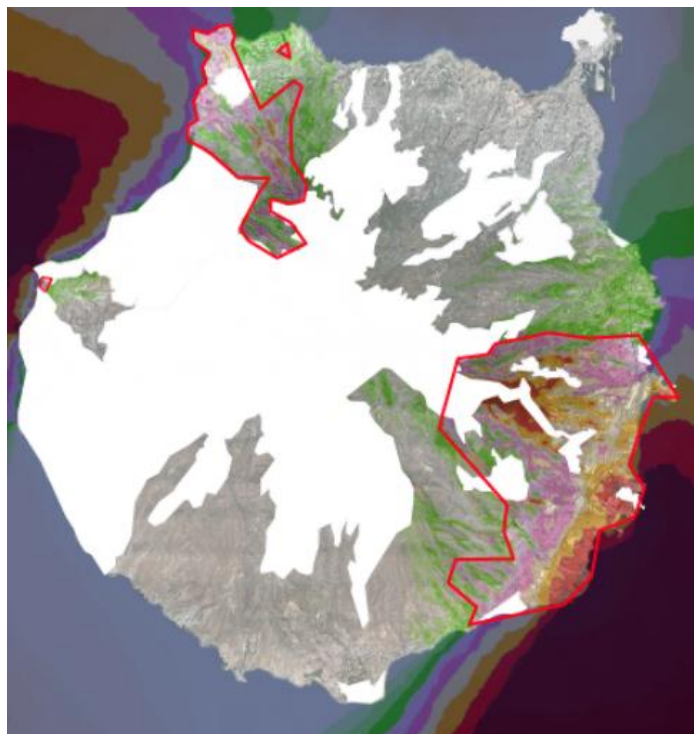


Figura 1.2: Filtrado de zonas con recurso eólico aceptable en Gran Canaria. Elaboración propia

Para facilitar la comprensión del proceso realizado hasta ahora, se muestra también una comparativa de los filtros aplicados bajo la capa de recurso eólico en el visor Grafcan (*fig. 1.3*).

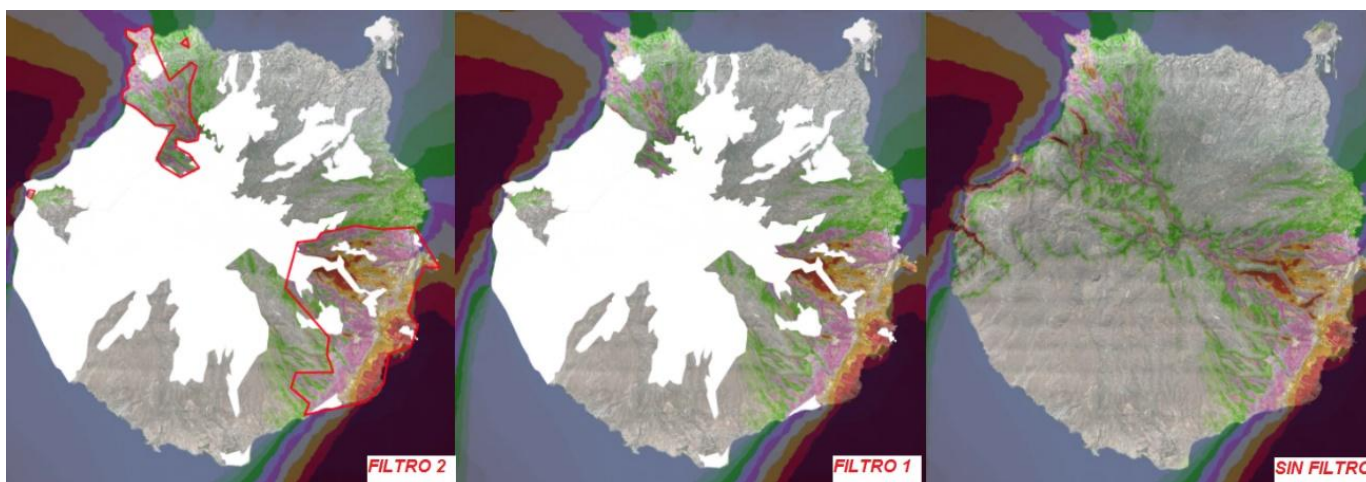


Figura 1.3: Comparativa de los filtros aplicados. Elaboración propia

1.3 Filtrado según la proximidad a otras EDAM

A continuación, se muestran en la figura 1.4 las ubicaciones de las EDAM de capacidad media (entre 2000 y 10000 m³/día, puntos azules) y grande (superior a 10000m³/día, puntos rojos) presentes en la isla:



Figura 1.4: Ubicación de otras EDAM en Gran Canaria. Elaboración propia

1.4 Filtrado según la ordenación del territorio

Ahora podemos aplicar la capa de ordenación del territorio en búsqueda de suelo urbanizable; que aparece en el visor Grafcan en color dorado.

De esta manera, podemos buscar directamente (sin necesidad de ir continuamente contrastando entre diferentes capas) un lugar en el que colocar la EDAM y el parque eólico, que idealmente deberá estar situado en suelo urbanizable (color dorado), fuera de las zonas protegidas (capa blanca), próximo a una zona con recurso eólico aceptable (contorno en rojo), y alejado de las EDAM de mediano y gran tamaño (puntos azules y rojos).

1.5 Búsqueda de potenciales alternativas de ubicación

Tras aplicar los cuatro filtros anteriores, encontramos tres potenciales alternativas de ubicación en la isla de Gran Canaria.

1.5.1 Alternativa 1 (descartada)

La alternativa 1 (*fig. 1.5*), ubicada en Agüimes, se encuentra en un lugar de gran recurso eólico y relativamente alejada de una desaladora de capacidad media (Sureste III), pero se descarta al haber sido escogida anteriormente por un compañero con un TFG similar al presente (véase repositorio institucional ULL, 'Estudio de un sistema de desalación alimentado con energía eólica para abastecimiento humano en Gran Canaria', por Marvin Jozef González Van leeuwe)

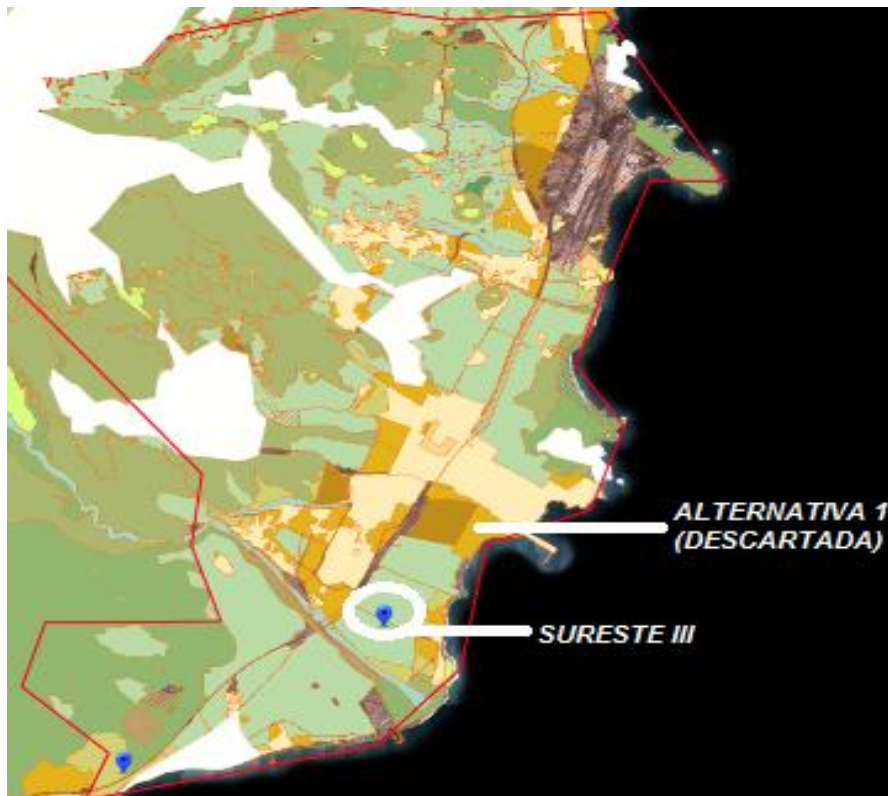


Figura 1.5: Alternativa 1. Fuente: Grafcan

1.5.2 Alternativa 2 (seleccionada)

La alternativa 2 (*fig. 1.6*) se encuentra en Gáldar, en una región conocida como 'Barranquillo del Vino'



Figura 1.6: Alternativa 2. Fuente: Grafcan



Figura 1.7: Suelo urbano en la alternativa 2. Fuente: Grafcan

Al estudiar los usos del suelo (fig 1.8) en el interior de la zona clasificada como suelo urbano (fig. 1.7), se comprueba que en dicha región hay fundamentalmente vegetación escasa (amarillo). Se puede comprobar que existen diversos núcleos de población (en rojo) lo suficientemente alejados, a los que se podría abastecer mediante agua de consumo humano. Alternativamente, también se encuentran diversos cultivos a los que podría servir de riego.



Figura 1.8: Usos del suelo en la alternativa 2. Fuente: Grafcan

Además, se confirma que no existen otros parques eólicos instalados o en trámite próximos a dicho lugar. Por tanto, se establecen provisionalmente las siguientes parcelas a partir de la base de datos del catastro: para la ubicación de la EDAM en sí (fig 1.9), para los pozos (fig. 1.11) y para el parque eólico (fig. 1.13). Se muestra también la correspondiente ubicación en el territorio en las figuras 1.10, 1.12 y 1.14

DATOS DESCRIPTIVOS DEL INMUEBLE	
Referencia catastral	1251104DS311550001AL  
Localización	UR SAU-PLAYA CANARIA 14(H) Suelo PARCELA 14-H 35469 GALDAR (LAS PALMAS)
Clase	Urbano
Uso principal	Suelo sin edif.

PARCELA CATASTRAL		
	Localización	UR SAU-PLAYA CANARIA 14(H) PARCELA 14-H GALDAR (LAS PALMAS)
	Superficie gráfica	2.738 m ²

Figura 1.9: Información catastral, parcela para la EDAM (alternativa 2). Fuente: Catastro

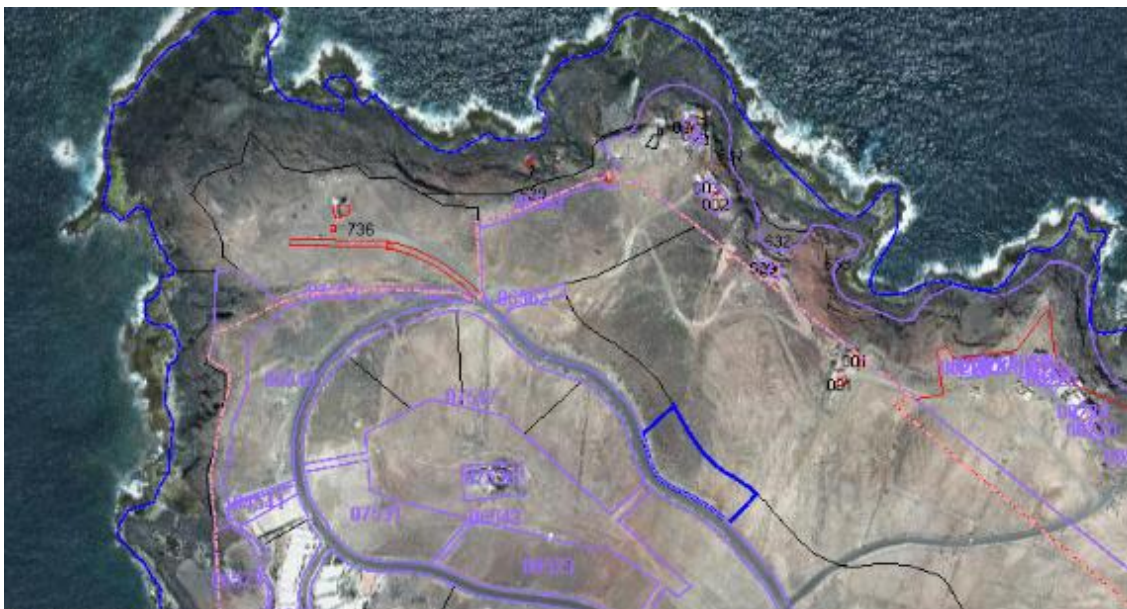


Figura 1.10: Ubicación provisional, parcela para la EDAM (alternativa 2). Fuente: Catastro

DATOS DESCRIPTIVOS DEL INMUEBLE	
Referencia catastral	1251101DS3115S0001UL  
Localización	UR SAU-PLAYA CANARIA Suelo PARCELA H-2 35469 GALDAR (LAS PALMAS)
Clase	Urbano
Uso principal	Suelo sin edif.

PARCELA CATASTRAL	
	Localización UR SAU-PLAYA CANARIA PARCELA H-2 GALDAR (LAS PALMAS)
	Superficie gráfica 7.582 m ²

Figura 1.11: Información catastral, parcela para los pozos (alternativa 2). Fuente: Catastro



Figura 1.12: Información catastral, parcela para los pozos (alternativa 2). Fuente: Catastro

Referencia catastral	1147801DS3114N0001GJ  
Localización	UR SAU-PLAYA CANARIA Suelo PARCELA H-1 35469 GALDAR (LAS PALMAS)
Clase	Urbano
Uso principal	Suelo sin edif.

PARCELA CATASTRAL	
	Localización UR SAU-PLAYA CANARIA PARCELA H-1 GALDAR (LAS PALMAS)
	Superficie gráfica 9.920 m ²

Figura 1.13: Información catastral, parcela para aerogenerador (alternativa 2). Fuente: Catastro

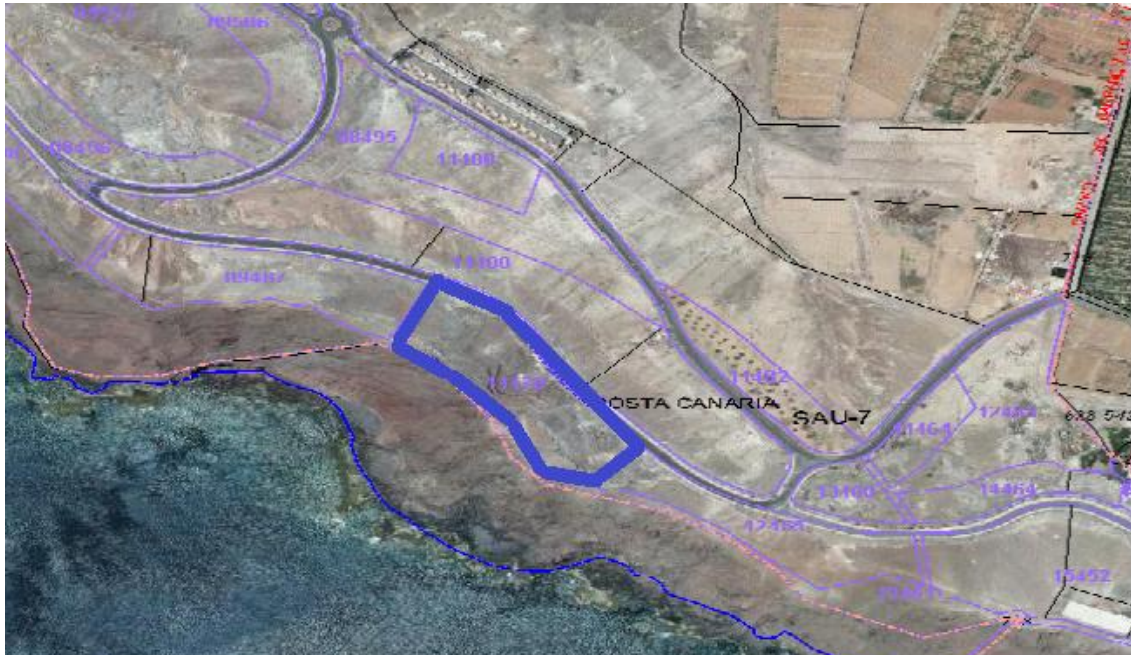


Figura 1.14: Información catastral, parcela para aerogenerador (alternativa 2). Fuente: Catastro

Se muestra en la figura 1.15 un esquema general con todas las parcelas provisionales anteriormente escogidas:

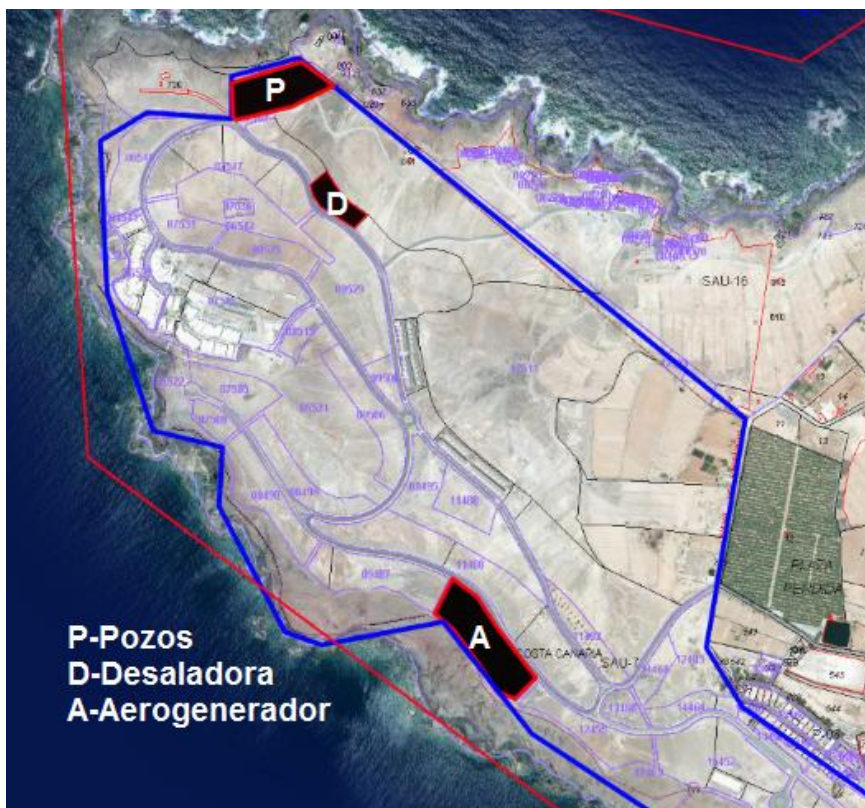


Figura 1.15: Información catastral, parcela para aerogenerador (alternativa 2). Fuente: Grafcan

Estas ubicaciones serán definitivas si se toma esta alternativa como la más adecuada, tras la comparación con el resto. En el caso particular del aerogenerador o parque eólico, se debe comprobar también que cumpla con la normativa al respecto (véase anexo VII).

En Gran Canaria, según PHGC, el consumo medio de agua en hogares por habitante y día es de 186 litros (PHGC). Como se pretende dimensionar una planta de capacidad pequeña o media (al menos 2000 m³/día), ello implica que las poblaciones a satisfacer deben contar con al menos 11000 habitantes.

Para conocer la población de las localidades circundantes a la ubicación escogida, se utilizará la herramienta online 'citypopulation.de', que cuenta con una base de datos que incluye a la mayoría de las localidades del mundo y además realiza automáticamente estimaciones de la población actual a partir de los últimos datos reales disponibles, facilitando además la variación anual. Así, se tiene que, para el año 2019:

- Puerto de Sardina (*fig. 1.16*) : 2897 habitantes (-0.41% / año)
- Barrial (*fig. 1.17*) : 2058 habitantes (+0.33% / año)
- Gáldar capital (*fig. 1.18*): 9932 habitantes (-0.34% / año)

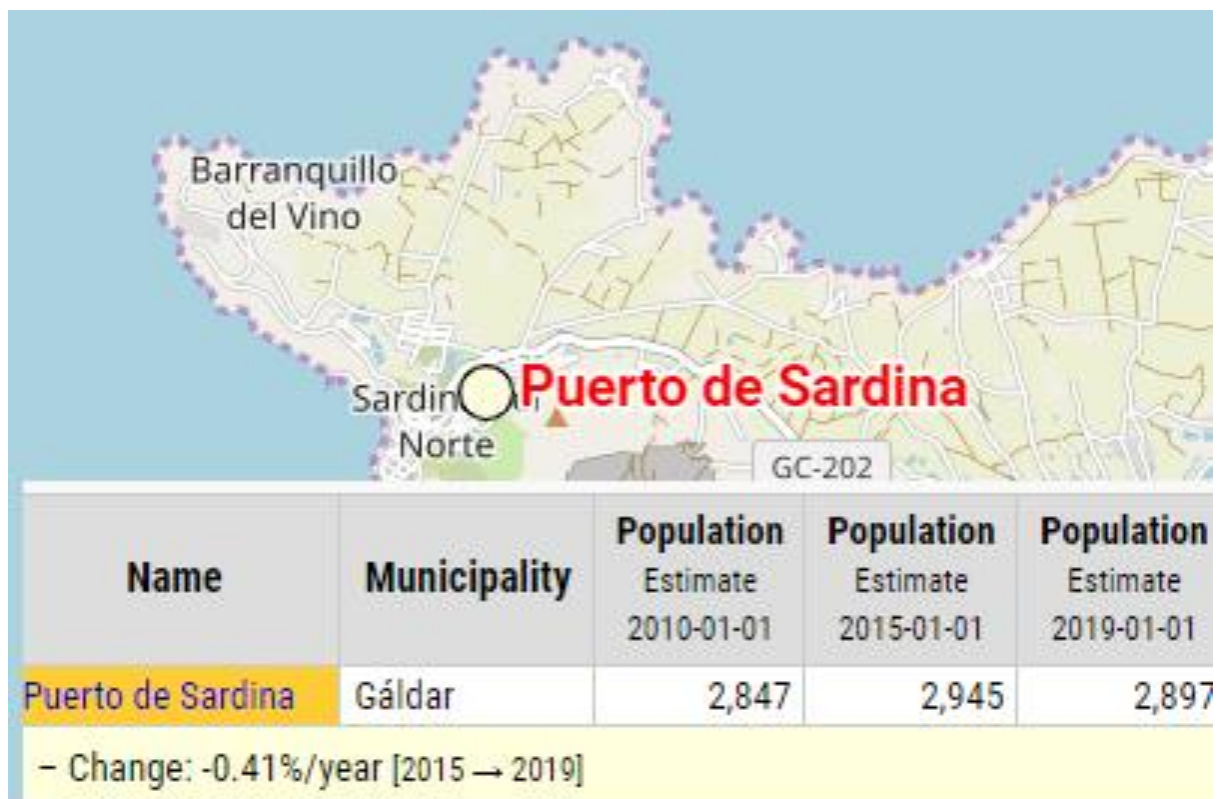


Figura 1.16: Población en Puerto de Sardina. Fuente: citypopulation.de

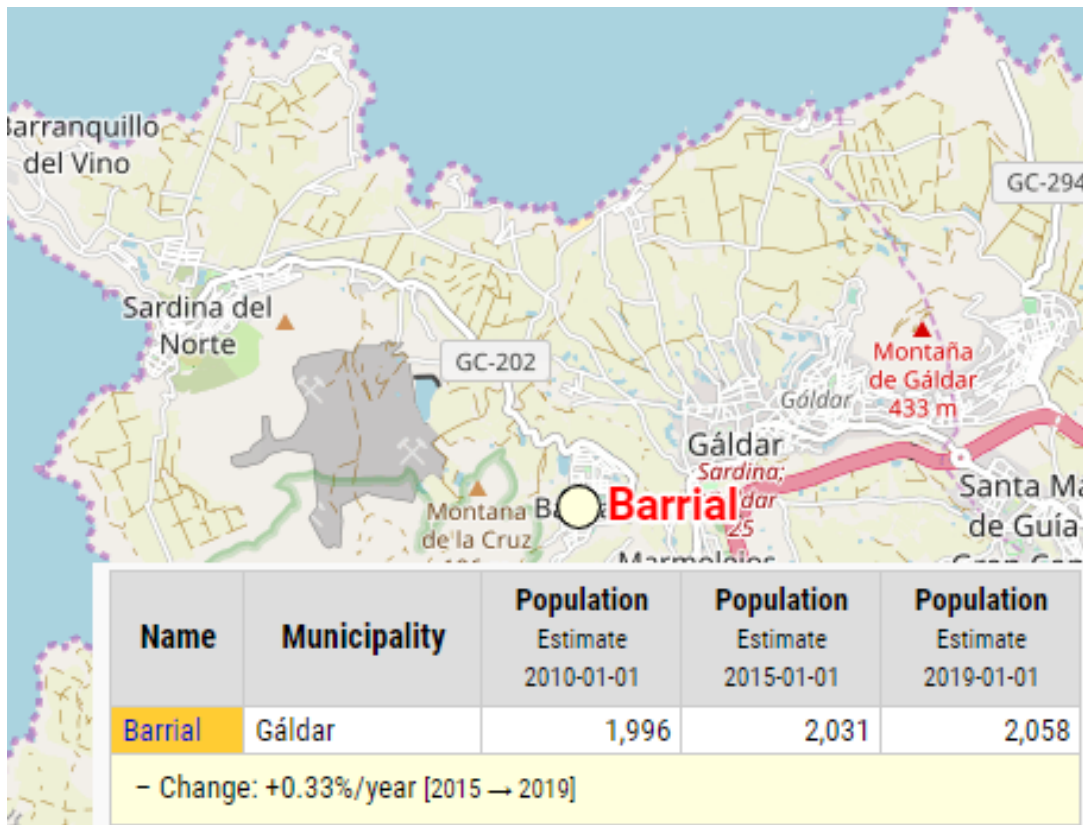


Figura 1.17: Población en Barrial. Fuente: citypopulation.de

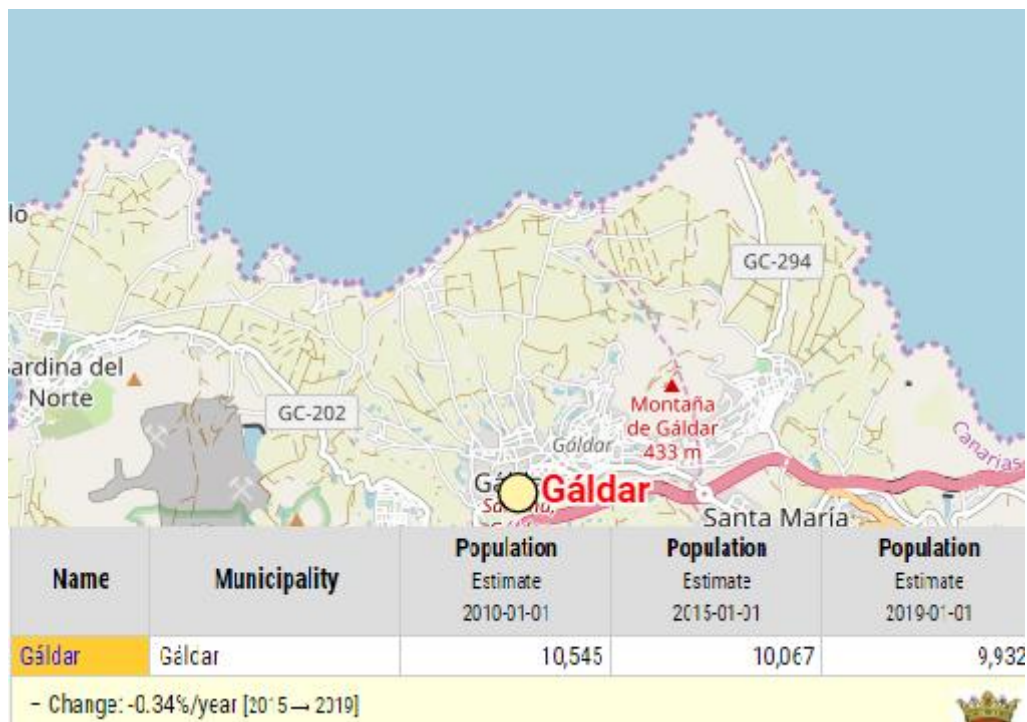


Figura 1.18: Población en Gáldar capital. Fuente: citypopulation.de

A partir del dato de población en 2019 y la variación anual desde 2015 a 2019, podemos estimar la población que existirá en los próximos 6 años, hacia 2025. Con este dato, y suponiendo que tanto la variación anual de población y el consumo de agua en hogares por habitante se mantenga prácticamente constante, podemos estimar la capacidad mínima necesaria para la EDAM (*tabla 1.1*).

	Puerto de Sardinia (hab)	Barrial (hab)	Galdar capital (hab)	Total (hab)	Consumo (l/hab*día)	Capacidad mínima (m ³ /día)
2019	2897	2058	9932	14887	186	2769
2020	2885	2065	9898	14848	186	2762
2021	2873	2072	9865	14809	186	2755
2022	2862	2078	9831	14771	186	2747
2023	2850	2085	9798	14733	186	2740
2024	2838	2092	9764	14695	186	2733
2025	2826	2099	9731	14657	186	2726

Tabla 1.1: Estimación de la capacidad mínima de la planta. Elaboración propia.

Ante la incertidumbre sobre un posible crecimiento de la población y/o del consumo de agua en hogares mayor del esperado, y con el objetivo de asegurar una completa satisfacción de la demanda de agua para consumo humano en la zona, se decide ampliar la capacidad de la planta hasta **3000m³/día**. A partir de este año, si se desea continuar con la EDAM operativa, se deberá realizar un nuevo estudio de la población con datos reales actualizados, para llevar así a cabo una ampliación de su capacidad si fuese necesario.

1.5.3 Alternativa 3 (descartada)

La alternativa 3 (*fig. 1.19*), ubicada en Agaete, se descarta al estar demasiado cerca de núcleos de población (a los que podría afectar, por ejemplo, el parque eólico), estar ocupada por cultivos herbáceos (que habría que abandonar) y además, poseer un menor recurso eólico que la alternativa 2 (en torno a 7 m/s en lugar de 8 m/s).



Figura 1.19: Alternativa 3. Fuente: Grafcan

2. Estudio de alternativas en Fuerteventura

2.1 Filtrado de zonas naturales protegidas

Al igual que se hizo con Gran Canaria, se aplica un primer filtro mediante una capa de color blanco para las zonas protegidas (fig. 2.1):



Figura 2.1: Filtrado de zonas protegidas, Fuerteventura. Elaboración propia

2.2 Filtrado de zonas con recurso eólico aceptable

Un segundo filtro para zonas con recurso eólico aceptable (>7m/s) es indicado mediante contornos de color rojo (fig. 2.2):



Figura 2.2: Filtrado de zonas con recurso eólico aceptable, Fuerteventura. Elaboración propia

2.3 Filtrado según la proximidad a otras EDAM

Y tras esto ubicamos las principales EDAM (fig. 2.3), con capacidad entre 2000-10000m³/día (puntos azules) o superior a 10000m³/día (puntos rojos):



Figura 2.3: Ubicación de otras EDAM, Fuerteventura. Elaboración propia

2.4 Filtrado según la ordenación del territorio

Finalmente buscamos mediante la capa 'categoría y subcategoría de suelo' un suelo urbanizable y en la costa, alejado de las principales desaladoras y próximo a un recurso eólico aceptable. Así, encontramos 3 potenciales alternativas, entre las cuales se profundizará en la que se considere como más adecuada.

2.5 Estudio de alternativas en Fuerteventura

2.5.1 Alternativa 4 (descartada)

La alternativa 4 (*fig. 2.4*), aunque es la más próxima al recurso eólico, se descarta.

El único núcleo urbano lo suficientemente cercano a abastecer (El Cotillo), cuenta con 1200 habitantes, y sabiendo que según PHF el consumo medio de agua en hogares en Fuerteventura es de 236 litros por habitante y día, ello implicaría dimensionar una planta de muy pequeña capacidad (< 2000 m³/día).

Se requiere una población total de al menos 8500 habitantes para que la capacidad mínima deseada de 2000 m³/día sea posible.

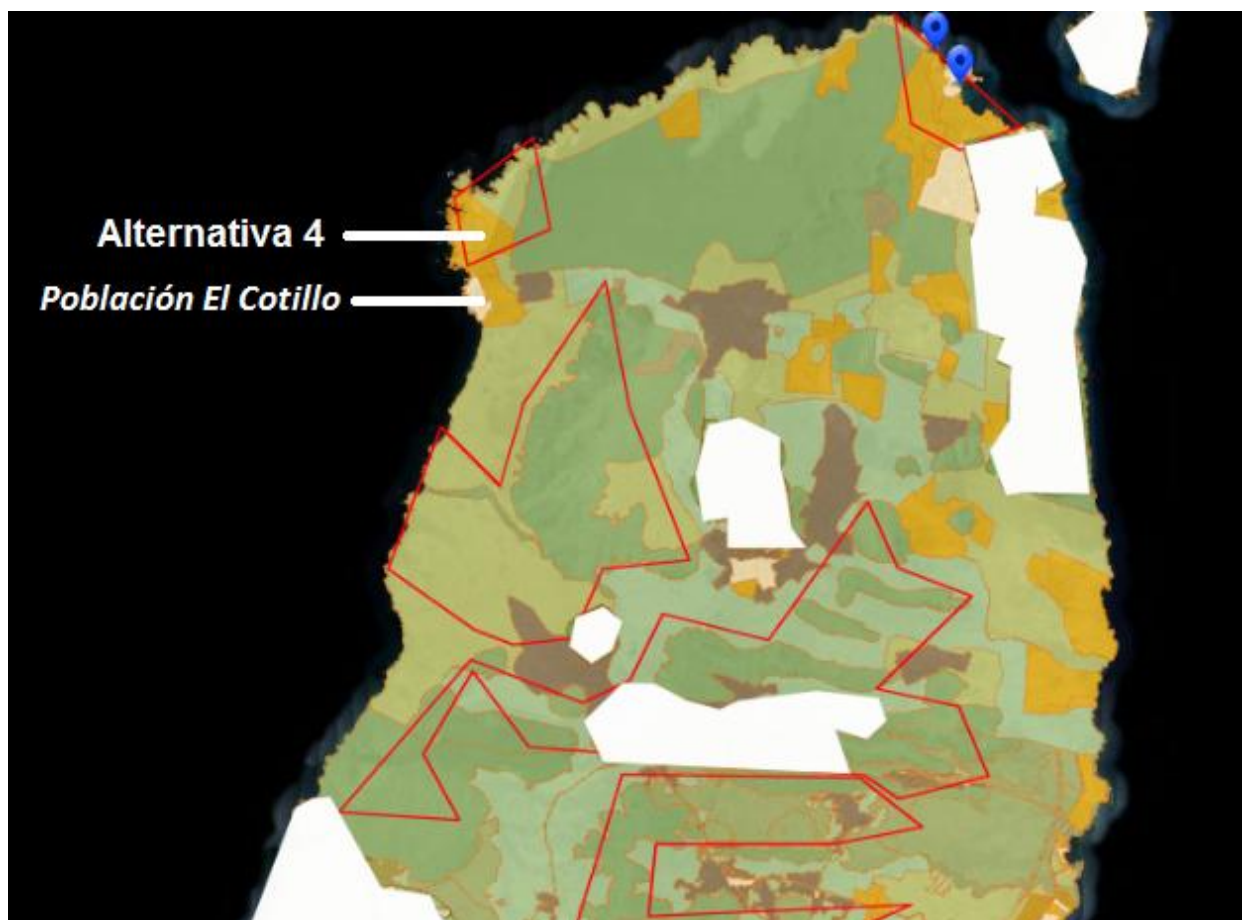


Figura 2.4: Alternativa 4. Elaboración propia

2.5.2 Alternativa 5 (descartada)

La alternativa 5 (fig. 2.5) se descarta al ser, de las tres potenciales ubicaciones encontradas para esta isla, la que más alejada se encuentra de una zona con recurso eólico aceptable (contorno de color rojo).



Figura 2.5: Alternativa 5. Elaboración propia

2.5.3 Alternativa 6 (seleccionada)

En cuanto a la alternativa 6 (fig. 2.5), en el municipio de Antigua, según la clasificación del suelo se trata de S.U.P. - Suelo urbanizable programado. No se entrará en detalle sobre la posibilidad real o no de edificar en este tipo de suelo, ya que esto se encuentra fuera del alcance del presente proyecto. Se asumirá, en principio, que todo suelo urbano con la categoría de urbanizable presenta la posibilidad de edificación, o bien que se podría adquirir un permiso del ayuntamiento para que fuese así.

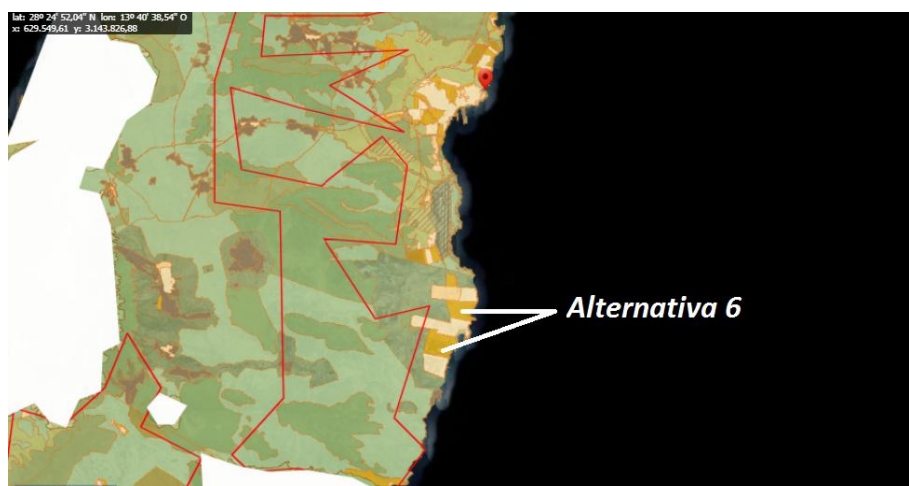


Figura 2.6: Alternativa 6. Elaboración propia

Consultando la información del catastro de las dos parcelas que conforman la región seleccionada (figs. 2.7 y 2.8) se tiene que, si bien el uso principal es agrario, los cultivos presentes son improductivos (o están abandonados) – lo que deja paso libre a la edificación de la EDAM.

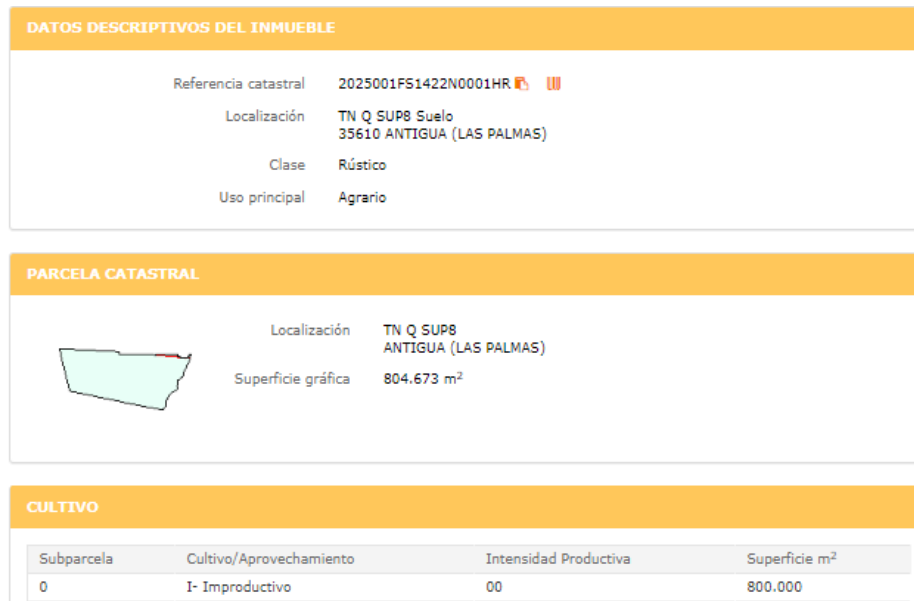


Figura 2.7: Información catastral de la parcela inferior (alternativa 6). Fuente: Catastro



Figura 2.8: Información catastral de la parcela inferior (alternativa 6). Fuente: Catastro

Así, de manera provisional, se considera que los pozos de captación y la EDAM en sí (entendida como la infraestructura donde se encontrará el bastidor de membranas y los tratamientos del agua) se podrían situar en la parcela superior según la *figura 2.9*

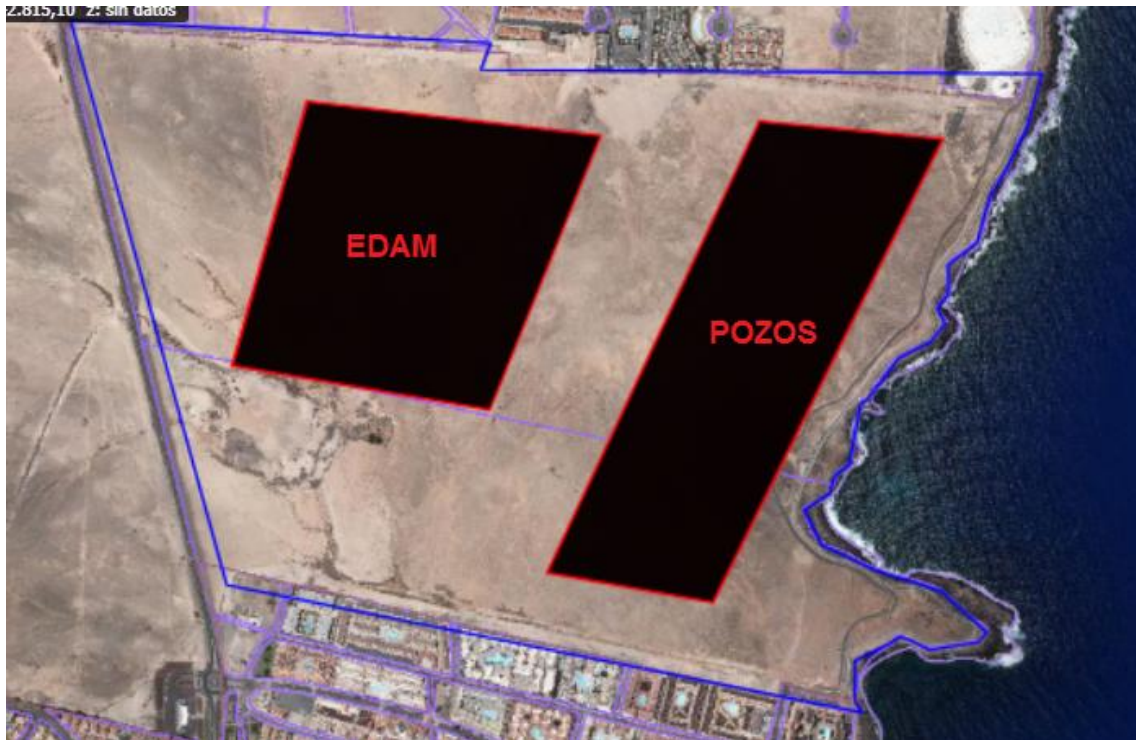


Figura 2.9: Ubicación provisional para la EDAM y los pozos (alternativa 6). Fuente: Grafcan

En cuanto a núcleos poblacionales circundantes a la EDAM lo suficientemente cercanos para ser abastecidos (sin que esto suponga excesivos costes de distribución), se han considerado (*fig. 2.10*):

- Costa de Antigua
- El Castillo
- Caleta de Fustes



Figura 2.10: Localidades a abastecer, alternativa 6. Fuente: Citypopulation.de

Obtenemos los datos de población de las localidades mencionadas a partir de la web citypopulation.de:

- Población Costa de Antigua (fig. 2.11): 2167 (+3,25%/año)
- Población El Castillo (fig. 2.12): 1654 (-0.96%/año)
- Población Caleta de Fuste (fig. 2.13): 2597 (+5,98%/año)

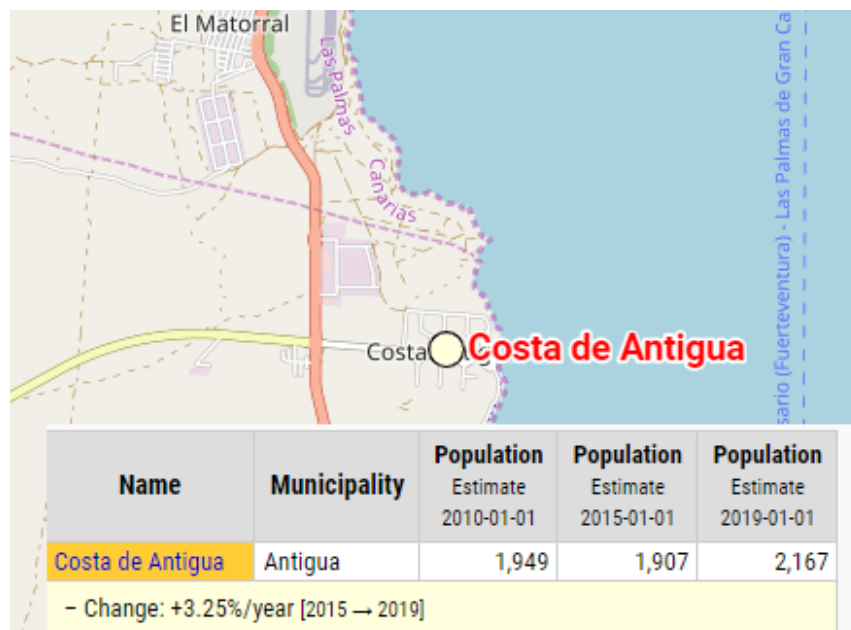


Figura 2.11: Población en Costa de Antigua. Fuente: Citypopulation.de



Figura 2.12: Población en El Castillo. Fuente: Citypopulation.de

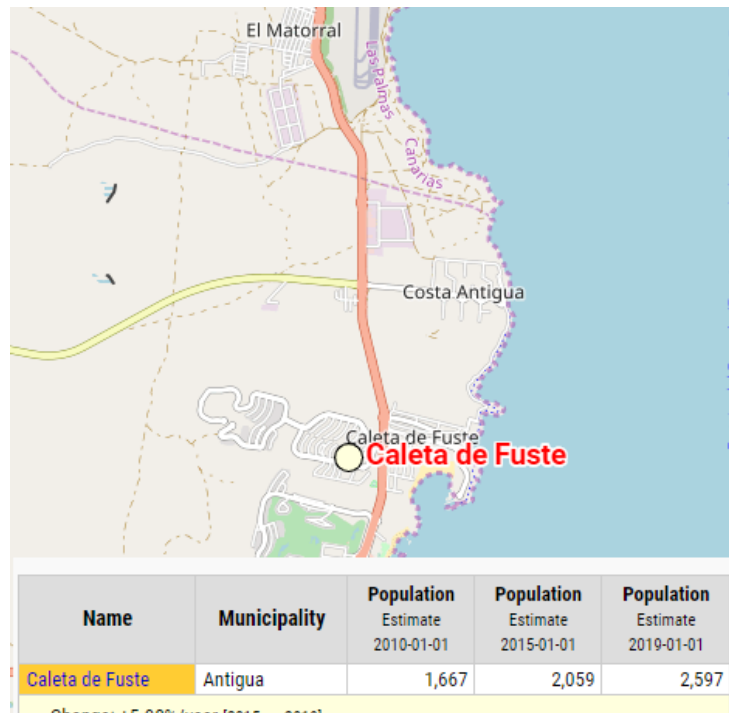


Figura 2.13: Población en Caleta de Fuste. Fuente: Citypopulation.de

A partir del dato de población en 2019 y la variación anual desde 2015 a 2019, podemos estimar la población que existirá en los próximos 6 años, hacia 2025. Con este dato, y suponiendo que tanto la variación anual de población y el consumo de agua en hogares por habitante se mantenga constante, podemos estimar la capacidad mínima necesaria de la planta (tabla 2.1):

	Caleta de Fustes (hab.)	Costa de Antigua (hab.)	El Castillo (hab.)	Total (hab.)	Consumo (l/hab*día)	Capacidad mínima (m ³ /día)
2019	2597	2167	1654	6418	236	1515
2020	2752	2237	1638	6628	236	1564
2021	2917	2310	1655	6882	236	1624
2022	3091	2385	1639	7116	236	1679
2023	3276	2463	1656	7395	236	1745
2024	3472	2543	1640	7655	236	1807
2025	3680	2625	1657	7962	236	1879

Tabla 2.1: Estimación de la capacidad mínima de la planta. Elaboración propia.

Ante la incertidumbre sobre un posible crecimiento de la población y/o del consumo de agua en hogares mayor del esperado, y con el objetivo de asegurar una completa satisfacción de la demanda de agua para consumo humano en la zona, se decide ampliar la capacidad de la planta hasta **2000m³/día**. A partir de este año, si se desea continuar con la EDAM operativa, se deberá realizar un nuevo estudio de la población con datos reales actualizados, para llevar así a cabo una ampliación de su capacidad si fuese necesario.

Por otra parte, en cuanto al aerogenerador, se encuentra un inconveniente de significativa importancia. Se comprueba que no es posible colocarlo en la misma zona en la que se ha ubicado provisionalmente la EDAM en sí y los pozos, ya que los núcleos urbanos a su alrededor estarían a una distancia menor a 100m y según la legislación al respecto (véase anexo VII) podrían ser negativamente afectados por el mismo (por ejemplo, por la contaminación acústica o visual que produce) independientemente de su potencia nominal.

Se baraja la posibilidad, no obstante, de colocar el aerogenerador en otra zona. Si bien no es lo ideal, sí que resulta posible, ya que en la práctica no existirá una conexión directa aerogenerador-EDAM (mediante cableado), sino que la energía del aerogenerador será vertida a la red, actuando ésta como intermediario entre el aerogenerador y la planta. De esta manera, al menos teóricamente, la energía consumida por la EDAM procederá de una fuente primaria renovable.

Nótese que esta misma opción podría haber sido contemplada también para la alternativa 5, que se ha descartado en un primer análisis por este mismo motivo, pero para evitar una excesiva extensión del presente proyecto, se ha decidido limitar el estudio en mayor profundidad a un máximo de una alternativa por isla.

Entonces, y dado que las zonas circundantes con mayor recurso eólico se encuentran protegidas por SRPN-N2 - Suelo Rústico de Protección Natural Nivel II (capas de color verde), se barajan las siguientes opciones:

- Opción A (*fig. 2.14*):
 - Zona con velocidad media anual del viento de $v=7.5\text{m/s}$,
 - Suelo clasificado como de protección agraria y uso para pasto
 - Encontrado a 4km de distancia de la EDAM.

- Opción B (*fig. 2.15*), *aerogenerador representado con un punto verde*):
 - Zona con velocidad media anual del viento $v=8.5\text{m/s}$
 - Suelo clasificado como rural común y uso agrario-improductivo
 - Encontrado a 33km de distancia de la EDAM.

- Opción C (*fig. 2.16*):
 - Zona con velocidad media anual del viento de $v=7\text{m/s}$,
 - Suelo urbanizable SAU – Suelo Apto para Urbanizar, uso agrario.
 - Encontrado a 36km de la EDAM.



Figura 2.14: Ubicación para el aerogenerador (punto verde). Opción A, alternativa 6. Fuente: Grafcan



Figura 2.15: Ubicación para el aerogenerador (punto verde). Opción B, alternativa 6. Fuente: Grafcan

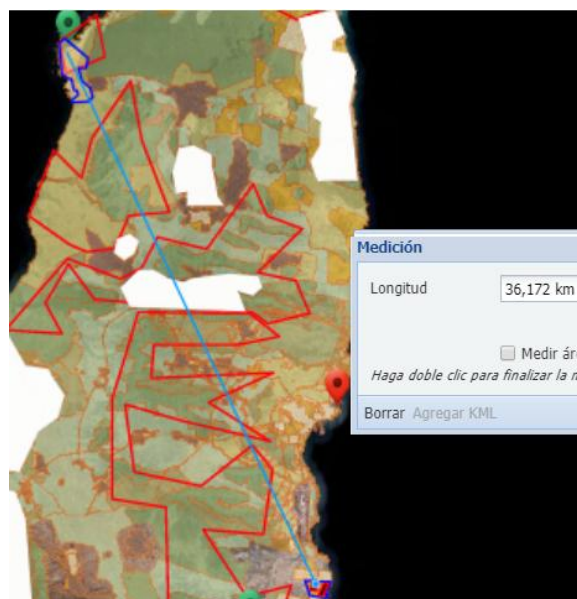


Figura 2.16: Ubicación para el aerogenerador (punto verde). Opción C, alternativa 6. Fuente: Grafcan

3. Estudio de alternativas en Lanzarote

3.1 Filtrado de zonas naturales protegidas

Al igual que se hizo con Gran Canaria y Fuerteventura, se aplica un primer filtro mediante una capa de color blanco para las zonas protegidas (fig. 3.1):

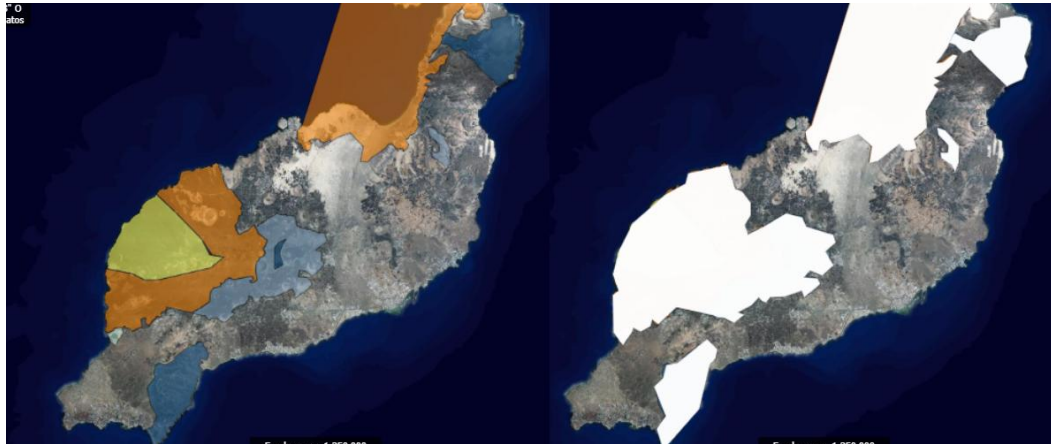


Figura 3.1: Filtrado de zonas naturales protegidas en Lanzarote. Elaboración propia

3.2 Filtrado de zonas con recurso eólico aceptable

Un segundo filtro para zonas con recurso eólico aceptable (>7m/s) es indicado mediante contornos de color rojo (fig. 3.2):

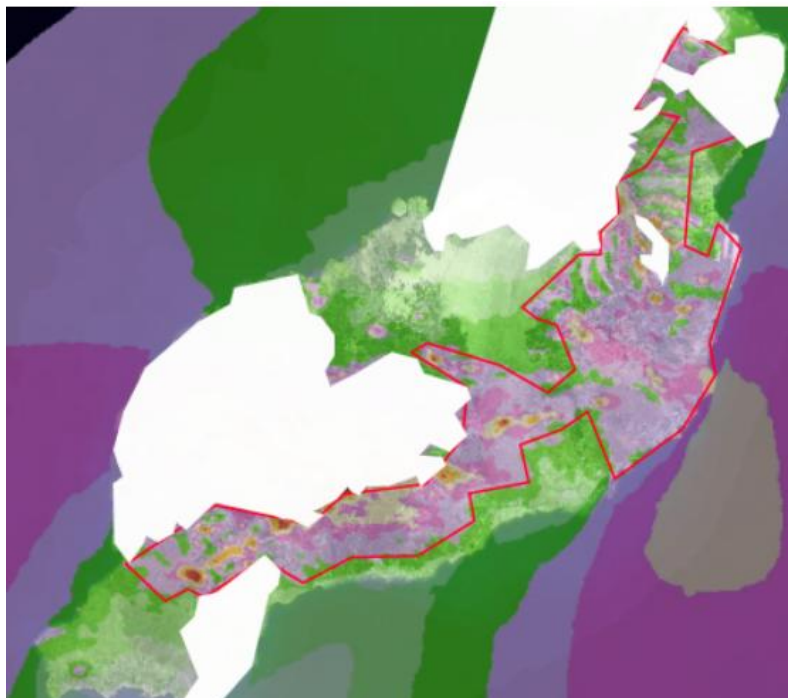


Figura 3.2: Filtrado de zonas con recurso eólico aceptable en Lanzarote. Elaboración propia

3.3 Filtrado según la proximidad a otras EDAM

Y tras esto ubicamos las principales EDAM (*fig. 3.3*), con capacidad entre 2000-10000m³/día (puntos azules) o superior a 10000m³/día (puntos rojos):



Figura 3.3: Ubicación de otras EDAM en Lanzarote. Elaboración propia

3.4 Filtrado según la ordenación del territorio

Finalmente, aplicamos la capa 'categoría y subcategoría de suelo', y buscamos zonas con suelo urbanizable (*fig 3.4*)



Figura 3.4: Filtrado según la ordenación del territorio en Lanzarote. Elaboración propia

3.5 Estudio de alternativas en Lanzarote

3.5.1 Alternativa 7

En Lanzarote, únicamente se encuentra un lugar que cumple simultáneamente con las condiciones de suelo urbanizable, cercanía a núcleos urbanos a los que abastecer, proximidad al recurso eólico y a la costa, y lejanía de principales desaladoras y de zonas naturales protegidas: estaría situado en la localidad de Charco del Palo, Puerto del Rosario (fig. 3.5)

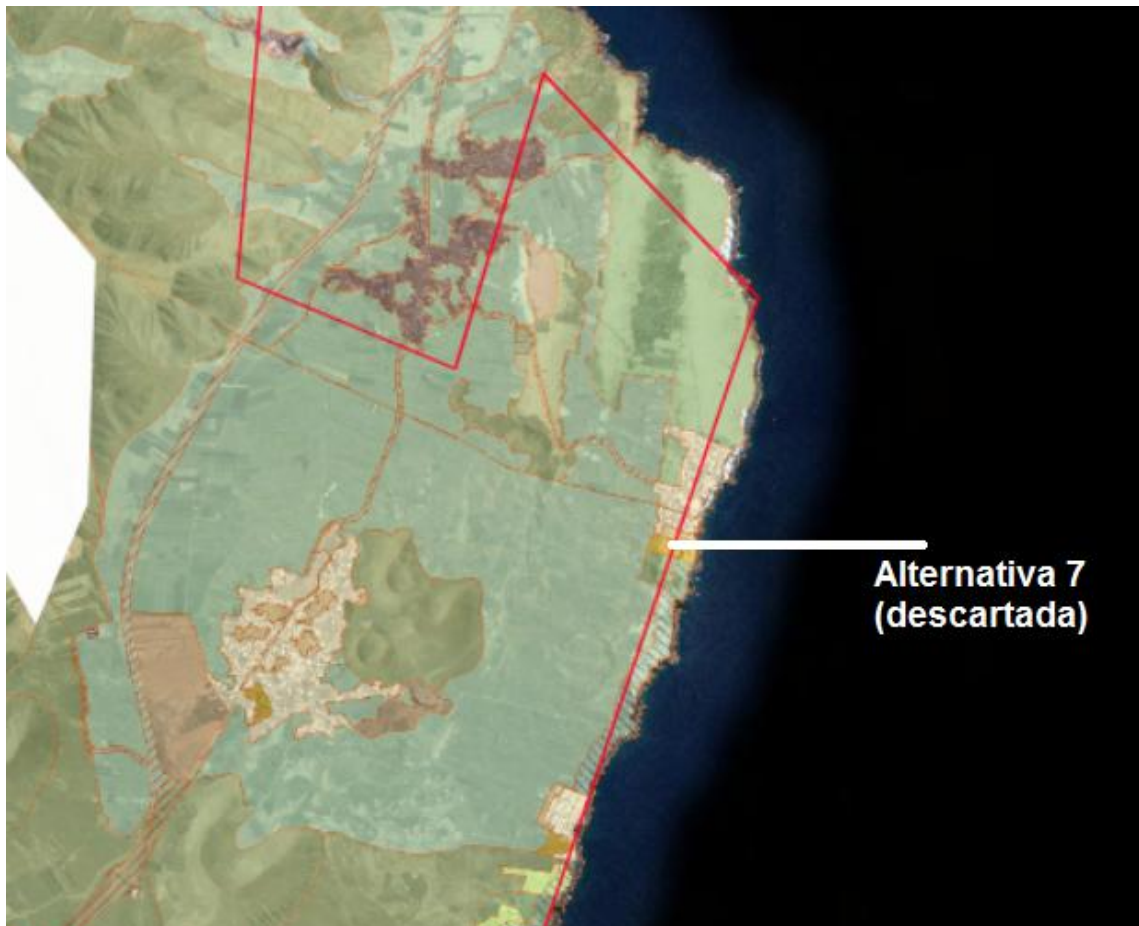


Figura 3.5: Alternativa 7. Fuente: Grafcan

Sin embargo, se descarta porque esta misma ubicación ha sido utilizada para el desarrollo de un proyecto de índole similar al presente (véase repositorio institucional ULL, 'Estudio de una planta de desalación alimentada mediante energía eólica', por Irina A. López Hernández).

4. Resumen de alternativas seleccionadas y solución final

Como se ha comentado anteriormente, teniendo en cuenta que la energía eléctrica generada mediante el parque eólico será vertida a la red (véase anexo VII), actuando ésta como intermediario, la distancia EDAM-aerogenerador no tiene importancia desde un punto de vista práctico. Se ha considerado, no obstante, como uno de los factores a tener en cuenta a la hora de elegir la ubicación final, ya que se asume idóneo (aunque no estrictamente necesario) el hecho de que toda la instalación en su conjunto (EDAM, pozos y parque eólico) se encuentre delimitado en un área lo más pequeña posible. Dicho esto, y a partir únicamente de los criterios de selección mostrados en la tabla 4.1 (donde se ha destacado el punto más fuerte de cada alternativa), se decide ubicar la instalación en Gran Canaria.

Ubicación	Velocidad media anual del viento	Distancia EDAM-aerogenerador	Ordenación del territorio	Capacidad de la planta [m ³ /día]
Gran Canaria (Alternativa 2)	8.5 m/s	<1 km	Suelo urbanizable sectorizado ordenado	3000
Fuerteventura (Alternativa 6, opción A)	7.5 m/s	4 km	Suelo de protección agraria	2000
Fuerteventura Alternativa 6: (opción B)	8.5 m/s	33 km	Suelo rural común	
Fuerteventura Alternativa 6: (opción C)	7 m/s	36 km	Suelo apto para urbanizar	

Tabla 4.1: Potenciales alternativas de ubicación seleccionadas. Elaboración propia.

En realidad, se tendría que elaborar un análisis más detallado sobre la viabilidad de cada ubicación, teniendo en cuenta muchas más variables que tienen importante influencia en la decisión final (como la permeabilidad del terreno en el caso de los pozos, presencia de depósitos reguladores públicos cercanos, posibilidad real de edificación en la zona, costes reales de ejecución, etc.). Dado el limitado alcance de este proyecto y su carácter no ejecutable, se han obviado estas complejidades, buscando principalmente servir como una simplificación de lo que podría ser un estudio inicial de viabilidad, dando así por válida la ubicación escogida.



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

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO III:

**DIMENSIONADO DEL BASTIDOR DE
MEMBRANAS Y TRATAMIENTOS DEL AGUA**

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

**DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA
ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES**

Autor: Alexander Hernández García

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Índice de contenidos

1. Selección del fabricante de membranas	1
1.1 Introducción	1
1.2 Análisis del catálogo de membranas disponible.....	2
2. Predimensionado del bastidor de membranas mediante LewaPlus.....	4
2.1 Introducción	4
2.2 Parámetros conocidos	4
2.2.1 Caudal de permeado y características del agua de captación	4
2.2.2 Valor del pH de alimentación	5
2.2.3 Edad de la membrana	6
2.2.4 Disminución de flujo por año	6
2.2.5 Incremento de paso de sales por año	6
2.2.6 Flujo de permeado y número total de elementos	6
2.2.7 Número de etapas	7
2.2.8 Número de pasos	8
2.2.9 Sistema de recuperación de energía.	9
2.2.10 Resumen de los parámetros fijados.....	9
2.3 Parámetros supuestos	11
2.3.1 Respecto al dispositivo de recuperación de energía (ERD)	11
2.3.2 Respecto a la bomba booster (o de circulación):.....	11
2.3.3 Respecto a las bombas de alimentación (BAP):.....	11
2.4 Parámetros iterados	12
2.4.1 Modelo de membranas (440HF, 440HR, 400HF ó 400HR).	12
2.4.2 Número total de tubos de presión y su configuración (6 ó 7 membranas por tubo de presión).	12
2.4.3 Conversión (40-50%).	13
2.5 Criterio de diseño prioritario para los casos de estudio	14

2.6 Resultados obtenidos	14
2.7 Discusión de resultados	19
3. Recuperación de energía	20
3.1 Introducción	20
3.2 Fabricante Energy Recovery	21
3.2.1 Parámetros fijados	21
3.2.2 Parámetros supuestos	22
3.2.3 Parámetros seleccionados	22
3.2.4 Resultados obtenidos	23
3.3 Fabricante Danfoss.....	27
3.3.1 Parámetros conocidos.....	27
3.3.2 Parámetros supuestos:	27
3.3.3 Parámetros seleccionados:	27
3.3.3 Comparación de resultados entre Energy Recovery y Danfoss	28
4. Dimensionamiento del pretratamiento y postratamiento del agua.....	29
4.1 Pretratamiento físico	29
4.2 Pretratamiento químico.....	29
4.3 Postratamiento	33

Índice de figuras

Figura 2.1: Captura de pantalla con la composición del agua de captación. Fuente: LewaPlus.....	10
Figura 2.2: Captura de pantalla con algunos valores fijados de diseño. Fuente: LewaPlus	10
Figura 2.3: Captura de pantalla con valores supuestos para ERD. Fuente: LewaPlus	11
Figura 2.4: Captura de pantalla con valores supuestos para bombas y ERD. Fuente: LewaPlus.....	12

Figura 2.5: Concentraciones de elementos tras el primer dimensionamiento. Fuente: LewaPlus.....	20
Figura 3.1: Datos necesarios para el dimensionamiento del ERD. Fuente: LewaPlus	21
Figura 3.2: Datos supuestos de rendimiento de las bombas. Fuente: Energy Recovery	22
Figura 3.3: Capacidad de flujo de los diferentes modelos. Fuente: Energy Recovery	22
Figura 3.4: Rendimiento y capacidad de flujo de los diferentes modelos. Fuente: Energy Recovery.....	23
Figura 3.5: Resultados finales del dimensionamiento del ERD. Fuente: Energy Recovery	23
Figura 3.6: Datos introducidos para el dimensionamiento del ERD. Fuente: Energy Recovery	24
Figura 3.7: Consumo de energía corrigiendo los valores supuestos. Fuente: LewaPlus.....	25
Figura 3.8: Composición del permeado tras corregir los valores supuestos. Fuente: LewaPlus.....	26
Figura 3.9: Presiones de alimentación y rechazo tras corregir los valores supuestos. Fuente: LewaPlus	26
Figura 3.10: Resultados del dimensionamiento del dispositivo ERD. Fuente: Danfoss	28
Figura 3.11: Dispositivo ERD de tipo intercambiador de presión rotativo. Fuente: Energy Recovery.....	28
Figura 4.1: Composición del agua de rechazo. Fuente: Lewaplus	30
Figura 4.2: Composición del agua de rechazo tras la corrección del pH. Fuente: Lewaplus	30
Figura 4.3: Composición del agua de permeado tras la corrección del pH. Fuente: Lewaplus	31
Figura 4.4: Dimensionamiento definitivo del bastidor de membranas. Fuente: Lewaplus	32
Figura 4.5: Composición del agua de rechazo. Fuente: Lewaplus	32
Figura 4.6: Composición del permeado. Fuente: LewaPlus.....	33

Figura 4.7: Simulación de postratamiento con mezcla de aguas. Fuente: LewaPlus	35
Figura 4.8: Simulación de postratamiento con descarbonatación. Fuente: LewaPlus	35
Figura 4.9: Simulación de postratamiento con adición de NaOH. Fuente: LewaPlus	36
Figura 4.10: Primera fase del postratamiento estándar. Fuente: LewaPlus	36
Figura 4.11: Segunda fase del postratamiento estándar. Fuente: LewaPlus ..	37
Figura 4.12: Tercera fase del postratamiento estándar. Fuente: LewaPlus	37

Índice de tablas

Tabla 1.1: Rango de valores típicos según tipo de agua. Fuente: Lanxess	1
Tabla 1.2: Valores recomendados para el agua de alimentación y rechazo. Fuente: Lanxess	2
Tabla 1.3: Tipo recomendado de membrana según tipo o salinidad del agua. Fuente: Lanxess	2
Tabla 1.4: Modelos y características de las membranas SWRO. Fuente: Lanxess	3
Tabla 1.5: Equivalencias de Lewabrane con otros fabricantes. Fuente: Lanxess	3
Tabla 2.1: Composición del agua de mar en Santa Cruz de Tenerife. Fuente: Laboratorio Labaqua	5
Tabla 2.2: Número de tubos de presión para cada modelo de membrana. Elaboración propia	7
Tabla 2.3: Número de etapas en función de la conversión. Fuente: Lanxess (guía de diseño).....	8
Tabla 2.4: Composición requerida para el agua de consumo humano. Fuente: RD 140/2003	9
Tabla 2.5: Efecto del aumento de número de elementos por tubo de presión en el diseño. Fuente: Lanxess	13
Tabla 2.6: Relación entre el porcentaje de conversión y el factor de concentración. Fuente: Lanxess	14

Tabla 2.7: Resultados para la membrana Lewabrane RO S440 HF. Elaboración propia	15
Tabla 2.8: Resultados para la membrana Lewabrane RO S400 HF. Elaboración propia	16
Tabla 2.9: Resultados para la membrana Lewabrane RO S440 HR. Elaboración propia.....	17
Tabla 2.10: Resultados para la membrana Lewabrane RO S400 HR. Elaboración propia	18
Tabla 4.1: Dimensionamiento del pretratamiento físico. Elaboración propia ...	29
Tabla 4.2: Niveles de saturación conservativos para $BaSO_4$ y CaF_2 . Fuente: Lewaplast (guía de diseño)	32
Tabla 4.3: Dimensionamiento del pretratamiento químico. Elaboración propia	33
Tabla 4.4: Dimensionamiento del postratamiento. Elaboración propia	38

1. Selección del fabricante de membranas

1.1 Introducción

El sistema de membranas debe ser diseñado de tal manera que cada elemento opere en las condiciones de operación recomendadas, para minimizar así el potencial de ensuciamiento y evitar el daño en las membranas. Las condiciones limitantes o restrictivas son la conversión máxima (del sistema y de cada elemento), el máximo flujo de permeado medio, el mínimo caudal de concentrado, el máximo caudal de alimentación, el máximo caudal de permeado por elemento, entre otros. Cuanto mayor sea la tendencia al agua de ensuciamiento del agua de alimentación, estos límites en los parámetros son más restrictivos.

Se decide escoger al fabricante Lanxess para el suministro de las membranas, el cual facilita un software para el dimensionamiento denominado 'LewaPlus', que será el utilizado para este proyecto. En la tabla 1.1 se muestra el rango recomendado por el fabricante Lanxess para los parámetros anteriormente mencionados, en función del tipo de agua de alimentación y del tipo de pretratamiento, con el objeto de minimizar la posibilidad de ensuciamiento. Se pueden utilizar valores fuera de este rango, pero se advierte que la probabilidad de daño en las membranas aumentará.

Feed Water Type	SDI Value	Average Permeate Flux (range)		Lead Element Permeate Flux		Concentrate Flow Rate per Vessel			Feed Flow Rate per Vessel			Pressure Drop per Vessel		Element Recovery Rate	Beta Value	Flux Decline Ratio	Salt Passage Increase
		[l/m ² ·hr]	[gfd]	[l/m ² ·hr]	[gfd]	[in]	[m ³ /hr]	[gpm]	[in]	[m ³ /hr]	[gpm]	[bar]	[psi]				
Municipal Supply (SDI < 5)	< 5	23 (20–26)	13.5 (12–15)	< 31	< 18	8 4	> 3.6 > 0.7	> 16 > 3.1	8 4	< 15 < 2.8	< 66 < 12	< 2.0	< 29	< 15	< 1.2	13	> 10
Municipal Supply (SDI < 3)	< 3	27 (23–29)	15.9 (14–17)	< 34	< 20	8 4	> 3.0 > 0.6	> 13 > 2.6	8 4	< 16 < 3.2	< 70 < 14	< 3.0	< 43	< 20	< 1.2	10	> 10
Brackish Wells (SDI < 5)	< 5	23 (20–26)	13.5 (12–15)	< 34	< 20	8 4	> 3.6 > 0.7	> 16 > 3.1	8 4	< 15 < 2.8	< 66 < 12	< 2.0	< 29	< 17	< 1.2	13	> 10
Brackish Wells (SDI < 3)	< 3	29 (25–33)	17.0 (14–20)	< 40	< 24	8 4	> 3.0 > 0.6	> 13 > 2.6	8 4	< 16 < 3.2	< 70 < 14	< 3.0	< 43	< 20	< 1.2	10	> 10
Surface Water Media Filtration	< 5	23 (20–26)	13.5 (12–15)	< 31	< 18	8 4	> 3.6 > 0.7	> 16 > 3.1	8 4	< 15 < 2.8	< 66 < 12	< 2.0	< 29	< 15	< 1.2	13	> 10
Surface Water MF/UF Filtration	< 3	27 (23–29)	15.9 (14–17)	< 34	< 20	8 4	> 3.0 > 0.6	> 13 > 2.6	8 4	< 16 < 3.2	< 70 < 14	< 3.0	< 43	< 20	< 1.2	10	> 10
Secondary Waste Media Filtration	< 5	17 (14–20)	10 (8.2–12)	< 24	< 14	8 4	> 4.1 > 0.8	> 18 > 3.5	8 4	< 14 < 2.6	< 61 < 11	< 2.0	< 29	< 12	< 1.2	18	> 15
Secondary Waste MF/UF Filtration	< 3	20 (17–23)	11.8 (10–14)	< 28	< 16	8 4	> 3.6 > 0.7	> 16 > 3.1	8 4	< 14 < 2.8	< 61 < 12	< 2.0	< 29	< 17	< 1.2	15	> 10
Seawater Intake Media Filtration	< 5	14 (11–17)	8.2 (6.5–10)	< 30	< 18	8 4	> 3.6 > 0.7	> 16 > 3.1	8 4	< 14 < 2.8	< 61 < 12	< 2.0	< 29	< 13	< 1.2	8	> 10
Seawater Intake MF/UF Filtration	< 3	17 (14–20)	10 (8.2–12)	< 35	< 21	8 4	> 3.4 > 0.7	> 15 > 3.1	8 4	< 16 < 3.0	< 70 < 13	< 3.0	< 43	< 15	< 1.2	6	> 10
Seawater Beach Wells	< 3	17 (14–20)	10 (8.2–12)	< 35	< 21	8 4	> 3.4 > 0.7	> 15 > 3.1	8 4	< 16 < 3.0	< 70 < 13	< 3.0	< 43	< 15	< 1.2	6	> 10

Tabla 1.1: Rango de valores típicos según tipo de agua. Fuente: Lanxess

Para el caso específico del presente proyecto, interesa especialmente la fila 'Seawater Beach Wells' (pozos de agua de mar en la costa). Al utilizar el software de dimensionamiento para el sistema OI del fabricante (LewaPlus), estas comprobaciones se hacen automáticamente por el programa, mostrando avisos

cuando un valor queda fuera del rango recomendado. Se muestran en la tabla 1.2 otros parámetros recomendados por el fabricante en cuanto al agua de captación y al concentrado o rechazo, que se tendrán en consideración a posteriori en el diseño del pretratamiento y postratamiento.

Recommended quality of feed water (and reject stream):

PARAMETER	UNIT	VALUE
Feed stream:		
Temperature	°C (°F)	< 45 (113)
pH (continuous operation)	-	2 – 11
Color	APHA	< 3
Turbidity	NTU	recommended < 0,2 max 1,0
SDI (Silt Density Index)	-	recommended < 3 max 5
TOC (Total Organic Carbon)	mg/L	< 3 *
COD (Chemical Oxygen Demand)	mgO ₂ /L mgKMnO ₄ /L	< 5 < 20
Metals (Fe, Mn, Al, others)	mg/L	< 0,05 each
Oil, grease	mg/L	< 0,01
Free chlorine	mg/L	recommended < 0,02 max 0,1
Reject (concentrate) stream:		
LSI (Langelier Saturation Index)	-	< 0 or < 2,5 **
SDSI (Stiff&Davis Saturation Index)	-	< 0 or < 2,5 **
Silica	mg/L	< 140 – 240 ***

* as natural organic matter

** may be up to 2,5 if antiscalant used, depending on its type (check with antiscalant supplier)

*** depending on temperature, pH and antiscalant type used (check with antiscalant supplier)

Tabla 1.2: Valores recomendados para el agua de alimentación y rechazo. Fuente: Lanxess

1.2 Análisis del catálogo de membranas disponible

De acuerdo con la fuente del agua de alimentación, el pretratamiento y la salinidad del agua de alimentación, se selecciona un tipo de membrana. La relación entre la salinidad del agua de alimentación y la selección general de un elemento OI se muestra en la tabla 1.3 para el fabricante Lanxess:

Salinidad	Tipo de agua	Tipo de membranas
Baja (<500mg/L)	Salobre	BWRO (baja energía)
Media (<5000mg/L)	Salobre	BWRO (estándar)
Alta (> 5000mg/L)	Salobre o de mar	SWRO

Tabla 1.3: Tipo recomendado de membrana según tipo o salinidad del agua. Fuente: Lanxess

En el caso particular del presente proyecto, por tanto, nos interesará la serie de membranas para desalación de agua de mar SWRO (seawater reverse osmosis).

El fabricante seleccionado cuenta con un total de seis modelos de membranas (denominadas 'Lewabrane' por su nombre comercial) de ósmosis inversa (Reverse Osmosis, RO) para agua de mar (Sea water, S).

Los modelos se diferencian entre sí según su área: 85 ft², 400 ft² y 440 ft² (085, 400 y 440), y su especialidad: alto flujo (High Flow, HF) o alto rechazo (High Rejection, HR).

Se muestra a continuación (*tabla 1.4*) las principales características:

Nombre comercial	Caudal de permeado medio [mínimo]	Rechazo de sales medio [mínimo]	Rechazo de boro típico
Lewabrane RO S085 HR	5.2 m ³ /d [4.2 m ³ /d]	99.8 % [99.6 %]	93.0 %
Lewabrane RO S085 HF	7.2 m ³ /d [5.8 m ³ /d]	99.8 % [99.6 %]	92.0 %
Lewabrane RO S400 HR	24.6 m ³ /d [19.7 m ³ /d]	99.8 % [99.5 %]	93.0 %
Lewabrane RO S400 HF	34.1 m ³ /d [27.3 m ³ /d]	99.8 % [99.6 %]	92.0 %
Lewabrane RO S440 HR 4040	27.3 m ³ /d [21.8 m ³ /d]	99.8 % [99.6 %]	93.0 %
Lewabrane RO S440 HF 4040	37.5 m ³ /d [30.0 m ³ /d]	99.8 % [99.6 %]	92.0 %

Tabla 1.4: Modelos y características de las membranas SWRO. Fuente: Lanxess

Todas las membranas están fabricadas de poliamida, con diseño en espiral.

En general, las membranas se recomiendan para aplicaciones donde un rechazo salino estable, durante el tiempo de vida útil esperado, sea un punto de consideración importante.

Lanxess también facilita las equivalencias de sus membranas respecto a otros fabricantes (*tabla 1.5*):

Lewabrane countertypes		Lewabrane					
LEWABRANE	Type	Hydranautics	Dow	Toray	Koch	Vontron	GE
Lewabrane S400 HR	SW High Rejection	SWC4-LD	SW30XHR-400i	TM820C-400		SW22-8040	AD-400
Lewabrane S400 HF	SW High Flow	SWC5-LD	SW30XLE-400i	TM820V-400			AE-400
Lewabrane S440 HR	SW High Rejection	SWC4 MAX	SW30XHR-440i				AD-440
Lewabrane S440 HF	SW High Flow	SWC5-MAX	SW30XLE-440i	TM820V-440			AE-440
Lewabrane S085 HR 4040	SW High Rejection			TM810C	TFC 4040-SW	SW21-4040	AD-90
Lewabrane S085 HF 4040	SW High Flow	SWC5-LD-4040	SW30-4040	TM810V			AE-90

Tabla 1.5: Equivalencias de Lewabrane con otros fabricantes. Fuente: Lanxess

2. Predimensionado del bastidor de membranas mediante LewaPlus

2.1 Introducción

El dimensionamiento del bastidor de membranas incluye determinar el número de elementos (membranas) por tubo de presión, número de tubos de presión por etapa, y número de etapas por paso, así como el número de pasos. Esto requiere definir otros parámetros - algunos de los cuales son conocidos y es posible fijar, otros deben suponerse en un primer dimensionamiento antes de obtener los valores definitivos, y el resto deben iterarse hasta encontrar la configuración óptima.

En el caso de los parámetros iterados, deben realizarse múltiples cálculos para distintos casos de estudio mediante el software de dimensionamiento, y comparar los resultados. Debe realizarse una comparación considerando distintas condiciones de operación, número de elementos o tubos de presión necesarios, la satisfacción de la demanda del cliente (calidad del agua producto) y el correspondiente consumo de energía necesario.

Para facilitar la comprensión del proceso seguido, se ha dividido la redacción de este apartado en tres partes:

- Parámetros conocidos. En primer lugar se fijan los parámetros conocidos a partir de los datos obtenidos anteriormente.
- Parámetros supuestos. A continuación se suponen los parámetros que no es posible conocer de antemano en un primer dimensionamiento, pero que son necesarios para obtener un resultado final.
- Parámetros iterados. Finalmente, para los parámetros iterados se realizan múltiples cálculos con distintos casos de estudio y se comparan los resultados

2.2 Parámetros conocidos

2.2.1 Caudal de permeado y características del agua de captación

El caudal de permeado requerido y las características (composición, pH, temperatura...) del agua de captación ha sido determinado previamente en el apartado 'requisitos de diseño' de la memoria. Así, se recuerda que:

- El caudal de permeado debe ser de 3000 m³/día
- Se desalará agua de mar a partir de pozos de captación ubicados en la costa (*seawater beach wells*).
- La temperatura media anual del agua de captación es 21°C

- La composición del agua de captación (tabla 2.1), ante la falta de datos más precisos, se tomará como equivalente a la existente en Santa Cruz de Tenerife, analizada por el laboratorio Labaqua.

Ión	Concentración [mg/L]
Sodio	11870 mg/L
Calcio	431 mg/L
Magnesio	1470 mg/L
Potasio	451 mg/L
Estroncio	10 mg/L
Bario	0.017 mg/L
Hierro	0.025 mg/L
Manganeso	0.003 mg/L
Cloro	21280 mg/L
Sulfatos	3148 mg/L
Bicarbonatos	141.5 mg/L
Nitratos	0.7mg/L
Flúor	0.862 mg/L
Sílice	1.1 mg/L
Boro	5.23 mg/L
Bromo	0.5mg/L
Cobalto	0,002 mg/L
Cromo	0,002 mg/L
pH	8

Tabla 2.1: Composición del agua de mar en Santa Cruz de Tenerife. Fuente: Laboratorio Labaqua

2.2.2 Valor del pH de alimentación.

Normalmente, las membranas requieren un pH aproximadamente neutro para minimizar la probabilidad de ser dañadas, por lo que se decide fijarlo a un valor de 7. Dado que el pH del agua de captación, según el análisis del agua (véase tabla 2.1) es 8, se requerirá un pretratamiento químico para disminuirlo, definido en el apartado correspondiente.

2.2.3 Edad de la membrana.

Se suele considerar típicamente como 3 años. Este parámetro, junto con el incremento de sales por año, afectará al factor de ensuciamiento (fouling factor) que tiene en cuenta el software a la hora de realizar automáticamente los cálculos de diseño pertinentes.

2.2.4 Disminución de flujo por año.

Se decide seguir las recomendaciones del fabricante de membranas (véase *tabla 1.1*), y por tanto se fija en 6%.

2.2.5 Incremento de paso de sales por año.

Según la bibliografía, los valores típicos de incremento de sales por año para membranas de poliamida se sitúan entre 5 y 15%. El fabricante de membranas, por su parte, recomienda un valor superior a 10% (véase *tabla 1.1*). Por tanto, se decide fijar en 11%, que cumple estrictamente con la recomendación del fabricante y se sitúa lo más próximo posible al valor medio del rango típico (10%).

2.2.6 Flujo de permeado y número total de elementos

La relación entre el número total de elementos, el caudal del agua producto y el flujo de permeado medio queda expresada mediante la siguiente ecuación:

$$N_E = \frac{Q_P}{J_{VM} * M_A} \quad (2.1)$$

Donde:

N_E , número total de elementos (o membranas)

Q_P , caudal de permeado o agua producto

J_{VM} , flujo de permeado medio

M_A , área de membrana del elemento (según se muestra en su correspondiente hoja de especificaciones)

Cabe indicar que el número de elementos totales calculado puede ser modificado ligeramente en función de la decisión de la configuración del bastidor de membranas, esto es, el número de tubos de presión y el número de membranas o elementos por tubo de presión.

Según las recomendaciones del fabricante (véase *tabla 1.1*), el flujo de permeado para la desalación de agua de mar mediante pozos situados en la costa debe situarse entre $J_V (mín)=14$ l/h y $J_V (máx)=20$ l/h. Este rango determinará el mínimo $N_E(mín)$ y máximo número de membranas $N_E(máx)$ para cada tipo, a partir de las siguientes ecuaciones.

$$N_E(\text{mín}) = \frac{Q_p \left[\frac{\text{L}}{\text{h}} \right]}{M_A [\text{m}^2] * J_V (\text{máx}) [\text{lmh}]} \quad (2.2)$$

$$N_E(\text{máx}) = \frac{Q_p \left[\frac{\text{L}}{\text{h}} \right]}{M_A [\text{m}^2] * J_V (\text{mín}) [\text{lmh}]} \quad (2.3)$$

Esto, a su vez, nos permite conocer el número máximo y mínimo de tubos de presión para cada una de las configuraciones típicamente empleadas en la desalación de agua de mar, sabiendo que los elementos (o membranas) son agrupados en serie en tubos de presión. Normalmente se agrupan 6-7 membranas en cada tubo de presión en el caso de la desalación de agua de mar.

Aplicando las ecuaciones 1.2 y 1.3, para un caudal de permeado $Q_p = 3000 \text{ m}^3/\text{día} = 125 \text{ m}^3/\text{h} = 125000 \text{ l/h}$, los resultados se resumen en la tabla 2.2:

Membrana	Área [m ²]	Flujo medio [lmh]	Nº membranas	Nº Tubos de presión	
				6 membranas/tubo	7 membranas/tubo
440HF Y 440HR	40.9	(14-20)	(153-218)	[26-36]	[22-31]
400 HF Y 400HR	37.2	(14-20)	(168-240)	[29-39]	[25-34]
085HF y 085HR	7.9	(14-20)	(791-1131)	[132-188]	[114-161]

Tabla 2.2: Número de tubos de presión para cada modelo de membrana. Elaboración propia

En la toma de una decisión final respecto al número idóneo de elementos por tubo de presión, debe considerarse el tamaño de la planta, es decir, el espacio requerido para instalar los elementos.

En base a esto último podemos descartar los modelos 085HF y 085HR en los siguientes análisis, ya que se requiere un número de tubos de presión considerablemente superior en comparación con el resto, lo que se traduce en mayores requerimientos de espacio (y tareas de mantenimiento).

2.2.7 Número de etapas

El número de etapas definirá cuántos tubos de presión se encuentran en serie, ya que cada etapa consiste de un cierto número de tubos de presión en paralelo. En los sistemas de múltiples etapas, el concentrado de una etapa se convierte en la alimentación de la siguiente, lo que permite obtener una mayor conversión (véase anexo I). El número de etapas es función de la conversión, el número de elementos por tubo de presión, y la calidad del agua de alimentación. Así, para la desalación de agua de mar (SWRO, seawater reverse osmosis) y de agua salobre (BWRO, brackish reverse osmosis), el fabricante facilita la *tabla 2.3*.

Se toma la decisión de tomar una única etapa porque se pretende dimensionar un sistema de desalación de agua de mar con una conversión típica (en torno a 40-50%). Por otro lado, implantar una doble etapa reduce la presión del concentrado, y con ello su potencial de recuperación de energía (lo cual también se pretende implantar en esta instalación).

1 etapa: Conversión < 50%
Conversión típica SWRO
2 etapas: Conversión < 75-80%
Conversión típica BWRO (<80%)
Alta conversión SWRO (<60%)
Alta conversión, 2 pasos (<90%)
3 etapas: Conversión <85-90%
Alta conversión, BWRO (<90%)
Alta conversión, 2 pasos (<95%)

Tabla 2.3: Número de etapas en función de la conversión. Fuente: Lanxess (guía de diseño)

2.2.8 Número de pasos

En un sistema de dos pasos, el permeado del primer paso se convierte en la alimentación del segundo. El objetivo es aumentar aún más su calidad.

Según la guía de diseño del fabricante Lanxess, si la calidad del agua de permeado requerida es tan alta que no puede ser alcanzada mediante un sistema OI de un solo paso, entonces se debe considerar utilizar 2 pasos. Como alternativa, también se puede utilizar un sistema de intercambio de iones mediante resinas. La calidad mínima del agua producto (cuyo fin es servir de agua potable para consumo humano), como se ha indicado en el apartado de requisitos de diseño, viene fijada por 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 (véase *tabla 2.4*).

Dado que (como se comprobará a posteriori) no existen inconvenientes para obtener esta calidad para el agua de distribución mediante un solo paso y el correspondiente postratamiento del agua de permeado, se decide fijar a 1 este parámetro.

Valores límite	
Sodio	< 200 mg/L
Cloruro	< 250 mg/L
Sulfatos	< 250 mg/L
Nitratos	< 50mg/L
Fluoruros	< 1.5mg/L
Boro	< 1 mg/L
Amonio	< 0.5 mg/L
pH	€ [6.5,9.5]

Tabla 2.4: Composición requerida para el agua de consumo humano. Fuente: RD 140/2003

2.2.9 Sistema de recuperación de energía.

Se decide optar por la utilización de un ERD (Energy Recovery Device, dispositivo de recuperación de energía) isobárico (intercambiador de presión). Esta decisión viene motivada tras el estudio de diferentes sistemas de recuperación de energía (véase anexo I), donde se llega a la conclusión de que la utilización de un intercambiador de presión conlleva el mejor rendimiento y con ello, el menor consumo de energía específico frente a otros sistemas como la turbina Francis, la turbina Pelton, o el turbocharger.

No obstante, se comparará la oferta de distintos fabricantes (Energy Recovery y Danfoss) para determinar el modelo más adecuado, tomando como principal criterio de selección aquel que permita un menor consumo de energía específica global

2.2.10 Resumen de los parámetros fijados.

Se muestra a continuación (*figs. 2.1 y 2.2*) capturas de pantalla del software de dimensionamiento LewaPlus una vez que los parámetros indicados anteriormente han sido fijados. Se advierte que algunos de los parámetros mostrados (como la conversión o recuperación hidráulica) se determinarán posteriormente.

● **Análisis completo** ○ Análisis corto basado en TDS: 38889,3779 [mg/l] ○ Análisis corto basado en con

Cationes				Aniones			
	Original	Unidad	[meq/l]		Original	Unidad	[meq/l]
Na:	11870	mg/l	516,31144	Cl:	21280	mg/l	600,28209
Ca:	431	mg/l	21,50699	SO4:	3148	mg/l	65,54237
Mg:	1470	mg/l	120,88816	CO3:	3,6953	mg/l	0,12318
K:	451	mg/l	11,53453	HCO3:	141,5	mg/l	2,31891
Sr:	10	mg/l	0,22826	NO3:	0,7	mg/l	0,01129
Ba:	0,017	mg/l	0,00025	F:	0,862	mg/l	0,04537
NH4:	0	mg/l		SiO2:	1,1	mg/l	0,01831
Fe(II):	0,025	mg/l	0,00090	B:	5,23	mg/l	0,48381
Mn:	0,003	mg/l	0,00011	PO4:	0	mg/l	
Al:	0	mg/l		Br:	0,5	mg/l	0,00626
				As(III):	0	mg/l	
H+:	0	meq/l	0,00001	As(V):	0	mg/l	
				OH-:	0,0045	meq/l	0,00449

Figura 2.1: Captura de pantalla con la composición del agua de captación. Fuente: LewaPlus

Parámetros del sistema

Tipo de agua: Agua de mar, pozo de playa

Temperatura: 21 [°C]

Recuperación: 40 [%]

Recuperación hidráulica: 40,00 [%]

Caudal del agua de aporte: 312,5 [m³/h]

Caudal del agua cruda de alimentación: 312,50 [m³/h]

Caudal de aporte, etapa 1: 312,50 [m³/h]

Caudal del permeado, paso 1: 125 [m³/h]

Caudal del permeado en el sistema: 125,00 [m³/h]

Ajuste del pH

pH: 7

Producto químico: HCl

Dosificación (100%): 12,43 [mg/l]

Parámetros de la membrana

Edad de membrana promedio: 3 [a]

Tasa disminución, caudal: 6 [%]

Aumento de paso de sal: 11 [%/a]

Flujo medio del permeado: 2,71 [l/m²/h]

Configuración del sistema

1 etapas

Figura 2.2: Captura de pantalla con algunos valores fijados de diseño. Fuente: LewaPlus

2.3 Parámetros supuestos

El software asume los siguientes valores por defecto:

2.3.1 Respecto al dispositivo de recuperación de energía (ERD)

- Dimensionado de la unidad por defecto: 37.5 m³/h
- Fuga: 2%
- Overflow: 0%
- Presión del agua de aporte al ERD: 108 kPa

2.3.2 Respecto a la bomba booster (o de circulación):

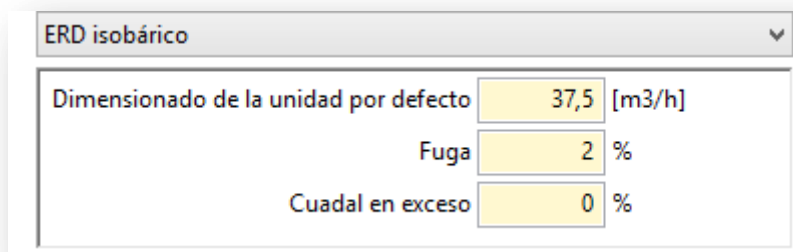
- Eficiencia del booster: 84%
- Eficiencia del motor: 94%
- Eficiencia VFD: 98% (no considerado)

2.3.3 Respecto a las bombas de alimentación (BAP):

- Presión de succión: 50 kPa
- Presión de la bomba adicional: 50 kPa
- Eficiencia de la bomba de alta presión: 84%
- Eficiencia del motor de la bomba de alta presión: 94%
- Eficiencia VFD: 98% (no considerado)

Estos valores se modificarán tras obtener los valores reales al concluir el dimensionamiento del dispositivo de recuperación de energía y de las bombas, lo que dará como resultado variaciones, por ejemplo, en el consumo de energía específico. Por este motivo, sólo los resultados finales deberán ser tomados en cuenta – mostrándose este primer dimensionamiento únicamente con el fin de detallar el proceso de resolución.

En las *figuras 2.3 y 2.4* se muestra una captura de pantalla con los valores supuestos indicados anteriormente.



ERD isobárico	
Dimensionado de la unidad por defecto	37,5 [m3/h]
Fuga	2 %
Cudal en exceso	0 %

Figura 2.3: Captura de pantalla con valores supuestos para ERD. Fuente: LewaPlus

Restaurar valores predeterminados		Bomba de circulación		ERD isobárico	
Bomba de alta presión		Caudal del booster	185,66 [m3/h]	Caudal del concentrado	187,50 [m3/h]
Caudal de la bomba	126,84 [m3/h]	Presión booster	72,96 [kPa]	Número de unidades ERD	5
Presión bomba succión	50 [kPa]	Eficiencia del booster	84 [%]	Caudal por unidad	37,50 [m3/h]
Presión agua aporte	4617,79 [kPa]	Eficiencia del motor	94 [%]	Lubricación por unidad	0,37 [m3/h]
Presión de la bomba adicional	50 [kPa]	<input type="checkbox"/> Eficiencia VFD	98 [%]	Presión de la agua de aporte ERD	108 [kPa]
Presión bomba descarga	4667,79 [kPa]	Potencia del motor	4,77 [kW]	Presión de entrada	4603,68 [kPa]
Eficiencia de bomba	84 [%]			Presión de descarga (alta)	4544,83 [kPa]
Eficiencia del motor	94 [%]			Presión de descarga (baja)	70,65 [kPa]
<input type="checkbox"/> Eficiencia VFD	98 [%]			Fuga	2,00 [%]
Potencia del motor	206,06 [kW]			Cuadral en exceso	0,00 [%]
				Eficiencia ERD	97,03 [%]

Figura 2.4: Captura de pantalla con valores supuestos para bombas y ERD. Fuente: LewaPlus

2.4 Parámetros iterados

2.4.1 Modelo de membranas (440HF, 440HR, 400HF ó 400HR).

Cada uno de los cuatro modelos supondrá un caso de estudio, y en la comparación de resultados se optará por aquél que, permitiendo obtener la deseada calidad del agua producto, suponga el menor consumo de energía específico. No se utilizará una configuración híbrida (distintos modelos de membranas en un mismo tubo de presión), ya que esto supone mayores costes de mantenimiento al tener que disponer de varios modelos diferentes en el inventario.

2.4.2 Número total de tubos de presión y su configuración (6 ó 7 membranas por tubo de presión).

Al aumentar el número de elementos por tubo de presión, casi todos los parámetros de diseño cambiarán también. Algunos de estos parámetros son el flujo de permeado por elemento, el caudal de concentrado por tubo de presión, el caudal de alimentación por tubo de presión, conversión individual por elemento, caída de presión por tubo de presión, etc. Algunos factores mejorarán y otros empeorarán. Se muestra en la tabla 2.5 la correlación entre el número en el aumento de elementos por tubo de presión y el consecuente cambio en los principales parámetros de diseño del sistema.

Por ello, la decisión final en relación al número de tubos de presión y al número de elementos por tubo se tomará únicamente en función del consumo de energía específico que suponga.

Parámetro de diseño	Aumento del N° de elementos por tubo de presión	
	Efecto	Valoración
Flujo de permeado medio	Constante	Sin cambio
Flujo de permeado (primer elemento)	Aumenta	No deseable
Caudal de concentrado por tubo de presión	Aumenta	Deseable
Caudal de alimentación por tubo de presión	Aumenta	No deseable
Caída de presión por tubo de presión	Aumenta	No deseable
Caída de presión por elemento	Aumenta	No deseable
Conversión por elemento	Se reduce	Deseable
Conversión del sistema	Constante	Sin cambio
Número de tubos de presión	Se reduce	Deseable

Tabla 2.5: Efecto del aumento de número de elementos por tubo de presión en el diseño. Fuente: Lanxess

Dado que dicho consumo de energía disminuye con el aumento del número de tubos de presión, se escogerá en todos los casos de estudio el mayor número de tubos de presión que mantenga la calidad del agua producto deseado.

2.4.3 Conversión (40-50%).

Para desalación de agua de mar, se utilizan conversiones entre 40 y 50%.

Aunque en principio es deseable que el porcentaje de conversión sea tanto alto como sea posible; una alta conversión también puede causar algunos problemas, como:

- Disminución del caudal de concentrado
- Pérdida en la calidad del permeado debido al aumento de la concentración media de alimentación
- Posibilidad de formación de incrustaciones debido al aumento del factor de concentración
- Incremento de la presión osmótica (que implica mayor consumo de energía específico) debido al aumento del factor de concentración

A continuación (*tabla 2.6*) se muestra la relación entre el porcentaje de conversión y el factor de concentración según el fabricante Lanxess. Por otro lado, una menor conversión implica un mayor caudal de captación, alimentación y concentrado, y con ello mayor requerimiento energético asociado al bombeo, que se traduce de nuevo en un mayor consumo de energía específica global.

Porcentaje de conversión	Factor de concentración
50%	2
75%	4
80%	5
90%	10

Tabla 2.6: Relación entre el porcentaje de conversión y el factor de concentración. Fuente: Lanxess

Como no es posible saber de antemano qué resulta más deseable de manera global, se iterará por tanto la conversión en los casos de estudio y se compararán los resultados.

2.5 Criterio de diseño prioritario para los casos de estudio

Se priorizará como parámetro de diseño el consumo de energía específico de la instalación, buscando que éste sea el menor posible. En base a esto, se parte de la siguiente información:

- El consumo de energía específico es inversamente proporcional al número total de elementos (membranas) -y por tanto de tubos de presión-, mientras que las concentraciones de elementos en el agua producto aumentan con el número de elementos sin seguir necesariamente una relación lineal. Es decir: a mayor número de tubos de presión (con el resto de parámetros constante), el consumo de energía específica disminuye, pero las concentraciones de los diversos elementos aumentan
- Al realizar las distintas iteraciones en los casos de estudio, el elemento que hace que la calidad del agua producto supere las restricciones impuestas es, en todos los casos, el boro. El resto de parámetros (excepto el pH, para el cual se realizará postratamiento) se encuentra considerablemente por debajo de los límites. Por tanto, para facilitar el análisis, en los resultados obtenidos se anotará únicamente la concentración de boro.

2.6 Resultados obtenidos

A continuación (*tablas 2.7 a 2.10*) se muestran los resultados para cada posible combinación de modelo de membrana y porcentaje de conversión, optando por el mayor número de tubos de presión posible que permita que la calidad de agua producto sea la deseada y manteniendo el resto de parámetros dentro de los límites recomendados por el fabricante.

Lewabrane RO S440 HF				
Conversión	Configuración	Tubos de presión	Boro [mg/L]	Potencia específica [kW/m³]
40%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
41%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
42%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
43%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
44%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
45%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
46%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
47%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
48%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
49%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
50%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		

Tabla 2.7: Resultados para la membrana Lewabrane RO S440 HF. Elaboración propia

Lewabrane RO S400 HF				
Conversión	Configuración	Tubos de presión	Boro [mg/L]	Potencia específica [kW/m³]
40%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
41%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
42%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
43%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
44%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
45%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
46%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
47%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
48%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
49%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
50%	6 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		
	7 membranas/tubo	No válido: B>1mg/L para el mínimo de tubos de presión		

Tabla 2.8: Resultados para la membrana Lewabrane RO S400 HF. Elaboración propia

Lewabrane RO S440 HR				
Conversión	Configuración	Tubos de presión	Boro [mg/L]	Potencia específica [kW/m³]
40%	6 membranas/tubo	32	0,98653	2.36
	7 membranas/tubo	28	0,99814	2.35
41%	6 membranas/tubo	32	0,99813	2.37
	7 membranas/tubo	27	0,97363	2.40
42%	6 membranas/tubo	31	0,97866	2.41
	7 membranas/tubo	27	0,98509	2,42
43%	6 membranas/tubo	31	0,99077	2.43
	7 membranas/tubo	27	0,99701	2.43
44%	6 membranas/tubo	30	0,97097	2.47
	7 membranas/tubo	26	0,97198	2,48
45%	6 membranas/tubo	30	0,98363	2,49
	7 membranas/tubo	26	0,98438	2,50
46%	6 membranas/tubo	30	0,99683	2,52
	7 membranas/tubo	26	0,99732	2.52
47%	6 membranas/tubo	29	0,97676	2,58
	7 membranas/tubo	25	0,97173	2,58
48%	6 membranas/tubo	29	0,99062	2,60
	7 membranas/tubo	25	0,98525	2,60
49%	6 membranas/tubo	28	0,97020	2,66
	7 membranas/tubo	25	0,99940	2,63
50%	6 membranas/tubo	28	0,98480	2,69
	7 membranas/tubo	24	0,97324	2,69

Tabla 2.9: Resultados para la membrana Lewabrane RO S440 HR. Elaboración propi

Lewabrane RO S400 HR				
Conversión	Configuración	Tubos de presión	Boro [mg/L]	Potencia específica [kW/m3]
40%	6 membranas/tubo	36	0,99978	2,33
	7 membranas/tubo	31	0,99545	2,34
41%	6 membranas/tubo	35	0,98353	2,37
	7 membranas/tubo	30	0,97448	2,39
42%	6 membranas/tubo	35	0,99539	2,39
	7 membranas/tubo	30	0,98595	2,40
43%	6 membranas/tubo	34	0,97894	2,43
	7 membranas/tubo	30	0,99789	2,42
44%	6 membranas/tubo	34	0,99138	2,45
	7 membranas/tubo	29	0,97658	2,46
45%	6 membranas/tubo	33	0,97473	2,50
	7 membranas/tubo	29	0,98905	2,48
46%	6 membranas/tubo	33	0,98780	2,52
	7 membranas/tubo	28	0,96737	2,54
47%	6 membranas/tubo	32	0,97095	2,57
	7 membranas/tubo	28	0,98043	2,56
48%	6 membranas/tubo	32	0,98472	2,60
	7 membranas/tubo	28	0,99408	2,58
49%	6 membranas/tubo	32	0,99912	2,63
	7 membranas/tubo	27	0,97205	2,64
50%	6 membranas/tubo	31	0,98223	2,69
	7 membranas/tubo	27	0,98643	2,67

Tabla 2.10: Resultados para la membrana Lewabrane RO S400 HR. Elaboración propia

2.7 Discusión de resultados

En cuanto a las dos membranas de especialidad alto flujo (HF), se observa que no son válidas para ninguna de las combinaciones posibles. Esto se debe a que, para la conversión indicada y el mínimo número de tubos de presión admisible en cada configuración según la *tabla 2.2*, la concentración de boro supera 1mg/L. Al aumentar el número de tubos, dicha concentración aumenta aún más y, por tanto, ningún caso es válido.

En cuanto a las membranas de especialidad alto rechazo (HR) se observa que el modelo Lewabrane RO 400S HR, si bien requiere un mayor número de tubos de presión, ofrece mejores prestaciones en cuanto a potencia específica para cualquier conversión.

En principio, la combinación de 40% conversión y 36 tubos de presión con 6 membranas por tubo ofrece el valor óptimo (2.33 kWh/m³). Esto se debe a que una menor conversión requiere tener que superar presiones osmóticas menores, por tanto, el consumo de energía será menor.

Sin embargo, también implica mayores caudales de captación, alimentación y concentrado – lo que trae como consecuencia mayores requerimientos de potencia para las bombas correspondientes. Por este motivo, el valor óptimo de conversión dependerá del consumo del conjunto teniendo en cuenta todos los equipos.

Es decir, una menor conversión implica un menor consumo para la bomba de alta presión (asociado a la menor altura de presión a vencer), pero un mayor consumo para las bombas de captación y de circulación o booster (asociado al aumento de caudal a impulsar)

Como de momento se desconoce el consumo final que tendrán las bombas, y no es posible conocerlo sin antes realizar un primer dimensionado del núcleo de membranas, se opta de momento por un término medio que minimice las posibles pérdidas: 45% de conversión y 29 tubos de presión con 7 membranas por tubo, que ofrece 2.48kW/m³ de consumo de energía específica.

Esto sigue sin ser el dimensionamiento definitivo del bastidor de membranas, ya que el pretratamiento químico variará ligeramente las concentraciones del permeado, como se verá en el apartado 4.2 del presente anexo.

Se muestra en la *figura 2.5* cómo quedaría, por ahora, la concentración de elementos en el agua de permeado. Se cumplen todos los parámetros indicados en la *tabla 2.4* a excepción del pH, que requerirá postratamiento. Sin embargo, en el caso de boro, aunque teóricamente cumple la recomendación del RD, se encuentra muy cerca del límite. Es necesario comprobar a continuación qué ocurre con el mismo tras modificar los valores supuestos del recuperador de energía y el dimensionamiento del pretratamiento.

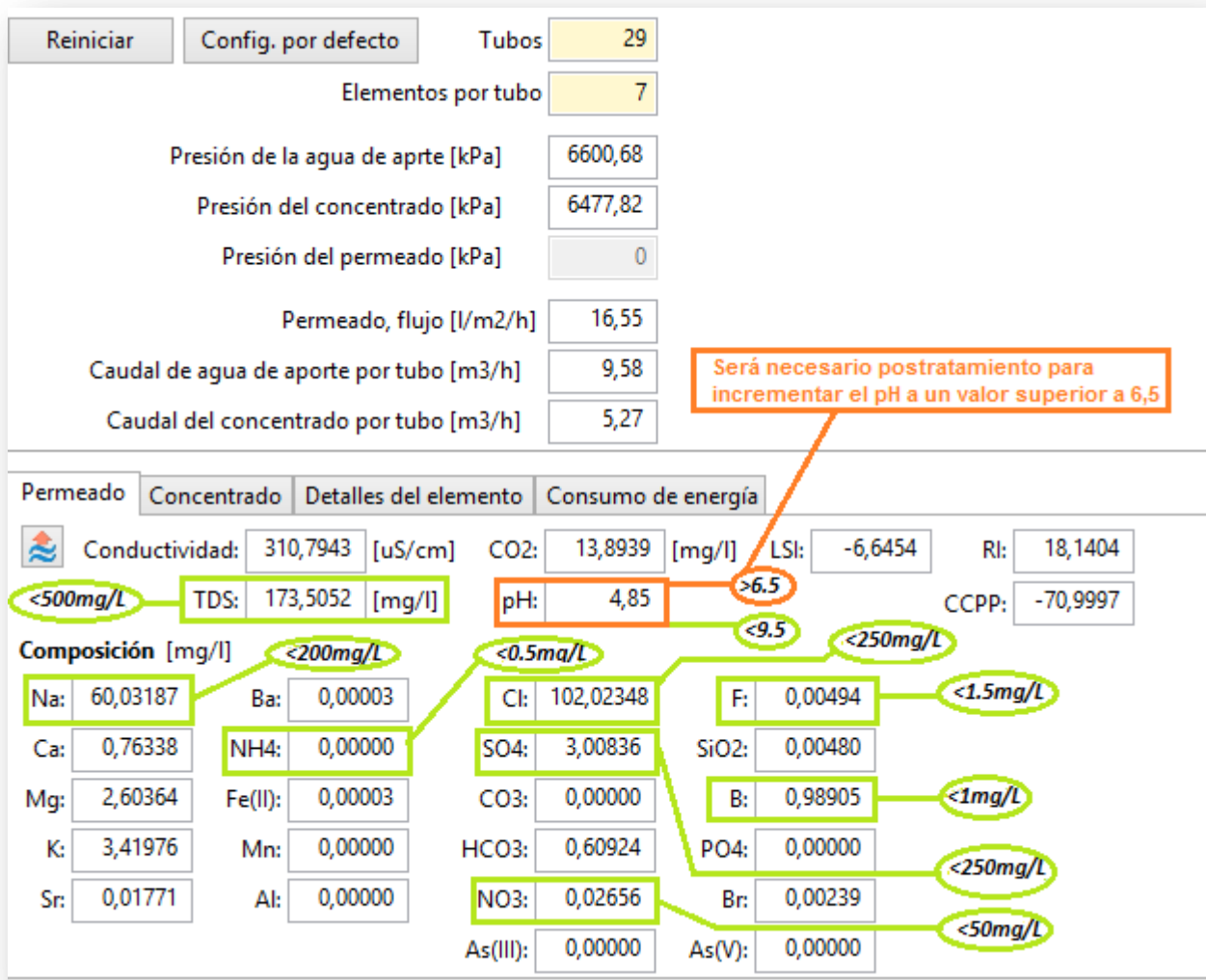


Figura 2.5: Concentraciones de elementos tras el primer dimensionamiento. Fuente: LewaPlus

3. Recuperación de energía

3.1 Introducción

La descripción teórica del funcionamiento y los diversos tipos de dispositivos de recuperación de energía han sido desarrollados en el anexo I. Se ha optado por emplear un ERD isobárico (intercambiador isobárico) por tratarse, generalmente, del que mejores prestaciones ofrece en cuanto a rendimiento.

Al igual que para el bastidor de membranas, el dimensionamiento del sistema de recuperación de energía requiere fijar una serie de parámetros que son conocidos, suponer otros (el rendimiento de las bombas) y escoger el resto (modelo y cantidad de ERD) en función del criterio prioritario de diseño.

Esto se hará mediante una hoja Excel para el dimensionamiento que facilita cada fabricante. Así, se ha decidido comparar los resultados de la oferta de Energy Recovery con la oferta de Danfoss.

3.2 Fabricante Energy Recovery

3.2.1 Parámetros fijados

Parámetros fijados de diseño

- Temperatura del agua de alimentación = 21 °C
- Conversión = 45%
- Número de trenes = 1 (El tren de permeado se refiere al bastidor de membranas)
- Caudal de permeado = 3000 m³/día = 125 m³/h
- Fijamos la presión de entrada a 2 bar, para evitar que se produzca cavitación en la bomba de alta presión, y la presión de permeado (salida) a 0 bar

Datos aportados por LewaPlus (fig. 3.1)

1. TDS del agua de aporte = 38884 mg/L
2. Presión del agua de aporte = 66,01 bar
3. TDS del permeado = 173,51 mg/L
4. Presión del concentrado = 64,78 bar

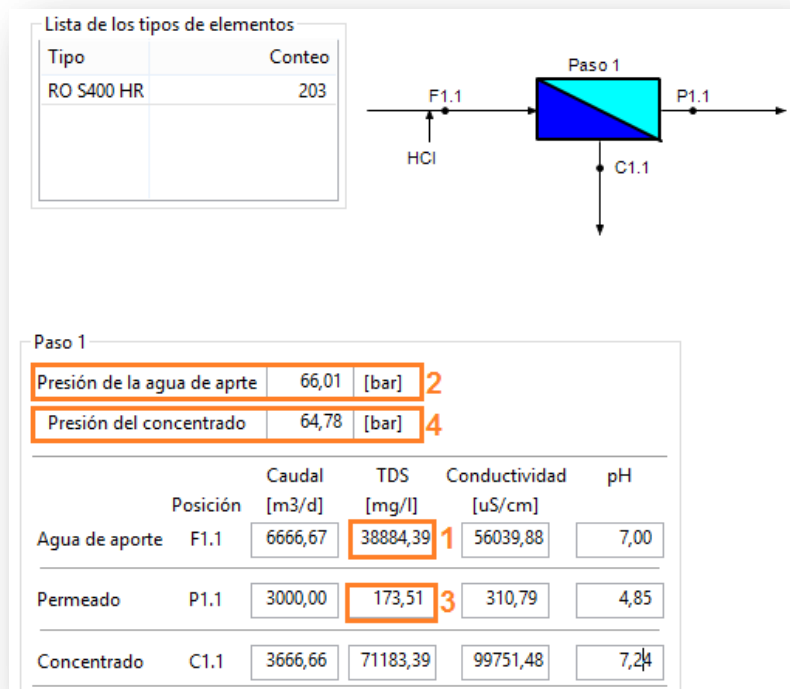


Figura 3.1: Datos necesarios para el dimensionamiento del ERD. Fuente: LewaPlus

3.2.2 Parámetros supuestos

- El rendimiento de las bombas de alimentación (fig. 3.2) y booster no es posible modificarlo directamente, y se deja en su valor por defecto

	Pump Eff	Motor Eff	VFD Eff	Power (KW)	PX Power Savings (KW)	CO2 Savings (tons/year)
High Pressure pump	80.9%	94.5%	100.0%	293.9	342	1,767
Circulation Pump	83.3%	94.3%	100.0%	9.5		

Figura 3.2: Datos supuestos de rendimiento de las bombas. Fuente: Energy Recovery

- El parámetro ‘Lead Flow’ se deja en su valor por defecto: 0%

3.2.3 Parámetros seleccionados

- Modelo y cantidad de dispositivos de recuperación de energía:
Con el fin de obtener el menor consumo de energía específico, se escoge usar 3 unidades del modelo PXQ300, que tiene el mejor rendimiento (97.44%) y la mayor capacidad de flujo por unidad, como se puede comprobar en las figuras 3.3 y 3.4

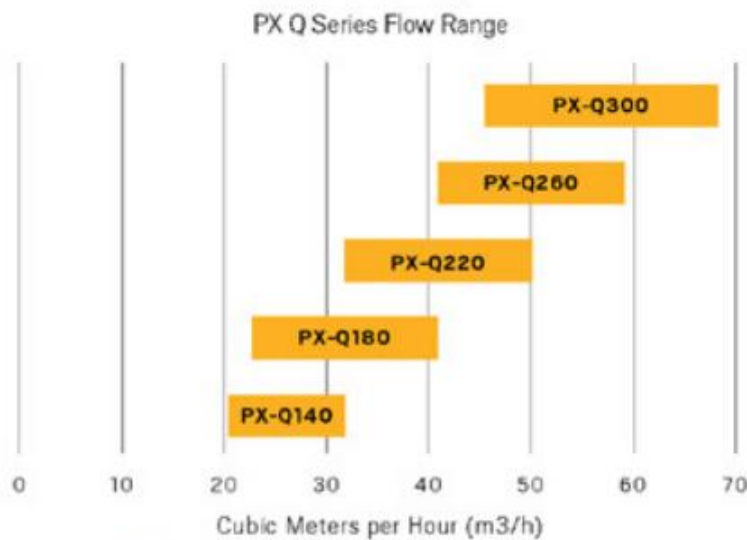


Figura 3.3: Capacidad de flujo de los diferentes modelos. Fuente: Energy Recovery

PX Model	Minimum Guaranteed Efficiency*	Flow Range per Unit (brine flow)
PX-Q300	97.2%	45.4 - 68.1 m ³ /h
PX-Q260	96.8%	40.8 - 59 m ³ /h
PX-260	96.8%	40.8 - 59 m ³ /h
PX-220	96.8% (@45.4 m ³ /h)	31.7 - 49.9 m ³ /h
PX-180	96.7% (@36.3 m ³ /h)	22.7 - 40.8 m ³ /h
PX-140	94.8% (@22.7 m ³ /h)	20.4 - 31.7 m ³ /h
PX-90	96.0% (@15.8 m ³ /h)	13.6 - 20.4 m ³ /h
PX-70	95.3% (@11.3 m ³ /h)	9.08 - 15.8 m ³ /h
PX-45	94.0% (@7.9 m ³ /h)	6.81 - 10.2 m ³ /h
PX-30	93.4% (@5.6 m ³ /h)	4.54 - 6.81 m ³ /h

Figura 3.4: Rendimiento y capacidad de flujo de los diferentes modelos. Fuente: Energy Recovery

3.2.4 Resultados obtenidos

En los resultados (fig. 3.5) se observa que se requieren 2.43 kWh/m³ de consumo de energía específico. En la figura 3.6 se muestra un resumen del dimensionamiento realizado

PX Technology Performance	
PX unitary flow	50.9 m ³ /hr
Salinity Increase at membranes	2.7%
Volumetric mixing VM	5.8%
Lubrication flow (LF) per PX array	1.5 m ³ /hr
LF as % of concentrate flow	1.0%
HP DP	0.5 bar
LP DP	0.6 bar
RO Specific Energy **	2.43 kWh/m³
Brine Recovery Efficiency	98.18%
Overall PX Efficiency	97.44%

Figura 3.5: Resultados finales del dimensionamiento del ERD. Fuente: Energy Recovery

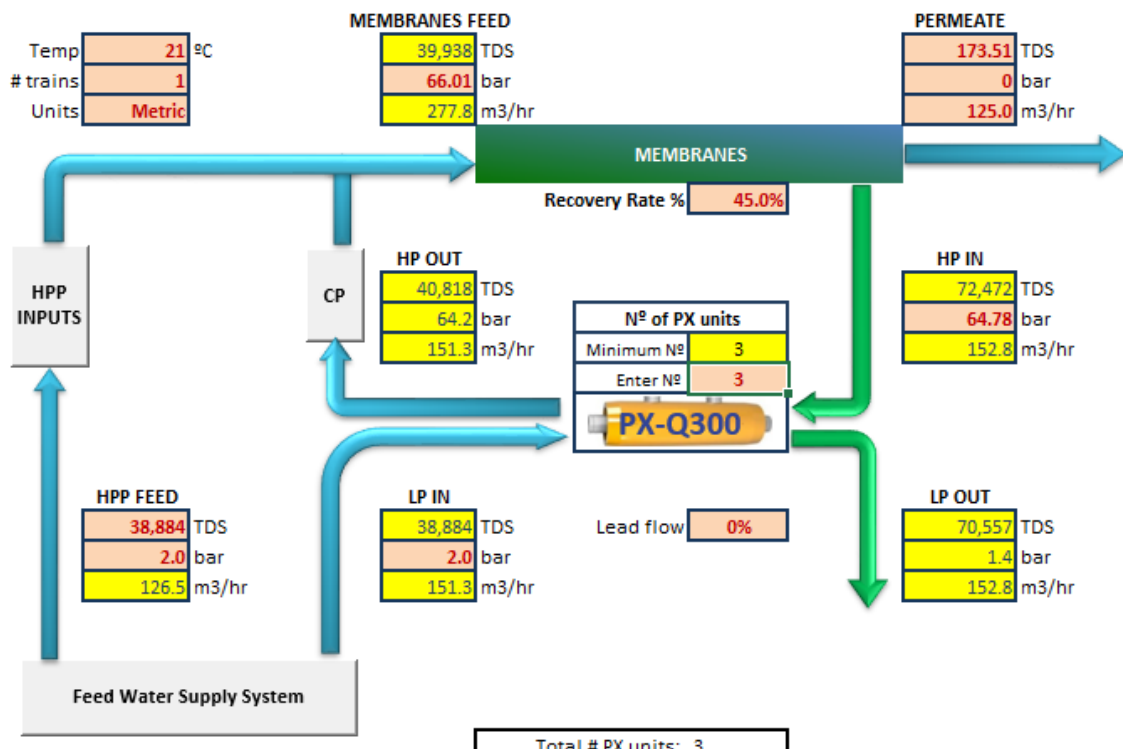


Figura 3.6: Datos introducidos para el dimensionamiento del ERD. Fuente: Energy Recovery

3.2.5 Corrección de los valores supuestos en LewaPlus

A continuación, modificamos los datos supuestos en el software de dimensionamiento del bastidor de membranas con los nuevos datos conocidos (fig. 3.7) e igualamos los valores supuestos de rendimiento de las bombas (fig. 3.2):

En cuanto al recuperador de energía (ERD):

- Dimensionamiento de unidad por defecto: 50,9m³/h
- Fuga: 1%
- Caudal en exceso: 0%
- Presión del agua de aporte a ERD: 647,8kPa

En cuanto a las bombas de alta presión y de circulación o booster:

- Eficiencia bomba de alta presión: 80,9%, eficiencia del motor: 94,5%
- Eficiencia bomba de circulación: 84,3%, eficiencia del motor: 94,3%

Restaurar valores predeterminados		Bomba de circulación		ERD isobárico	
Bomba de alta presión		Caudal del booster	150,69 [m3/h]	Caudal del concentrado	152,78 [m3/h]
Caudal de la bomba	127,09 [m3/h]	Presión booster	183,77 [kPa]	Número de unidades ERD	4
Presión bomba succión	200 [kPa]	Eficiencia del booster	83,3 [%]	Caudal por unidad	38,19 [m3/h]
Presión agua aporte	6575,81 [kPa]	Eficiencia del motor	94,3 [%]	Lubricación por unidad	0,52 [m3/h]
Presión de la bomba adicional	0 [kPa]	<input type="checkbox"/> Eficiencia VFD	98 [%]	Presión de la agua de aporte ERD	647,8 [kPa]
Presión bomba descarga	6575,81 [kPa]	Potencia del motor	9,79 [kW]	Presión de entrada	6452,91 [kPa]
Eficiencia de bomba	80,9 [%]			Presión de descarga (alta)	6392,04 [kPa]
Eficiencia del motor	94,5 [%]			Presión de descarga (baja)	609,10 [kPa]
<input type="checkbox"/> Eficiencia VFD	98 [%]			Fuga	1,00 [%]
Potencia del motor	294,42 [kW]			Cuadral en exceso	0,00 [%]
				Eficiencia ERD	97,49 [%]
ERD isobárico		Consumo de energía del sistema			
Dimensionado de la unidad por defecto	50,9 [m3/h]	Potencia eléctrica total	304,21 [kW]		
Fuga	1 %	Consumo de energía específico	2,43 [kWh/m3]		
Cuadral en exceso	0 %				

Figura 3.7: Consumo de energía corrigiendo los valores supuestos. Fuente: LewaPlus

También se fija la presión de succión de la bomba de alta presión a 200kPa (2 bar) para evitar la cavitación, como se indicó previamente.

Como se puede comprobar en la *figura 3.5*, se obtiene exactamente el mismo valor de consumo de energía específica: $2,43\text{kWh/m}^3$, por lo que se puede confirmar como válido para este primer dimensionamiento. Nótese, además, que la eficiencia promedio del sistema de recuperación de energía (97,49%), calculada automáticamente, es muy similar a la eficiencia del equipo PX-300 de Energy Recovery (97,44%), indicado en la *figura 3.3*

Se advierte que estos valores siguen siendo meramente orientativos: ya que el consumo de energía global definitivo se obtendrá tras conocer el valor real del rendimiento de las bombas (aportado por el fabricante), y sumar el consumo de potencia de las bombas de captación, distribución, y postratamiento - no consideradas en el software de dimensionamiento de bastidor de membranas ni en el documento Excel facilitado por Energy Recovery.

Cabe señalar que, a consecuencia de estas modificaciones en los parámetros supuestos, tanto los valores en las concentraciones de elementos en el permeado (*fig. 2.5*) como los de las presiones fijadas anteriormente (*fig. 3.1*), se ven alterados ligeramente respecto a lo expuesto con anterioridad - aunque de manera insignificante e intrascendente de cara al diseño (*fig. 3.9*), ya que la concentración de boro sigue sin superar 1 mg/L (*figs. 3.8*)

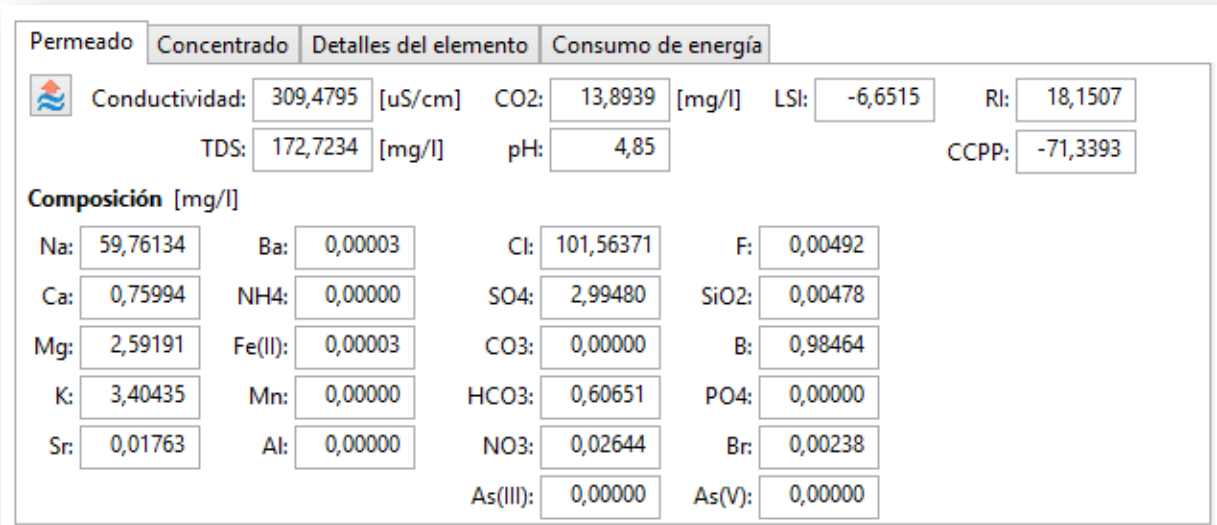


Figura 3.8: Composición del permeado tras corregir los valores supuestos. Fuente: LewaPlus

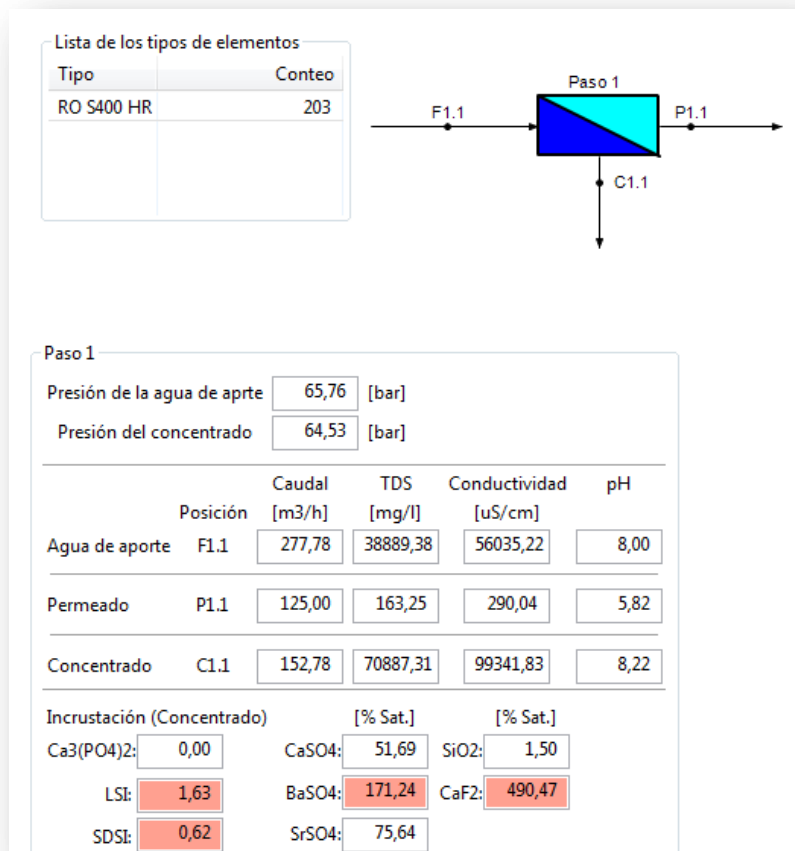


Figura 3.9: Presiones de alimentación y rechazo tras corregir los valores supuestos. Fuente: LewaPlus

3.3 Fabricante Danfoss

3.3.1 Parámetros conocidos

Finalmente, antes de proceder con el dimensionamiento del pretratamiento, se decide consultar otro fabricante de dispositivos de recuperación de energía: Danfoss – el cual también facilita una hoja Excel que ofrece información sobre el consumo de energía específica a partir de los datos introducidos.

Datos fijados de diseño:

- Caudal de permeado = 3000 m³/día
- Conversión = 45%
- Presión de succión de la bomba de alta presión: 2 bar (para evitar cavitación)

Datos tomados a partir de LewaPlus (fig. 3.1)

- Salinidad del agua de alimentación = 38884 mg/L = 38884 ppm
- Salinidad del agua de permeado = 173.51 mg/L = 173.51 ppm
- Presión de alimentación a la membrana = 66 bar
- Caída de presión entre la alimentación y el concentrado = 66 bar – 64.8 bar = 1.2 bar

3.3.2 Parámetros supuestos:

Para un estudio verdaderamente comparativo entre los dos fabricantes, se utilizarán los mismos datos supuestos por Energy Recovery (figs. 3.2 y 3.6)

Datos tomados a partir de Energy Recovery

- Presión de descarga del concentrado (tras ERD) = 1.4 bar
- Eficiencia de la bomba de alta presión = 80.9%
- Eficiencia del motor de la bomba de alta presión = 94.5%
- Eficiencia del motor de la bomba booster = 94.3%

3.3.3 Parámetros seleccionados:

- Se escoge el equipo que ofrece las mejores prestaciones en cuanto a consumo de energía específico (iSave50 o iSave70, equivalente en ambos)

El resultado del dimensionamiento tras la introducción de datos se muestra en la figura 3.10

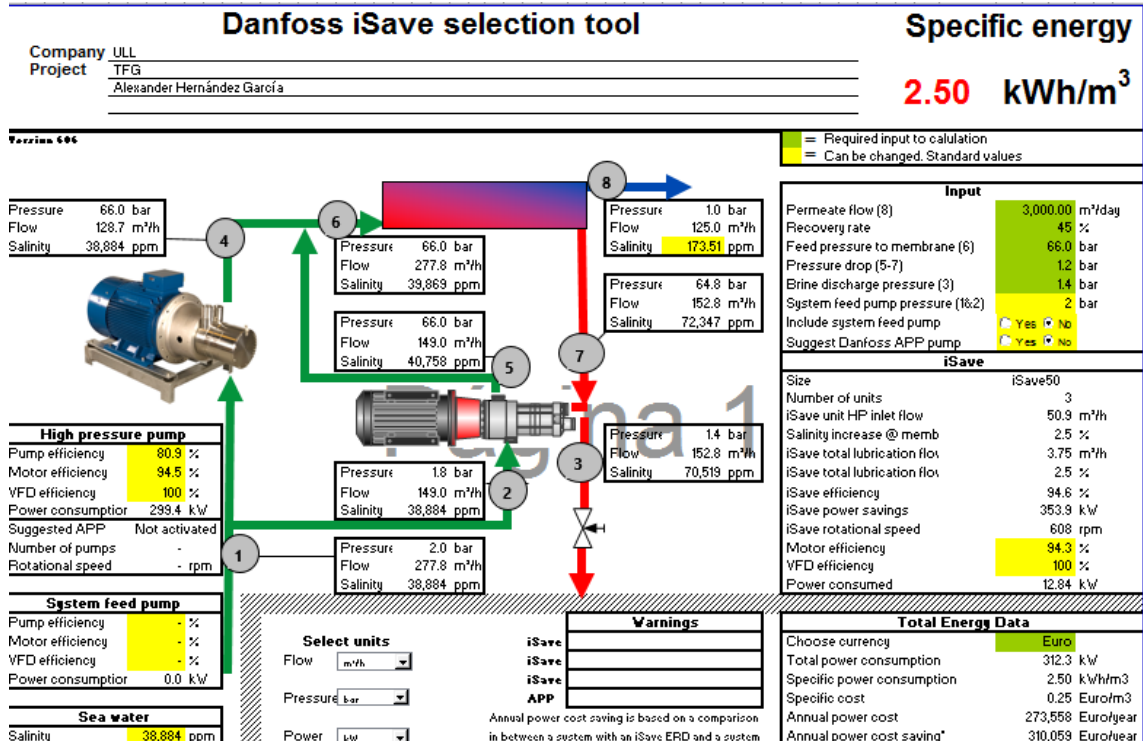


Figura 3.10: Resultados del dimensionamiento del dispositivo ERD. Fuente: Danfoss

3.3.3 Comparación de resultados entre Energy Recovery y Danfoss

Se observa en la figura 3.10 que la utilización de un ERD del fabricante Danfoss implica peores resultados en cuanto a consumo de energía específico: 2.50 kWh/m³ frente a 2.43 kWh/m³ de Energy Recovery (fig. 3.5).

Por tanto, se escoge al fabricante Energy Recovery para el suministro del dispositivo de recuperación de energía, que será un intercambiador de presión de tipo rotativo (fig. 3.11)



Figura 3.11: Dispositivo ERD de tipo intercambiador de presión rotativo. Fuente: Energy Recovery

4. Dimensionamiento del pretratamiento y postratamiento del agua

El agua de captación no puede pasar directamente a través de las membranas sin un tratamiento previo o pretratamiento, ya que resultarían dañadas. Es necesario dimensionar un pretratamiento tanto físico como químico, que se indica a continuación. Para profundizar más en el aspecto teórico, véase anexo I.

4.1 Pretratamiento físico

El pretratamiento físico básicamente consiste en procesos de filtración para reducir el tamaño de las partículas. Normalmente, se requiere un tamaño máximo de partícula de 5µm para garantizar un funcionamiento continuo de las membranas, si bien resultaría ideal que estuviera por debajo de 1µm.

En ciertas instalaciones se suele usar la microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración, que reducen el tamaño de partícula considerablemente. Sin embargo, para nuestro proyecto, con el objetivo de minimizar los costes, se considera que bastará con filtros de arena y de cartucho, los cuales filtrarán partículas mayores a 20 µm y 5 µm. Esto causará una pérdida de carga estimada y aproximada de 1 bar en cada filtro (*tabla 4.1*)

Pretratamiento físico			
FASE	Tipo de filtro	Función	Pérdida de carga estimada
1	Filtros de arena	Filtración partículas >20 µm	1 bar
2	Filtros de cartuchos	Filtración partículas >5 µm	1 bar

Tabla 4.1: Dimensionamiento del pretratamiento físico. Elaboración propia

Así, tras el pretratamiento físico, únicamente existirán partículas de tamaño igual o inferior a 5 µm, y habrá una pérdida de carga total estimada de 2 bar.

4.2 Pretratamiento químico

Su misión es garantizar que no existan problemas en las membranas producidos por actividad biológica, precipitación, ataque químico, etc.

En primer lugar, aunque no se indica en el software, es necesario eliminar la actividad biológica. Esto se consigue mediante la adición de cloro hasta 1ppm, si bien posteriormente se requerirá una fase de dechloración mediante NaHSO₃.

En segundo lugar, si analizamos la composición química del concentrado mediante LewaPlus (fig. 4.1), nos encontramos con varios avisos (celdas remarcadas en rojo):

Permeado	Concentrado	Detalles del elemento		Consumo de energía	
	Conductividad: 99341,83 [uS/cm]	CO ₂ : 1,54 [mg/l]	LSI: 1,63	Ca ₃ (PO ₄) ₂ : 0,00	
	TDS: 70887,31 [mg/l]	pH: 8,22	SDSI: 0,62		
Composición [mg/l]					[% Sat.]
Na: 21632,693	Ba: 0,031	Cl: 38920,159	F: 1,570	CaSO ₄ : 51,69	
Ca: 786,544	NH ₄ : 0,000	SO ₄ : 5746,659	SiO ₂ : 2,005	BaSO ₄ : 171,24	
Mg: 2682,643	Fe(II): 0,046	CO ₃ : 13,876	B: 8,925	SrSO ₄ : 75,64	
K: 821,081	Mn: 0,005	HCO ₃ : 250,654	PO ₄ : 0,000	SiO ₂ : 1,50	
Sr: 18,249	Al: 0,000	NO ₃ : 1,257	Br: 0,911	CaF ₂ : 490,47	
		As(III): 0,000	As(V): 0,000		

Figura 4.1: Composición del agua de rechazo. Fuente: Lewapplus

Por un lado, se tiene que $SDSI > 0$, lo cual está fuera del rango de valores recomendados por el fabricante (tabla 1.2). Esto implica una mayor probabilidad de que se produzcan incrustaciones en las membranas (véase anexo I). Para corregirlo se requiere disminuir el pH del agua de alimentación, y el software determina que esto se conseguirá mediante la aplicación de HCl en una proporción de 29,5 mg/L, de tal manera que la composición química del concentrado quedaría como se muestra a continuación (fig. 4.2):

Permeado	Concentrado	Detalles del elemento		Consumo de energía	
	Conductividad: 99337,46 [uS/cm]	CO ₂ : 34,30 [mg/l]	LSI: -0,00	Ca ₃ (PO ₄) ₂ : 0,00	
	TDS: 70840,24 [mg/l]	pH: 6,73	SDSI: -1,01		
Composición [mg/l]					[% Sat.]
Na: 21627,123	Ba: 0,031	Cl: 38962,406	F: 1,570	CaSO ₄ : 51,70	
Ca: 786,473	NH ₄ : 0,000	SO ₄ : 5746,363	SiO ₂ : 2,005	BaSO ₄ : 171,27	
Mg: 2682,402	Fe(II): 0,046	CO ₃ : 0,327	B: 8,727	SrSO ₄ : 75,65	
K: 820,763	Mn: 0,005	HCO ₃ : 181,584	PO ₄ : 0,000	SiO ₂ : 1,83	
Sr: 18,248	Al: 0,000	NO ₃ : 1,255	Br: 0,911	CaF ₂ : 490,08	
		As(III): 0,000	As(V): 0,000		

Figura 4.2: Composición del agua de rechazo tras la corrección del pH. Fuente: Lewapplus

Sin embargo, esto también modificará ligeramente la composición del permeado (fig. 4.3), haciendo que la concentración de boro supere, aunque de manera ínfima, el límite de 1 mg/L (y el empleo de otro producto químico para disminuir el pH, como H_2SO_4 , genera el mismo problema):

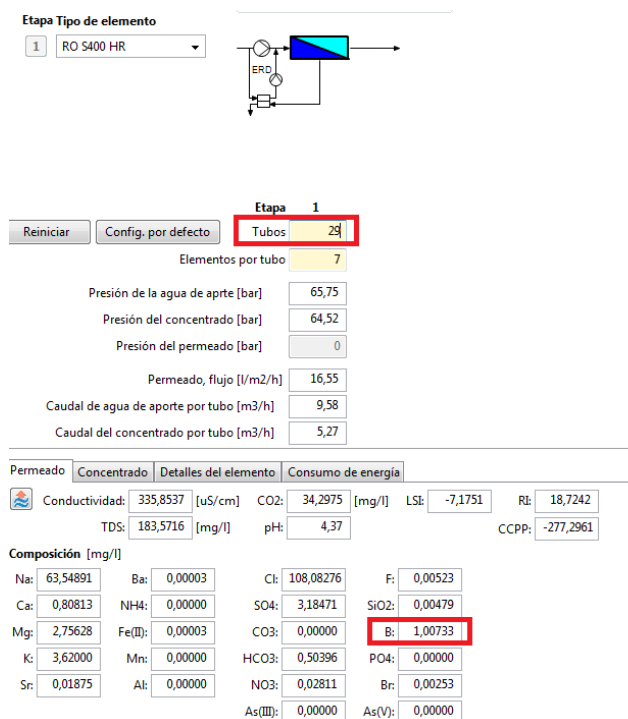


Figura 4.3: Composición del agua de permeado tras la corrección del pH. Fuente: Lewaplus

A consecuencia de lo anterior, es necesario reducir la cantidad de tubos de presión indicada anteriormente (apartado 2.7 del presente anexo) hasta un total de veintiocho, lo cual se traduce en un ligero pero necesario aumento de consumo de energía específica, hasta 2.47kWh/m³ (fig. 4.4)

Y ahora sí, quedaría dimensionado de manera definitiva el bastidor de membranas. La posterior obtención de la potencia y rendimiento de las bombas servirá para saber el valor final exacto de consumo de energía específica de la EDAM.

En cuanto al porcentaje de saturación de $BaSO_4$ y CaF_2 en el concentrado, el software también nos muestra avisos (fig. 4.5) debido a su alto porcentaje de saturación: sin embargo, según su guía de diseño, se encuentra en valores aceptables (tabla 4.2), donde la formación de incrustaciones en el concentrado no supondría problemas significantes.

No obstante, para asegurar un correcto funcionamiento del sistema, se podría añadir un dispersante o antiincrustante, si bien la indicación y dosis exacta del mismo no es calculada automáticamente por el programa, y queda fuera del alcance de este proyecto.

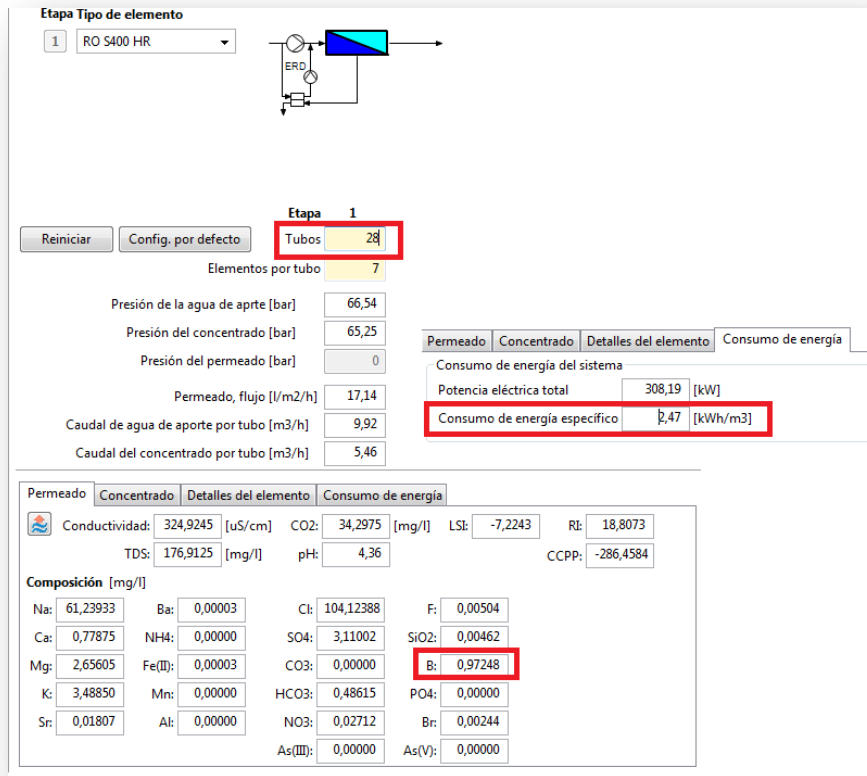


Figura 4.4: Dimensionamiento definitivo del bastidor de membranas. Fuente: Lewaplus

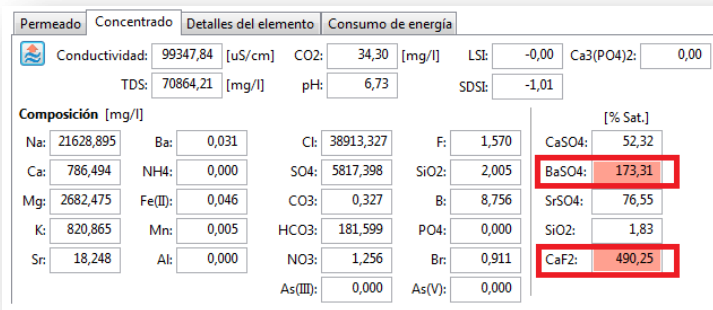


Figura 4.5: Composición del agua de rechazo. Fuente: Lewaplus

Scale forming compound	Conservative saturation level	Possible saturation level in coordination with supplier of SI
CaSO ₄	230%	> 230 - 300%
BaSO ₄	6000%	> 6000 - 10000%
SrSO ₄	800%	> 800 - 1000%
CaF ₂	6000%	> 6000 - 12000%
SiO ₂	100% (or 120-170ppm)	< 250ppm
CaCO ₃	LSI < 1.8, SDSI < 1.0	LSI < 2.5, SDSI < 1.5

Tabla 4.2: Niveles de saturación conservativos para BaSO₄ y CaF₂. Fuente: Lewaplus (guía de diseño)

El pretratamiento químico, finalmente, quedaría dimensionado de la siguiente manera (tabla 4.3):

Pretratamiento químico		
FASE	Tipo de tratamiento	Función
1	Cloración	Eliminar la actividad biológica
2	Decloración (mediante Na ₂ S ₂ O ₅)	Reducir exceso de Cl producido en la fase anterior
3	Ajuste de pH a 6.5 (HCl 54,1 mg/L)	Mantener el equilibrio químico del agua y prevenir la incrustación de carbonato cálcico
4	Dispersante / antiincrustante	Evitar la precipitación de BaSO ₄ y CaF ₂

Tabla 4.3: Dimensionamiento del pretratamiento químico. Elaboración propia

4.3 Postratamiento

El postratamiento se realiza al agua de permeado, una vez ésta ha salido del bastidor de membranas, para ajustar sus parámetros al uso posterior que se le va a dar. En nuestro caso, buscamos como destino para el agua el abastecimiento humano, lo cual implica cumplir los parámetros establecidos por la tabla 2.4. Además:

- Debe contener adecuadas concentraciones de minerales como el calcio
- Se debe minimizar la probabilidad de contaminación por microorganismos
- Idealmente, el agua debe encontrarse en un color, olor y sabor óptimo para su consumo

Analizando el agua de permeado (fig. 4.6), lo primero que nos llama la atención es el nivel de pH, que se encuentra muy por debajo del rango indicado.

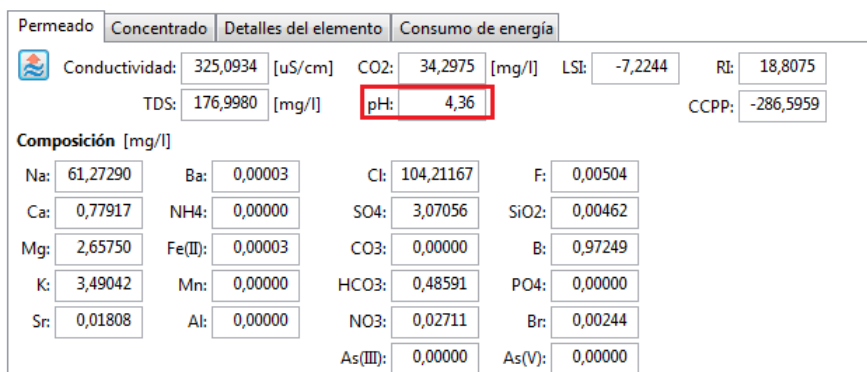


Figura 4.6: Composición del permeado. Fuente: LewaPlus

Para conseguir que se encuentre entre 6,5 y 9,5 existen diversas formas:

- Mezcla con otras aguas con pH superior: en nuestro caso, debe ser el agua de mar proveniente de la alimentación o aporte. Sin embargo, esto conlleva el aumento de las concentraciones de boro, que se encuentra muy cerca del límite. Así, cuando se intenta simular este postratamiento mediante LewaPlus (fig. 4.7), se comprueba que se necesita un mínimo de 36% (71m³/h) de mezcla de agua de aporte para elevar el pH hasta 6,5 – pero esto conlleva el aumento de la concentración de boro hasta >2mg/L. Por tanto, se descarta esta opción.
- Descarbonatación. Mediante la eliminación de CO₂ por medio de un descarbonador o desgasificador atmosférico, se reducen las concentraciones de CO₂ y con ello el pH. Cuando intentamos simular esto mediante LewaPlus (fig. 4.8), ocurre que, al ser ya en nuestro caso las concentraciones de CO₂ son relativamente bajas; reducirlas hasta el mínimo admisible por el software (1,8mg/L) no permite aumentar el pH suficientemente. Se extrae como conclusión que esta fase por sí sola resulta insuficiente, y debe acompañarse de otras en un proceso más complejo
- Adición de un producto químico: como sosa cáustica (NaOH). Mediante la simulación (fig. 4.9) se comprueba que resultaría necesario añadir 19,1mg/L de NaOH para obtener un pH de 6,5 sin que las concentraciones de boro se vean alteradas. Sin embargo, el valor de LSI (que da una idea de la tendencia a la corrosión del agua) debe encontrarse entre 0 y 0.5, ya que el agua de consumo humano requiere cierta dureza y alcalinidad, para que no sea tan agresiva. Para ello se deben aportar ciertos minerales como el calcio, ya que como se observa en dicha *figura 4.9*, éste tiene muy baja concentración.

Para la solución de todos los problemas indicados anteriormente, se emplea el postratamiento estándar que incorpora el software LewaPlus para el permeado de agua de mar, que consigue que el parámetro LSI (o más exactamente, SDSI – véase anexo I -) sea 0,1, con pH en torno a 8 y además aumenta las concentraciones de calcio en torno a 20mg/L. Se requieren tres fases:

- En primer lugar, eliminar CO₂ (descarbonatación) hasta 27,5mg/L → Se prepara al permeado para las fases posteriores (fig. 4.10)
- En segundo lugar, se añade 50mg de CaCO₃ → Se consigue elevar el pH hasta el rango recomendado para consumo humano, aumentando las concentraciones de calcio hasta 20mg/L (fig. 4.11)
- En tercer lugar se añade 5,10mg/L de sosa cáustica (NaOH) → Mantiene el agua en equilibrio químico, sin que sea corrosiva o con facilidad para las incrustaciones (fig. 4.12)

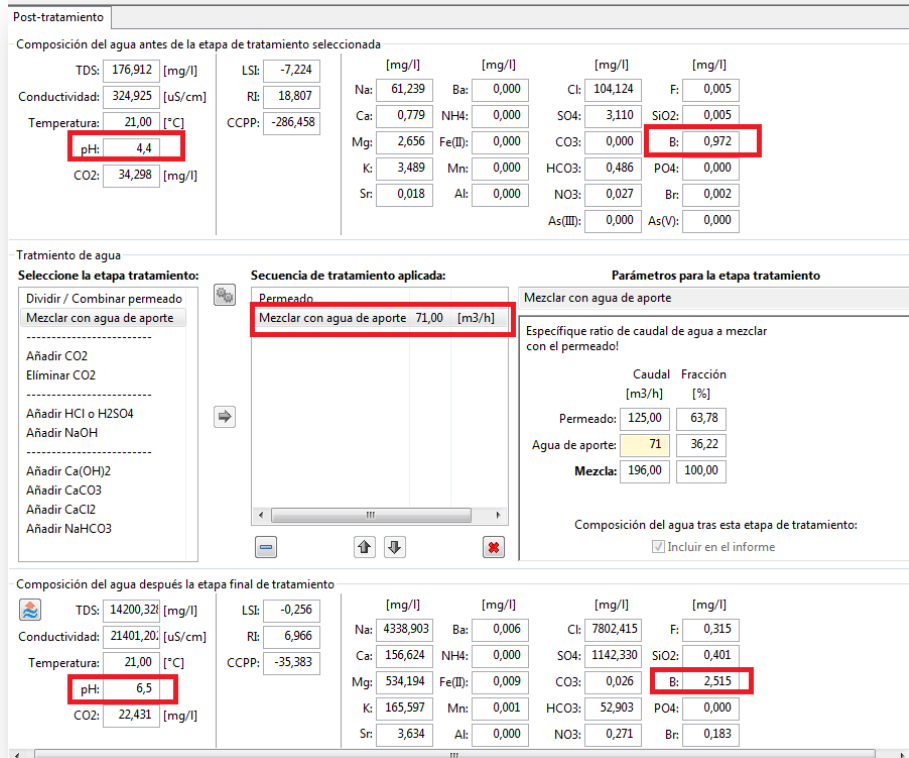


Figura 4.7: Simulación de postratamiento con mezcla de aguas. Fuente: LewaPlus

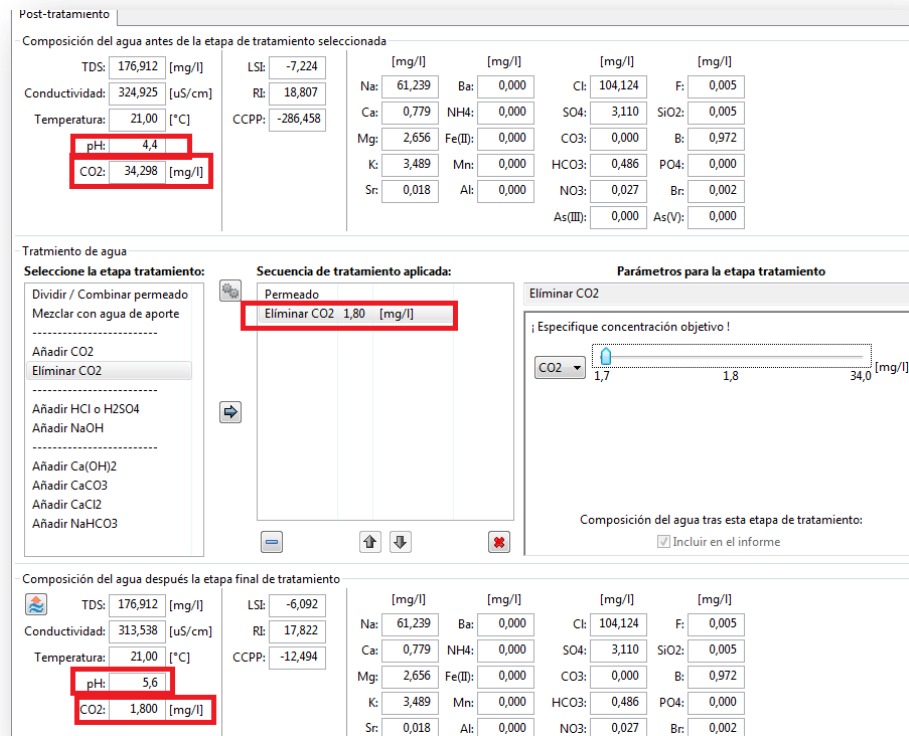


Figura 4.8: Simulación de postratamiento con decarbonación. Fuente: LewaPlus

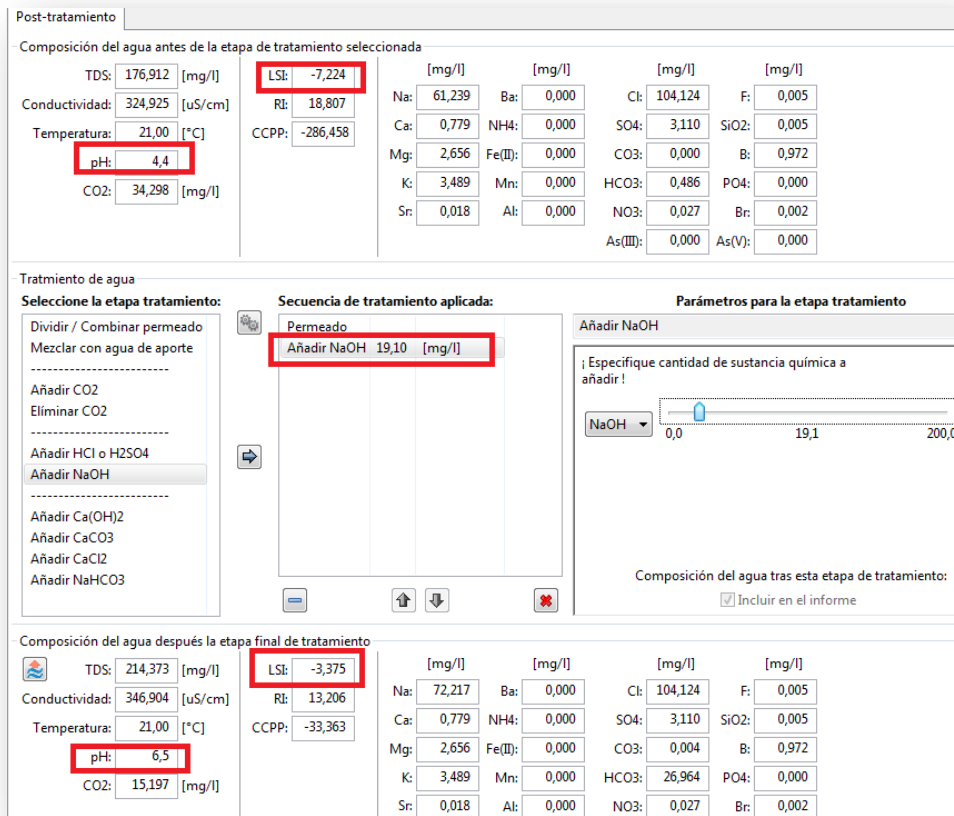


Figura 4.9: Simulación de postratamiento con adición de NaOH. Fuente: LewaPlus

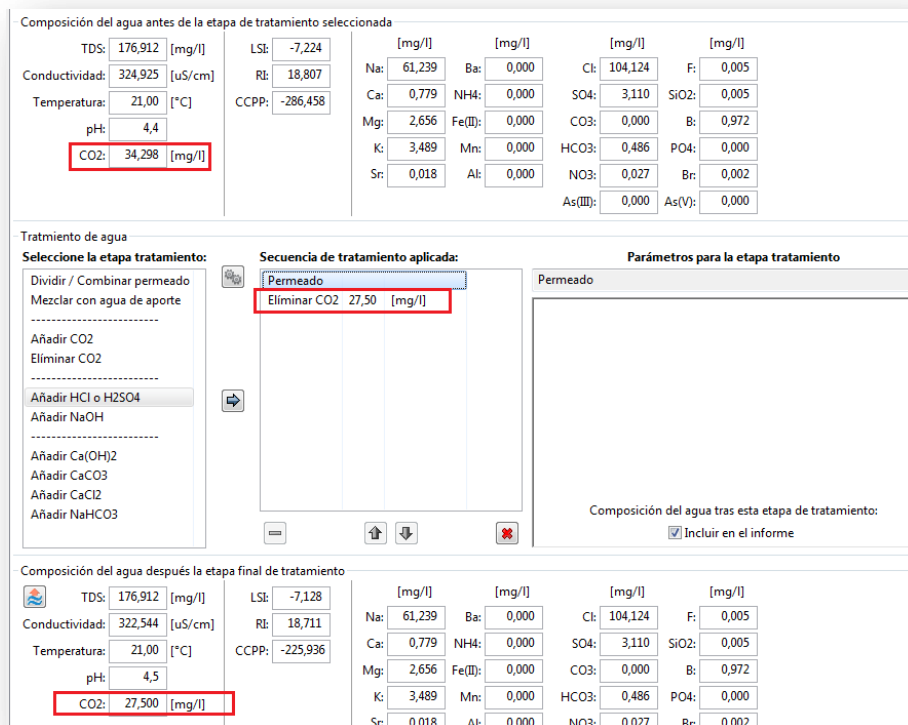


Figura 4.10: Primera fase del postratamiento estándar. Fuente: LewaPlus

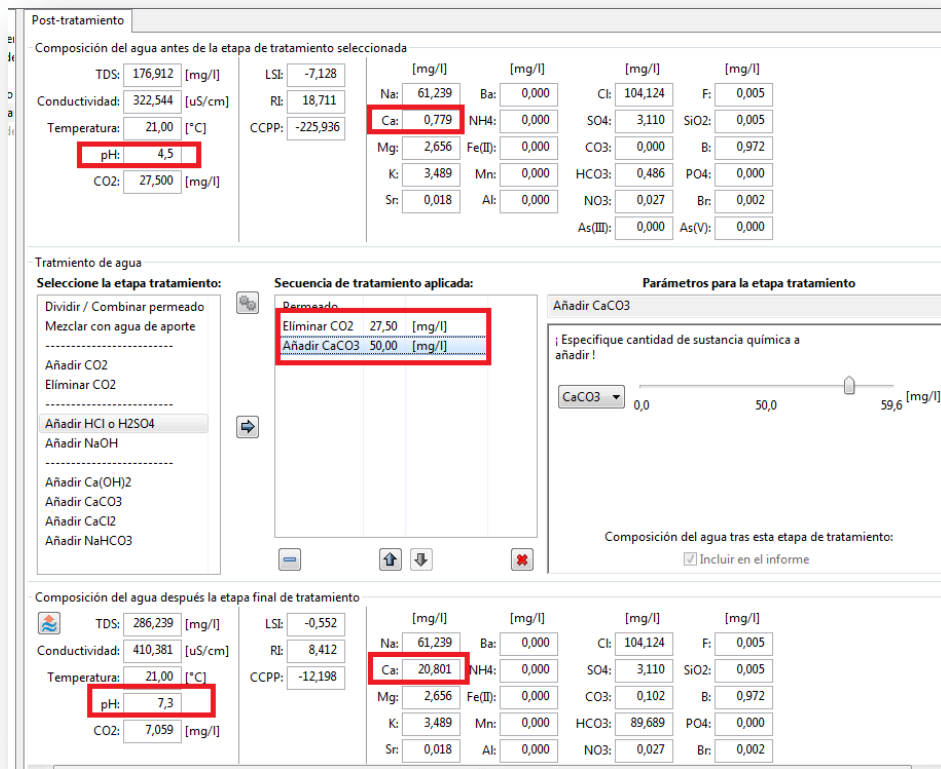


Figura 4.11: Segunda fase del postratamiento estándar. Fuente: LewaPlus

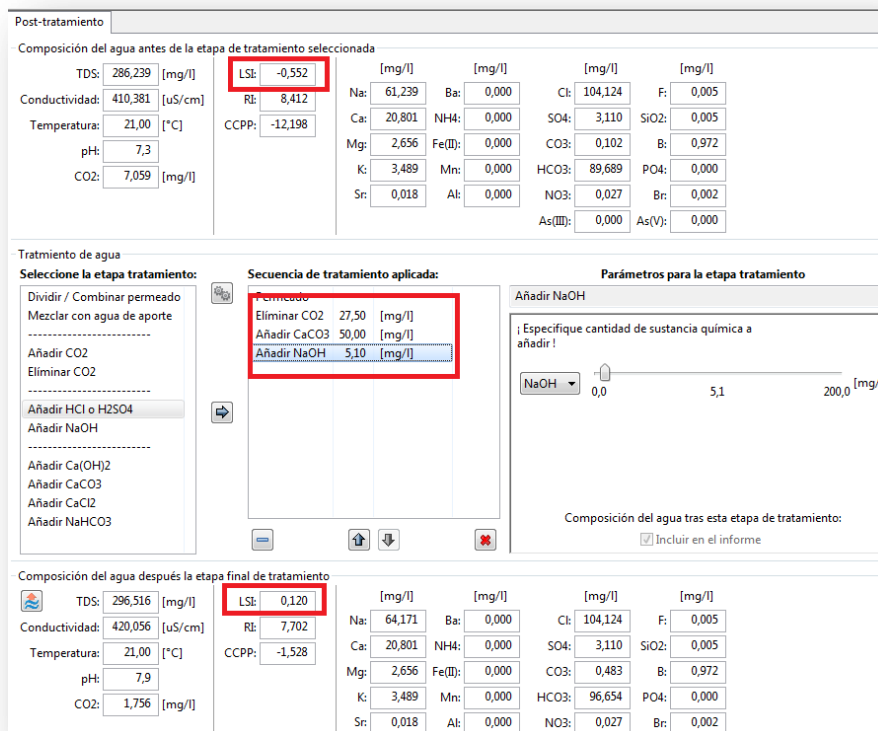


Figura 4.12: Tercera fase del postratamiento estándar. Fuente: LewaPlus

En la etapa de pretratamiento, se añadió bisulfito sódico como segunda fase (para la decoloración), necesario para reducir las elevadas concentraciones de cloro producidas en la fase de cloración que tenía como función eliminar los posibles microorganismos. Sin embargo, dado que el agua de permeado no se consumirá inmediatamente (previamente se almacenará en un depósito de distribución) de nuevo existe un riesgo de contaminación biológica que es preciso reducir.

Es necesario indicar que el software de LewaPlus no incluye la posibilidad de incluir la fase de cloración como pretratamiento, por lo tanto, las concentraciones de cloro serán inferiores a las indicadas en las figuras anteriores.

Debe realizarse una nueva fase de esterilización, mediante cloración o radiación ultravioleta:

Ante la imposibilidad de simular esta fase del postratamiento con LewaPlus, se escogerá la radiación ultravioleta para eliminar posibles los microorganismos y garantizar que la composición química del permeado final no se vea alterada negativamente. Finalmente, con el fin de eliminar el olor, color y sabor, para su ajuste final al consumo humano, se utilizarán filtros de lechos o carbón activado.

En la tabla 4.4 se resume el postratamiento anteriormente indicado.

Postratamiento		
FASE	Tratamiento	Función
1	Eliminar CO ₂ hasta 27,5mg/L	Preparación del permeado para fases posteriores
2	Añadir 50mg/L de CaCO ₃	Incremento de la concentración de calcio Ajuste de pH al rango adecuado
3	Añadir 5,1mg/L de NaOH	Mantener el agua en equilibrio químico, sin que sea corrosiva o con mayor facilidad para las incrustaciones
4	Esterilización mediante radiación UV	Prevenir contaminación mediante microorganismos
5	Filtros de lecho o carbón activado	Conseguir agua insípida, inodora e incolora

Tabla 4.4: Dimensionamiento del postratamiento. Elaboración propia



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

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO IV:

**DIMENSIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE
CAPTACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y RECHAZO DE
SALMUERA**

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

**DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA
ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES**

Autor: Alexander Hernández García

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Índice de contenido

1. Dimensionamiento del sistema de captación	1
1.1 Tipo de captación	1
1.2 Dimensionamiento de los pozos de captación	2
2. Dimensionamiento del sistema de rechazo de salmuera	6
2.1 Posibles opciones de gestión de la salmuera	6
2.2 Dimensionamiento del emisario submarino	6
3. Dimensionamiento del sistema de distribución.....	8
3.1 Dimensionamiento del pozo de regulación.....	8
3.2 Dimensionamiento de las tuberías.....	14
3.2.1 Material y fabricante de las tuberías	14
3.2.2 Diámetro de las tuberías	14
3.2.3 Longitud mínima de las tuberías	17
3.2.5 Cálculo de pérdidas de carga en tuberías.....	18

Índice de figuras

Figura 1.1: Disposición de los pozos de captación. Elaboración propia	2
Figura 1.2: Disposición de los pozos de captación en el terreno. Elaboración propia.....	3
Figura 1.3: Cotas a nivel del mar de los pozos de captación. Fuente: Goolzoom	4
Figura 1.4: Esquema de los factores determinantes para la profundidad del pozo. Elaboración propia.....	5
Figura 2.1: Longitud y profundidad necesarias para el emisario submarino. Fuente: Grafcan.....	7
Figura 3.1: Cota máxima en Puerto de Sardina. Fuente: Goolzoom	9
Figura 3.2: Cota máxima en Barrial. Fuente: Goolzoom	9
Figura 3.3: Cota máxima en Gáldar capital. Fuente: Goolzoom	10

Figura 3.4: Representación topográfica en Pico de Gáldar. Fuente: Goolzoom	11
Figura 3.5: Ordenación del territorio en Pico de Gáldar. Fuente: Goolzoom ...	11
Figura 3.6: Ubicación del depósito de regulación. Fuente: Grafcan	12
Figura 3.7: Línea sobre la que se elabora el perfil longitudinal. Fuente: Grafcan	13
Figura 3.8: Perfil longitudinal entre el depósito de regulación y Gáldar capital. Fuente: Grafcan.....	13
Figura 3.9: Distancia aproximada entre el depósito de regulación y la EDAM. Fuente: Grafcan.....	14
Figura 3.10: Diámetros comerciales disponibles por el fabricante. Fuente: Flowtite	15
Figura 3.11: Distancia colector de admisión a EDAM. Fuente: Grafcan	18

Índice de tablas

Tabla 1.1: Captación abierta. Fuente: Ministerio de Sanidad y Política social (Guía de desalación)	1
Tabla 1.2: Captación cerrada. Fuente: Ministerio de Sanidad y Política social (Guía de desalación)	1
Tabla 1.3: Bajamar máxima en Gran Canaria. Fuente: Informe REDMAR (Puertos del Estado).....	4
Tabla 1.4: Datos para conocer la profundidad necesaria del pozo. Elaboración propia.....	5
Tabla 3.1: Cota máxima a la que se sitúan las localidades a abastecer. Fuente: Goolzoom	8
Tabla 3.2: Caudales de los principales sistemas de la instalación. Elaboración propia.....	16
Tabla 3.3: Diámetro teórico y comercial de las tuberías. Elaboración propia ..	16
Tabla 3.4: Velocidad de los principales flujos. Elaboración propia	16
Tabla 3.5: Dimensionado final de las tuberías. Elaboración propia	17
Tabla 3.6: Cálculo del número de Reynolds. Elaboración propia	20
Tabla 3.7: Valores de los parámetros a introducir en la ecuación de Colebrook. Elaboración propia	21

Tabla 3.8: Resultados de la primera iteración para el cálculo del factor de fricción. Elaboración propia	21
Tabla 3.9: Resultados de la segunda iteración para el cálculo del factor de fricción. Elaboración propia	21
Tabla 3.10: Resultados de la tercera iteración para el cálculo del factor de fricción. Elaboración propia	21
Tabla 3.11: Resultados de la cuarta iteración para el cálculo del factor de fricción. Elaboración propia	22
Tabla 3.12: Resultados de la quinta iteración para el cálculo del factor de fricción. Elaboración propia	22
Tabla 3.13: Obtención de las pérdidas de carga primarias y secundarias. Elaboración propia	22

1. Dimensionamiento del sistema de captación

1.1 Tipo de captación

Básicamente, existen dos formas de realizar la captación del agua: mediante toma abierta (captación superficial, torres sumergidas, escollera...), obtenida directamente en el mar; o mediante toma cerrada (pozos profundos, pozos playeros, drenes horizontales, cántaras...) usualmente perforando el terreno y situado lo más cercano posible a la costa. Cada sistema tiene sus propias ventajas e inconvenientes, que se resumen a continuación (tabla 1.1 y 1.2), a rasgos generales y en lo que a este proyecto concierne:

CAPTACIÓN ABIERTA	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
<ul style="list-style-type: none"> • Aporta mayores caudales • Composición química variable, pero constante a lo largo del año 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta contaminación, actividad biológica, sólidos y oxígeno disuelto... • La temperatura puede variar en un rango alto a lo largo del año

Tabla 1.1: Captación abierta. Fuente: Ministerio de Sanidad y Política social (Guía de desalación)

CAPTACIÓN CERRADA	
VENTAJAS	INCONVENIENTES
<ul style="list-style-type: none"> • Baja contaminación, actividad biológica, sólidos y oxígeno disuelto, NTU, SDI, etc. • La temperatura varía en un rango bajo a lo largo del año 	<ul style="list-style-type: none"> • Aporta menores caudales • Composición química variable a lo largo del año, con potencial presencia de otros elementos (Al, Fe, Si, Mn...), pesticidas, nitratos...

Tabla 1.2: Captación cerrada. Fuente: Ministerio de Sanidad y Política social (Guía de desalación)

En general, la captación abierta resulta más adecuada para plantas de gran capacidad. La razón por la cual existe una menor contaminación en la captación cerrada radica en la filtración que produce el propio terreno, si bien esto limita la cantidad total de agua que es posible captar y trae como consecuencia ciertos contaminantes adicionales presentes en el terreno. No obstante, mediante un pretratamiento adecuado, tales inconvenientes son solventados.

Para una EDAM de tamaño medio o pequeño, se recomienda captación abierta únicamente en el caso de que la construcción de toma cerrada mediante pozos no

sea posible debido a las características del terreno. Se asumirá en el presente proyecto que no existirán tales inconvenientes (un estudio más detallado del terreno que permita confirmarlo con seguridad se encuentra fuera de su alcance), y por tanto se empleará la toma cerrada mediante pozos.

1.2 Dimensionamiento de los pozos de captación

Tras analizar diversas EDAM de capacidad pequeña o media, se observa que se suelen emplear 2-3 pozos de captación, donde uno de ellos se emplea como reserva, utilizándose para solucionar el problema que acarrearía un funcionamiento inadecuado en alguno de los otros pozos o bombas de captación correspondientes. Para capacidades más grandes, usualmente se requiere un pozo para cada aproximadamente 2000-3000 m³/día de capacidad, si bien esto no es una regla fijada y depende del porcentaje de conversión y cada caso en particular. Para la EDAM del presente proyecto, que requiere 6666 m³/día de caudal de alimentación, se ha decidido usar tres pozos, uno de ellos actuando como reserva. Así, cada pozo asumirá un caudal de captación de 3333 m³/día aproximadamente. Estarán colocados a una distancia de 20 m respecto al colector, situado en un punto central común, como se observa en la figura 1.1:

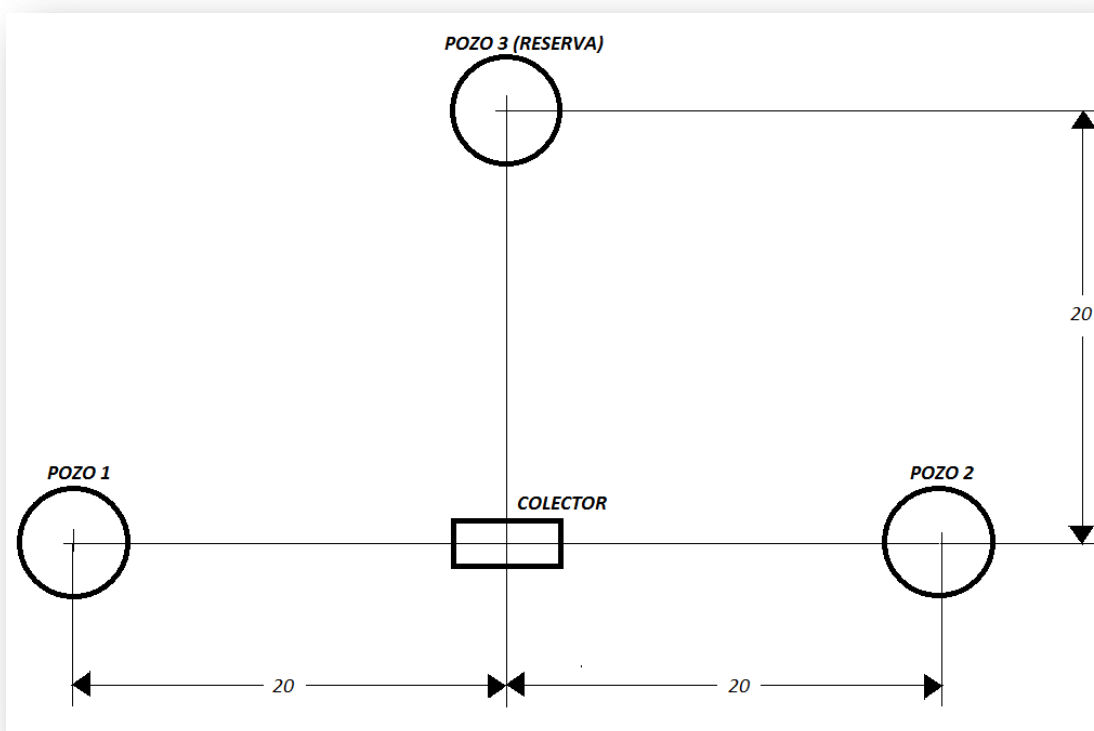


Figura 1.1: Disposición de los pozos de captación. Elaboración propia

La disposición a escala en el interior de la parcela escogida se muestra a continuación (fig. 1.2):



Figura 1.2: Disposición de los pozos de captación en el terreno. Elaboración propia

Mediante la herramienta online 'Goolzoom', que ofrece el perfil longitudinal del terreno en la ubicación, se conoce que la cota máxima máxima a nivel del mar resulta ser más elevada de lo esperado: en torno a 32 m (fig. 1.3).

No se pueden situar más próximos al mar debido a la presencia de un barranco, con grandes variaciones de cota en el perfil longitudinal, además de que estarían fuera de los límites del suelo clasificado como urbanizable, en suelo rústico de protección natural. Y analizando los alrededores, se trata de la mejor opción, al ser el punto más bajo de la zona.

Esta cota podría conllevar ciertas dificultades en la práctica a la hora de ejecutar las obras de perforación, incrementando significativamente los costes. En principio, esto ha motivado una primera tentativa de escoger otra alternativa de ubicación para la EDAM (véase anexo II). Sin embargo, dado el avanzado lugar en el que se encuentra el proyecto en este punto, y que este trabajo debe entenderse como de carácter principalmente académico (pues el proyecto no es ejecutable y tiene un alcance muy limitado), se ha decidido asumir en lo sucesivo que la construcción de los pozos resulta posible y económicamente rentable.

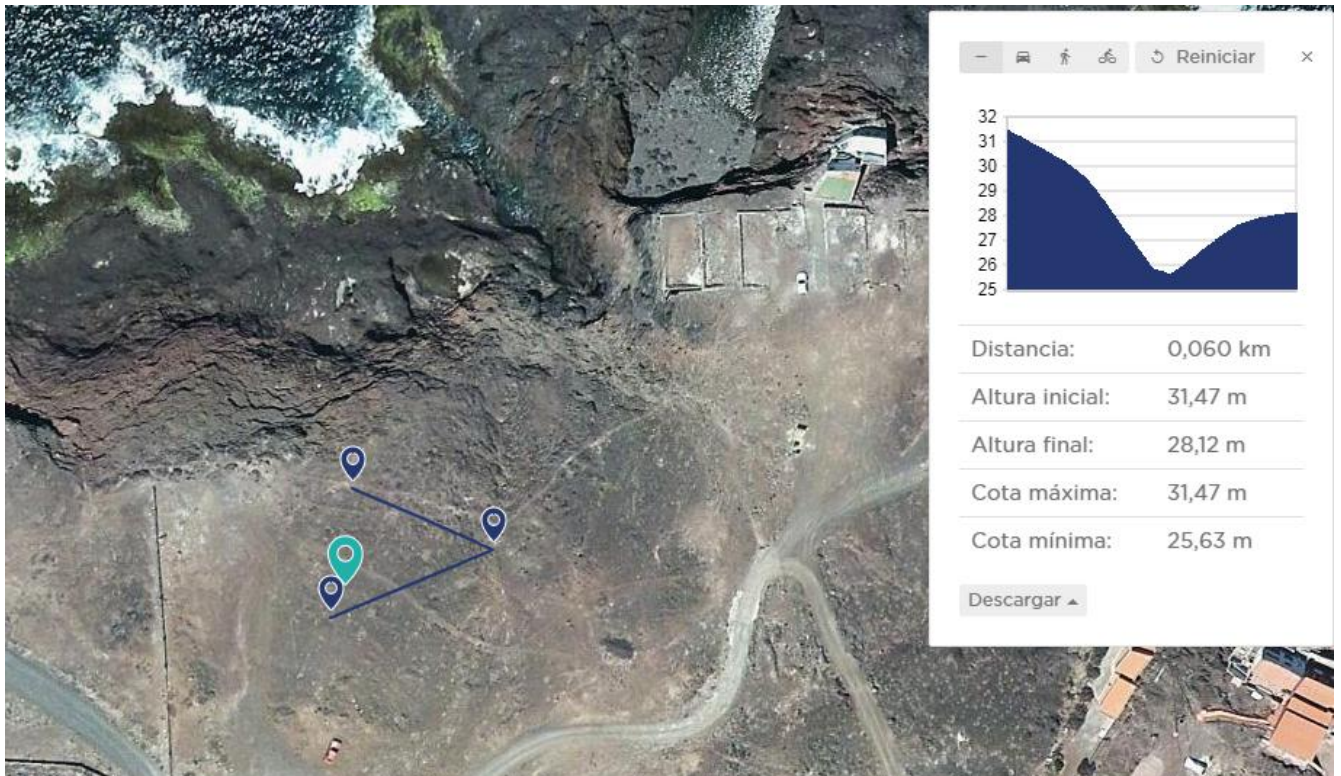


Figura 1.3: Cotas a nivel del mar de los pozos de captación. Fuente: Goolzoom

En cuanto a la bajamar máxima, a partir de un informe REDMAR (Puertos del Estado), se obtienen los datos de la tabla 1.3, medidos en la isla de Gran Canaria y tomando como muestra múltiples años. De esta manera se determina que su valor será 1.46 m:

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

Tabla 1.3: Bajamar máxima en Gran Canaria. Fuente: Informe REDMAR (Puertos del Estado)

A partir de la suma de todos estos valores, podemos conocer la profundidad mínima a la que debe situarse la bomba de captación (35.46 m), que tras establecer un margen de seguridad para tener varios metros de columna de agua que impida su cavitación, asumiremos como 45m. Además, para que la bomba no quede exactamente en el fondo del pozo, la profundidad total de los pozos será de 50m. Se muestra un resumen (tabla 1.4) junto a un esquema aclarativo (fig. 1.4)

Máxima altura sobre el nivel del mar [m]	32
Bajamar máxima [m]	1.46
Pérdidas de altura por filtración del terreno [m]	1
Pérdidas de altura por cono de succión [m]	1
Margen de seguridad para evitar cavitación [m]	11.54
Profundidad a la que debe situarse la bomba [m]	47
Profundidad total del pozo	50

Tabla 1.4: Datos para conocer la profundidad necesaria del pozo. Elaboración propia

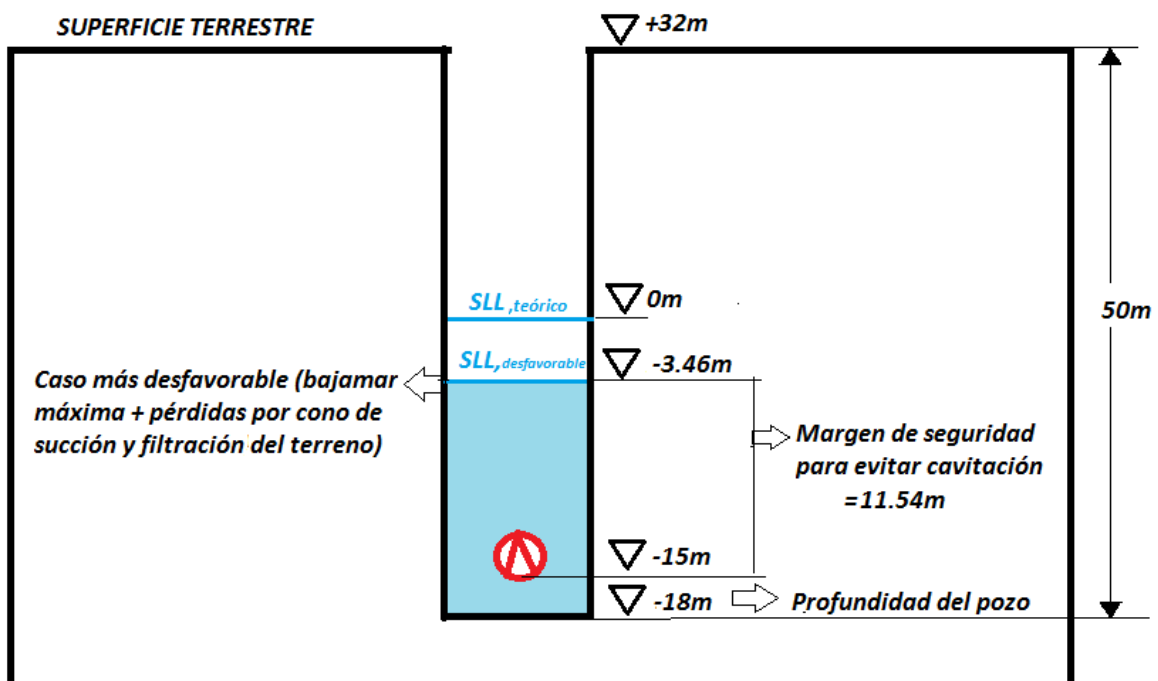


Figura 1.4: Esquema de los factores determinantes para la profundidad del pozo. Elaboración propia

2. Dimensionamiento del sistema de rechazo de salmuera

2.1 Posibles opciones de gestión de la salmuera

El concentrado o salmuera presenta una cantidad de sales muy elevada, y si se vertiera cerca del lugar de captación, además de la perturbación del equilibrio osmótico de los organismos marinos, podría afectar negativamente a la composición del agua de captación, provocando una variación de sus valores respecto a los tomados inicialmente para el dimensionamiento del bastidor de membranas.

Por este motivo, si se vierte de nuevo al mar, se debe optar por alguna de las siguientes opciones:

- Dilución previa en un gran depósito
- Expulsión gradual (dispersión) en un lugar alejado del lugar de la captación (emisario submarino)

Alternativamente al vertido al mar, existen otras alternativas para la gestión de la salmuera, que además permiten su revalorización, y se podrían emplear si en su caso resultaran especialmente rentables. Se menciona, por ejemplo: el vertido cero: consistente en la conversión de la salmuera en agua de alta calidad y en sales cristalizadas en estado sólido que se pueden emplear para obtener productos de diversa índole en función del tipo de sal.

Se ha optado por el vertido y dispersión en el mar mediante un emisario submarino, en tanto que permite ahorrar los costes asociados al bombeo de agua hasta el depósito de disolución de la salmuera, y no se conocen posibles alternativas viables y rentables para la gestión de la salmuera en la zona.

En la práctica, el vertido al mar requeriría realizar un estudio de impacto ambiental, donde se indican todas aquellas medidas en relación a la gestión del vertido de la salmuera, pero esto queda fuera del alcance del presente proyecto

2.2 Dimensionamiento del emisario submarino

Un emisario submarino consiste, básicamente, en una tubería de descarga que cuenta con difusores que van expulsando progresivamente la salmuera a lo largo de toda su longitud, consiguiendo así eficazmente su dilución.

Para su dimensionamiento, debemos conocer:

- La profundidad final bajo el nivel del mar en la que terminará el tramo de tubería de rechazo del emisario submarino
- La longitud de la tubería de rechazo necesaria para garantizar una dispersión de la salmuera adecuada

Para ello hacemos uso de la capa de batimetría del visor online Grafcan. Seleccionando la isobata más cercana, comprobamos que se encuentra a una profundidad de 50 m y a 1,8 km de distancia de la EDAM (fig. 3.1), que tomaremos como longitud mínima de tubería necesaria.

No se aumentará la longitud de la tubería aún más como margen de seguridad, porque la profundidad indicada es más que suficiente para conseguir nuestros objetivos (bastaría meramente con unos 25 m según la bibliografía).



Figura 2.1: Longitud y profundidad necesarias para el emisario submarino. Fuente: Grafcan

3. Dimensionamiento del sistema de distribución

3.1 Dimensionamiento del pozo de regulación

El agua de permeado, tras su paso por la fase de postratamiento, se impulsará hasta un depósito de regulación que se encuentra a una cota más alta que las poblaciones a abastecer. El objetivo es que el agua, a partir de este punto, únicamente necesite de la gravedad para su distribución hasta el usuario final.

Aunque el dimensionamiento de dicho pozo se encuentra fuera del alcance de este proyecto, sí se definirá su localización; con el objetivo de conocer la longitud y diferencia de cota de las tuberías de distribución (en el apartado correspondiente) – lo cual será necesario para el dimensionamiento de la bomba de distribución, indispensable para conocer el consumo de la EDAM en su conjunto.

En cuanto a su localización, lo ideal sería utilizar una infraestructura hidráulica ya existente. Sin embargo, en el Plan Hidrológico de Gran Canaria no se ha encontrado información sobre depósitos reguladores. Por tanto, se buscará una ubicación para su posible construcción, al igual que se hizo para la EDAM y el parque eólico.

En primer lugar, es necesario conocer la cota máxima sobre el nivel del mar de las poblaciones a abastecer (tabla 3.1). Para ello hacemos uso de la herramienta online Goolzoom.

- En Puerto de Sardina (fig. 3.1), tomando múltiples muestras por todo el núcleo urbano, obtenemos que la cota máxima se sitúa en torno a 96m – por lo que tomaremos, por seguridad, 100m.
- En Barrial (fig. 3.2), la cota máxima de todas las muestras realizadas se sitúa en torno a 105m, pero tomaremos 110m como margen de seguridad
- Finalmente, en Gáldar capital (fig. 3.3) se encuentra la mayor cota máxima, 245m (que asumiremos como 250m), siendo así la zona que define la altura mínima que debe superar el depósito de regulación:

Población	Cota máxima [m]
Puerto de Sardina	100
Barrial	110
Gáldar (capital)	250

Tabla 3.1: Cota máxima a la que se sitúan las localidades a abastecer. Fuente: Goolzoom

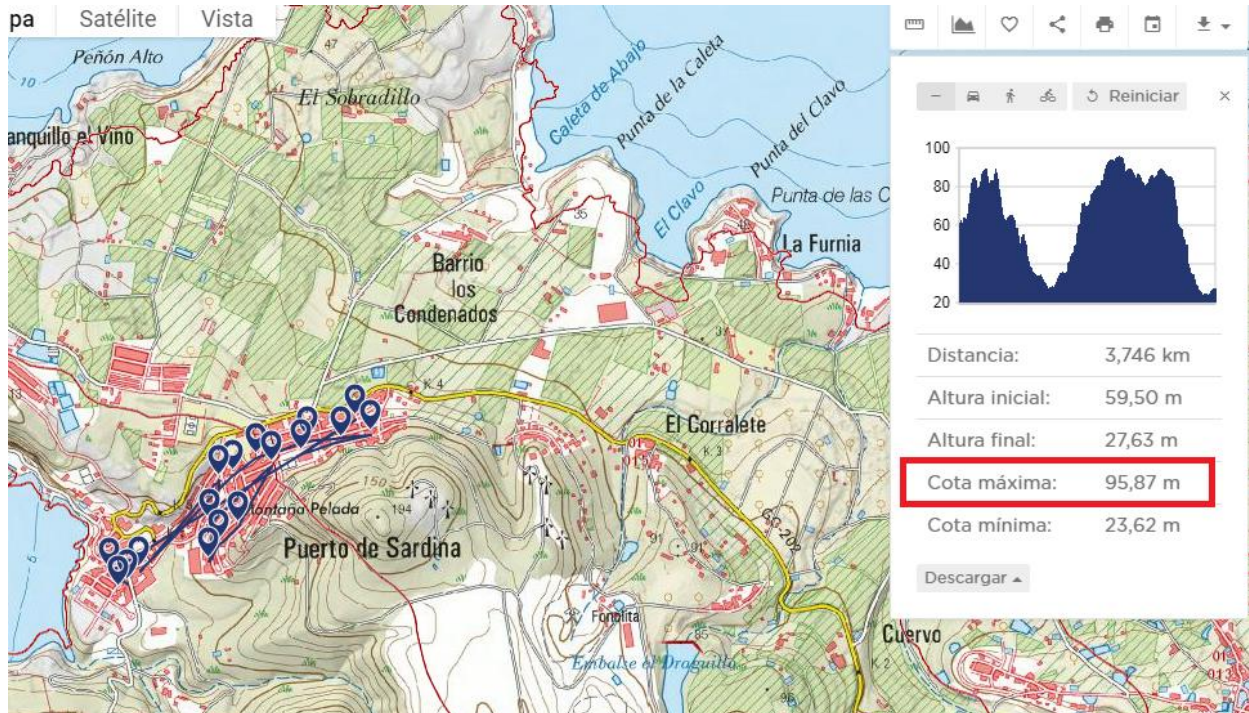


Figura 3.1: Cota máxima en Puerto de Sardina. Fuente: Goolzoom

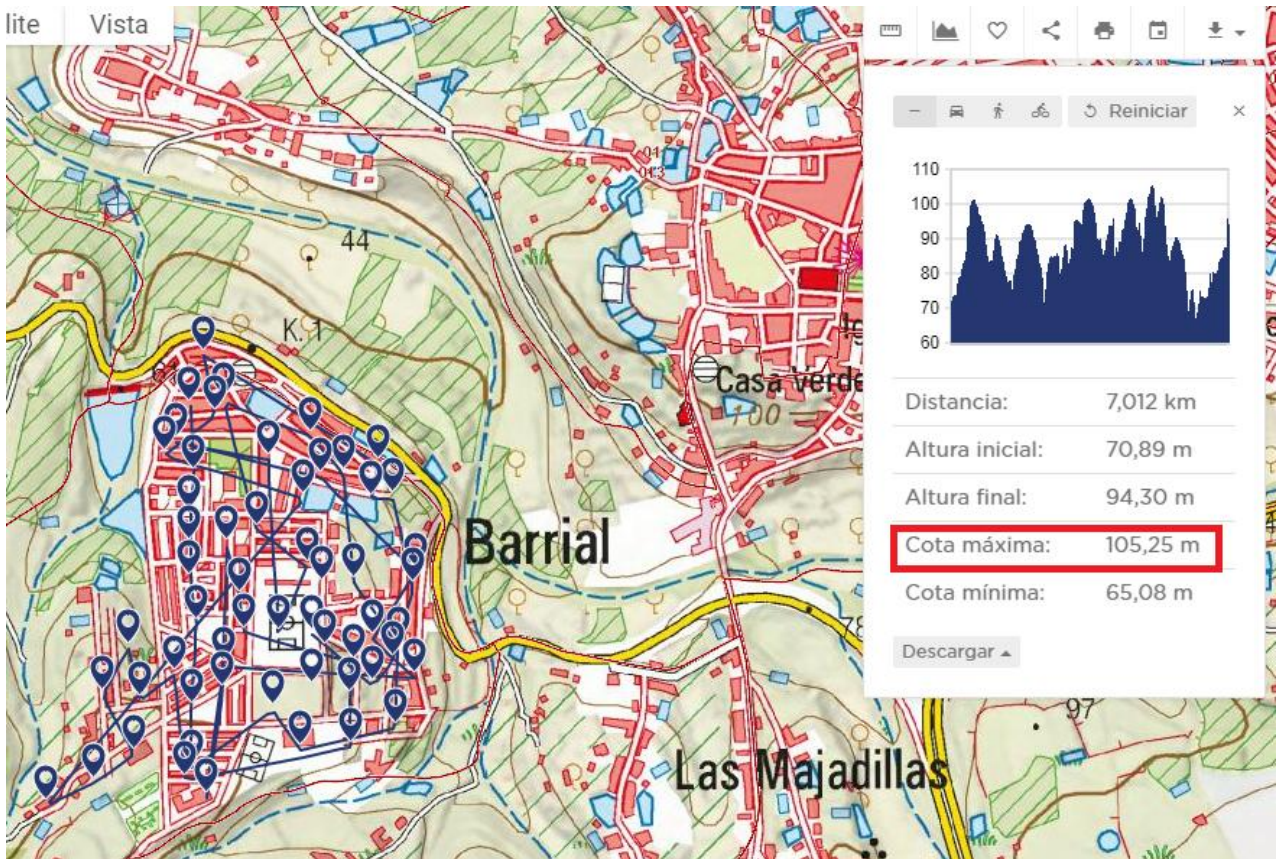


Figura 3.2: Cota máxima en Barrial. Fuente: Goolzoom

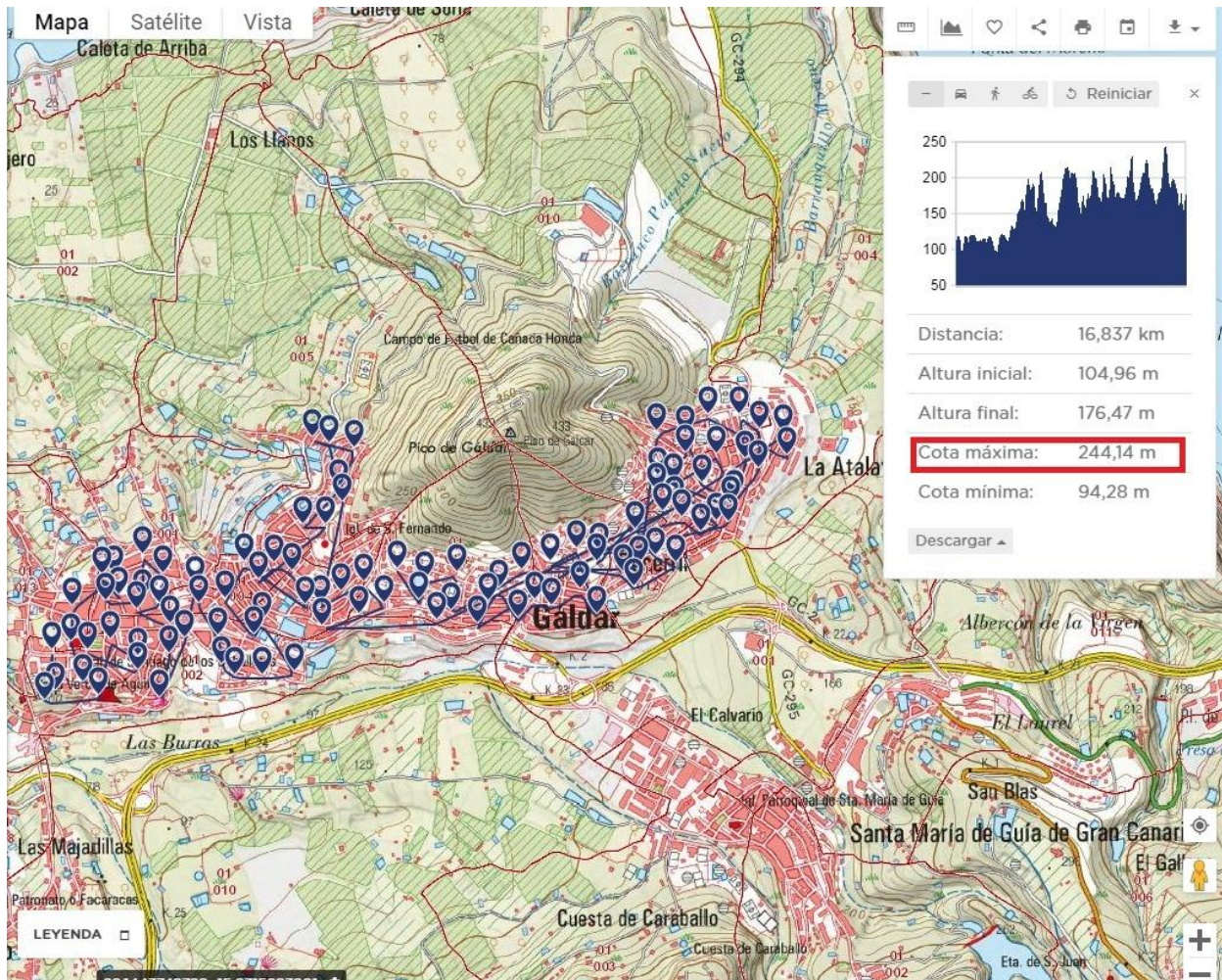


Figura 3.3: Cota máxima en Gáldar capital. Fuente: Goolzoom

Ahora buscamos un lugar para el depósito de regulación que se encuentre a una cota superior a 250m y lo más próximo posible a las poblaciones a abastecer, cumpliendo la condición de que no esté en el interior de un espacio natural protegido e idealmente, que el suelo sea apto para urbanizar.

Se encuentra que el lugar idóneo sería la montaña 'pico de gáldar', que como se puede observar en la representación topográfica y de relieve de la figura 3.4, presenta cotas desde 250m hasta un máximo de 433m (pico). Además, resulta especialmente interesante este lugar al encontrarse muy cercano a Gáldar capital, donde se encuentra la mayor parte de la población a abastecer.

Consultando datos sobre la ordenación del territorio en este lugar, se tiene que la mayor parte se encuentra considerada como 'Suelo Rústico de Protección Natural', pero existe una región considerada como de protección cultural (fig. 3.5).

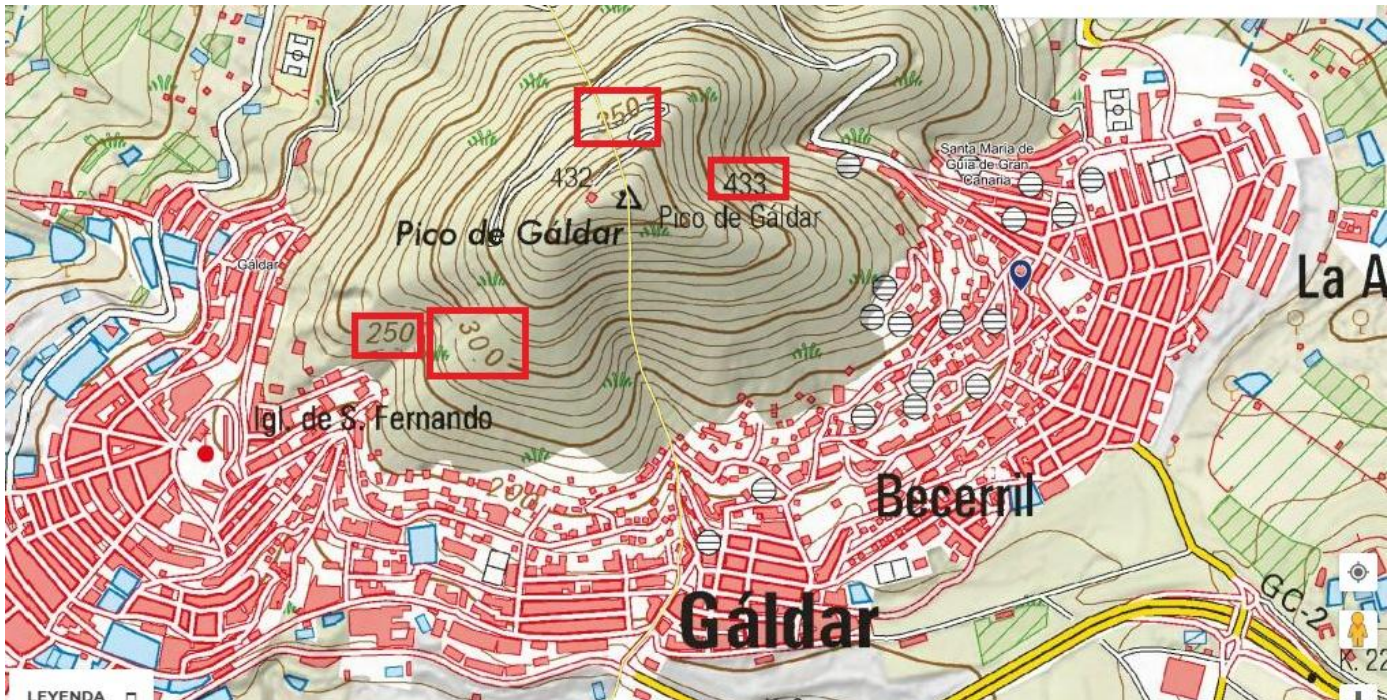


Figura 3.4: Representación topográfica en Pico de Gáldar. Fuente: Goolzoom

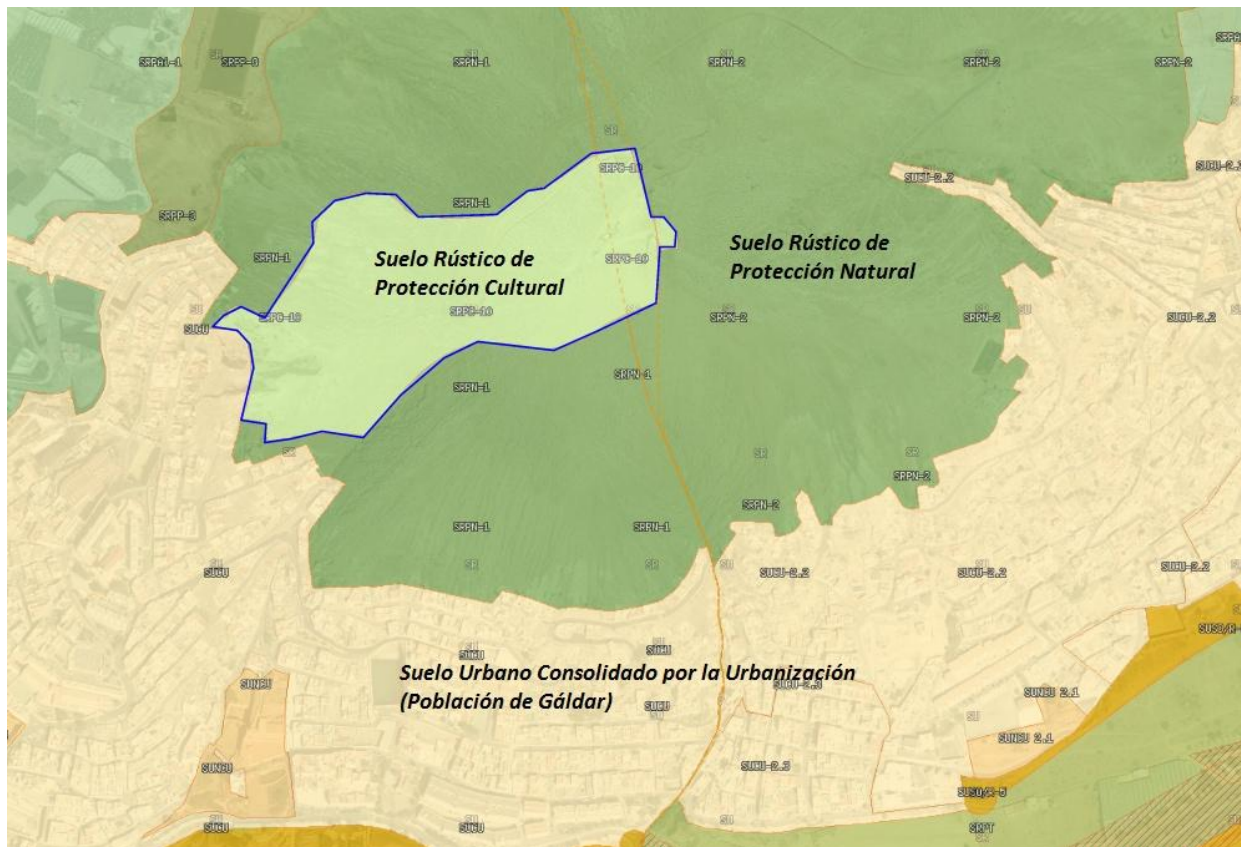


Figura 3.5: Ordenación del territorio en Pico de Gáldar. Fuente: Goolzoom

Si bien lo ideal es encontrar suelo urbanizable, dada la falta de alternativas, se decide ubicar el depósito en esta región de suelo rústico de protección cultural. Un depósito de agua tiene bajo impacto a todos los niveles en la zona, y beneficiará de manera 'limpia' (mediante fuente de energía renovable) a la población circundante, por lo que se supondrá que será posible la obtención de un permiso del ayuntamiento para su construcción en este lugar.

Bajo estas suposiciones, se ubica de manera más precisa y aproximadamente a escala la ubicación exacta del depósito (fig. 3.6):

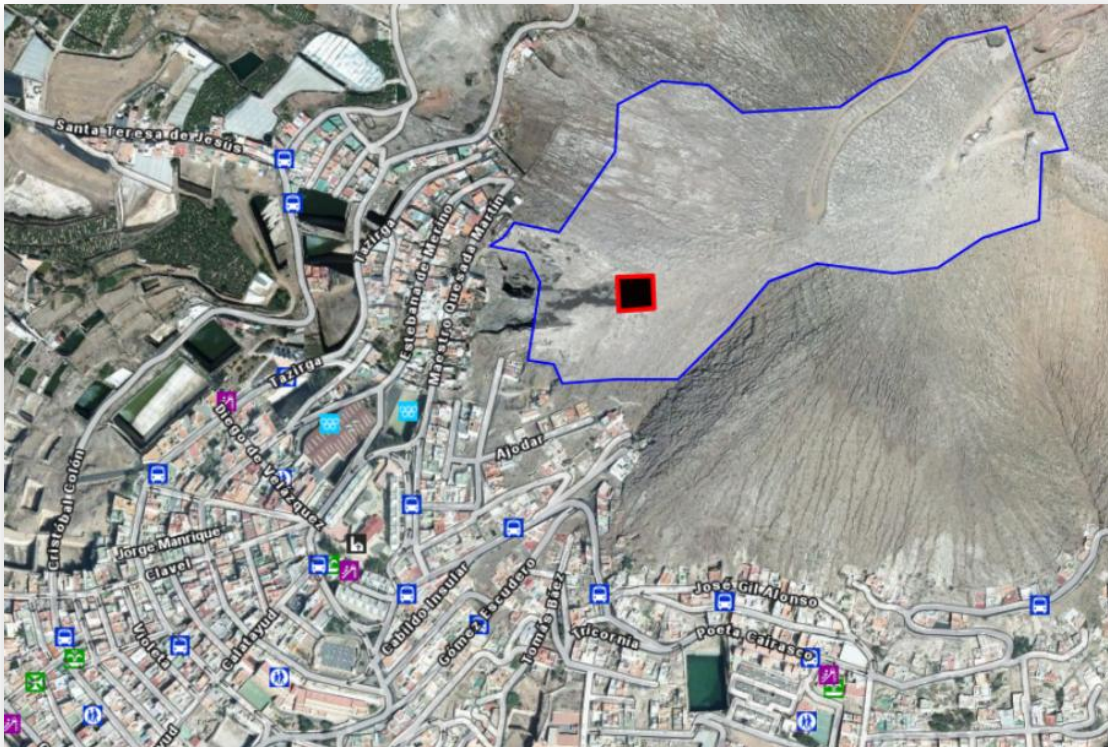


Figura 3.6: Ubicación del depósito de regulación. Fuente: Grafcan

Tras un análisis final del perfil longitudinal del suelo entre este punto y la población de Gáldar (figs. 3.7 y 3.8), se tiene que la cota del depósito respecto al nivel del mar es de 273 m, existiendo así una diferencia de cota de aproximadamente 23 metros respecto a la población de Gáldar (población a mayor altura), suficiente para realizar la distribución de agua por gravedad.

Este lugar se encuentra aproximadamente a 7.5 kilómetros de la EDAM (fig. 3.9), que ampliaremos a 10 km para tener en cuenta posibles irregularidades del terreno y desviaciones de la trayectoria de la tubería para salvar obstáculos. Un trazado más exacto de dicha trayectoria se encuentra fuera del alcance del presente proyecto. Su diferencia de cota, conociendo que la EDAM se encuentra a 25m sobre el nivel del mar, será aproximadamente de 248 m.

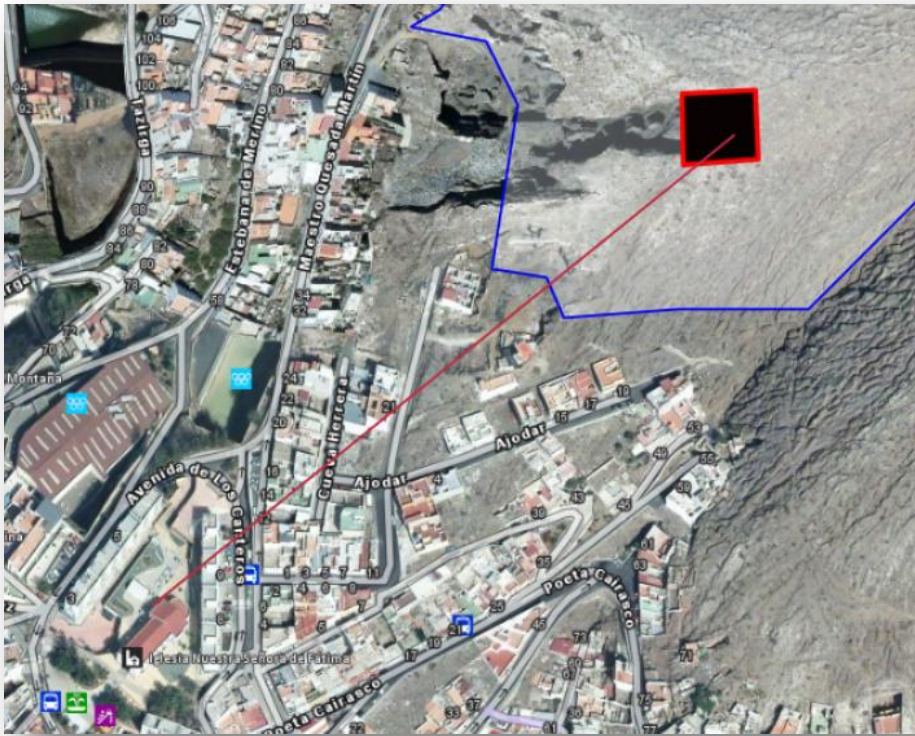


Figura 3.7: Línea sobre la que se elabora el perfil longitudinal. Fuente: Grafcan

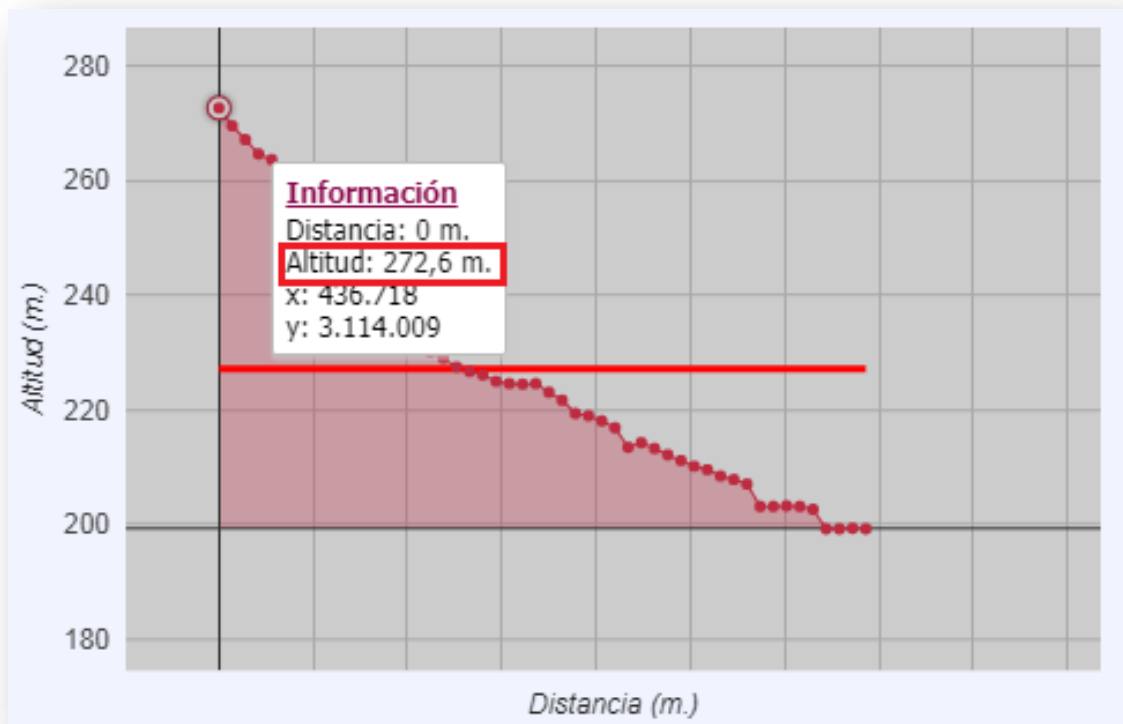


Figura 3.8: Perfil longitudinal entre el depósito de regulación y Gáldar capital. Fuente: Grafcan



Figura 3.9: Distancia aproximada entre el depósito de regulación y la EDAM. Fuente: Grafcan

3.2 Dimensionamiento de las tuberías

Para un completo dimensionamiento de las tuberías se requiere conocer:

- Material de fabricación
- Fabricante y diámetro comercial
- Longitud mínima necesaria

Conocidos estos datos, será posible estimar la pérdida de carga que existirá en las mismas, lo cual será necesario para conocer la altura total que debe vencer la bomba y proceder a su selección entre los diversos fabricantes.

3.2.1 Material y fabricante de las tuberías

Como material, se escoge plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) para todas las tuberías, por sus cualidades de alta resistencia mecánica y a la corrosión, ligereza y superficie interior lisa - todo ello contribuyendo a garantizar un funcionamiento óptimo y la reducción de costes. Se adquirirán del fabricante Flowtite, que tiene una remarcada reputación en este campo, y ofrece los siguientes diámetros comerciales (fig. 3.10):

3.2.2 Diámetro de las tuberías

Para conocer el diámetro comercial que necesitamos primero hay que calcular el diámetro mínimo teórico, lo cual es posible a través del criterio de Bonnet, que relaciona el diámetro de la tubería con su caudal (ec. 3.1). A partir de este valor también se podrá calcular la velocidad (ec. 3.2), que deberá encontrarse dentro de ciertos valores para asegurar un correcto funcionamiento.

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 3.10: Diámetros comerciales disponibles por el fabricante. Fuente: Flowtite

Los caudales correspondientes se pueden obtener de dos maneras: mediante la información que nos proporciona el software de dimensionamiento del bastidor de membranas (LewaPlus), o mediante las ecuaciones correspondientes. Existirá una pequeña diferencia en los resultados obtenidos por ambos métodos, pues el software tiene en cuenta la inclusión del ERD, que provoca que los caudales de alimentación y de concentrado varíen ligeramente respecto a lo teórico. Sin embargo, dicha variación es despreciable (como se verá en el anexo V) y no tiene influencia sobre la selección de un diámetro comercial u otro. Las ecuaciones 3.3 a 3.5 servirán para obtener teóricamente los respectivos caudales.

$$\varnothing_{mín} = 0,835 * Q^{\left(\frac{2}{5}\right)} \quad (3.1)$$

$$Q = S * v = \left(\frac{\pi}{4} \varnothing_{comercial}^2\right) * v \quad (3.2)$$

$$Q_{alimentación} = \frac{Q_{permeado}}{\text{Conversión (en tanto por uno)}} \quad (3.3)$$

$$Q_{concentrado} = Q_{alimentación} - Q_{permeado} \quad (3.4)$$

$$Q_{captación} = \frac{Q_{alimentación}}{N^{\circ} \text{ de sistemas de captación (ej. pozos)}} \quad (3.5)$$

Donde:

$$Q_{permeado} = Q_{distribución} = 3000 \frac{m^3}{día} = 125 \frac{m^3}{h}$$

Los resultados de aplicar las ecuaciones 3.3 a 3.5 se muestran en la tabla 3.2, (expresados en las unidades más frecuentes). Los resultados de aplicar la ecuación 3.1 se encuentran en la tabla 3.3. A partir de la ecuación 3.2 podemos conocer la velocidad de los principales flujos, lo cual será útil a posteriori para el

cálculo de la altura útil de las bombas (anexo V). Los resultados se muestran en la tabla 3.4.

Tubería	Q [m³/día]	Q [m³/h]	Q [m³/s]
Captación (pozo 1)	3333	139	0,039
Captación (pozo 2)	3333	139	0,039
Captación (pozo 3)	3333	139	0,039
Alimentación	6667	278	0,077
Distribución	3000	125	0,035
Rechazo	3667	153	0,042

Tabla 3.2: Caudales de los principales sistemas de la instalación. Elaboración propia

Tubería	Caudal [m³/s]	Ø_{mín} [mm]	Ø_{comercial} [mm]
Captación (pozo 1)	0,039	227	250
Captación (pozo 2)	0,039	227	250
Captación (pozo 3)	0,039	227	250
Alimentación	0,077	300	350
Distribución	0,035	218	250
Rechazo	0,042	236	250

Tabla 3.3: Diámetro teórico y comercial de las tuberías. Elaboración propia

Caudal	v [m/s]
Captación	0,786
Alimentación	0,802
Permeado	0,707
Rechazo	0,865

Tabla 3.4: Velocidad de los principales flujos. Elaboración propia

3.2.3 Longitud mínima de las tuberías

A continuación se obtendrá la longitud de las tuberías:

- En cuanto a las tuberías de captación, la longitud total será equivalente para los tres pozos, dada su simetría:

$$L_{\text{captación}} = \Delta Z_{\text{captación}} + \Delta X_{\text{pozo-captación}} \quad (3.6)$$

Donde: $\Delta Z_{\text{captación}}$ = profundidad de la bomba de captación = 47 m; $\Delta X_{\text{pozo-captación}}$ = distancia desde el pozo al colector = 20 m

Así, se tiene que: $L_{\text{captación}} = 67$ m

- En cuanto a la tubería de alimentación, como se puede observar en la figura 3.11, no existen obstáculos importantes a esquivar y por tanto se trazará en línea recta (trayectoria más corta), presentando una longitud de 200 m (asumiendo cierto margen de seguridad respecto a la entrada de la EDAM).
- En cuanto a las tuberías de distribución, conocemos la distancia desde la EDAM hasta el depósito de distribución -véase figura 3.9-, y por tanto la longitud de la tubería se corresponderá con esta distancia tras asumir un cierto margen de seguridad, que habíamos considerado como 10.000 m.
- Finalmente, en cuanto a la tubería de rechazo de salmuera, según se puede comprobar en la figura 2.1, su longitud será aproximadamente la distancia desde la EDAM a la isóbata: 1.800 m. En el caso real será mayor a esto dada la distancia vertical que tiene que cubrir en diagonal hasta alcanzar la profundidad de 50 m bajo el nivel del mar, pero la aproximación es aceptable, ya que basta que llegue a la mitad de la profundidad deseada (25m), tal y como se indicó previamente en el apartado 2.2

Se muestra un resumen del dimensionado de las tuberías en la tabla 3.5.

Tubería	Material	Fabricante	Ø comercial [mm]	Longitud [m]
Captación (pozo 1)	PRFV	Flowtite	250	67
Captación (pozo 2)	PRFV	Flowtite	250	67
Captación (pozo 3)	PRFV	Flowtite	250	67
Alimentación	PRFV	Flowtite	350	200
Distribución	PRFV	Flowtite	250	10000
Rechazo	PRFV	Flowtite	250	1800

Tabla 3.5: Dimensionado final de las tuberías. Elaboración propia

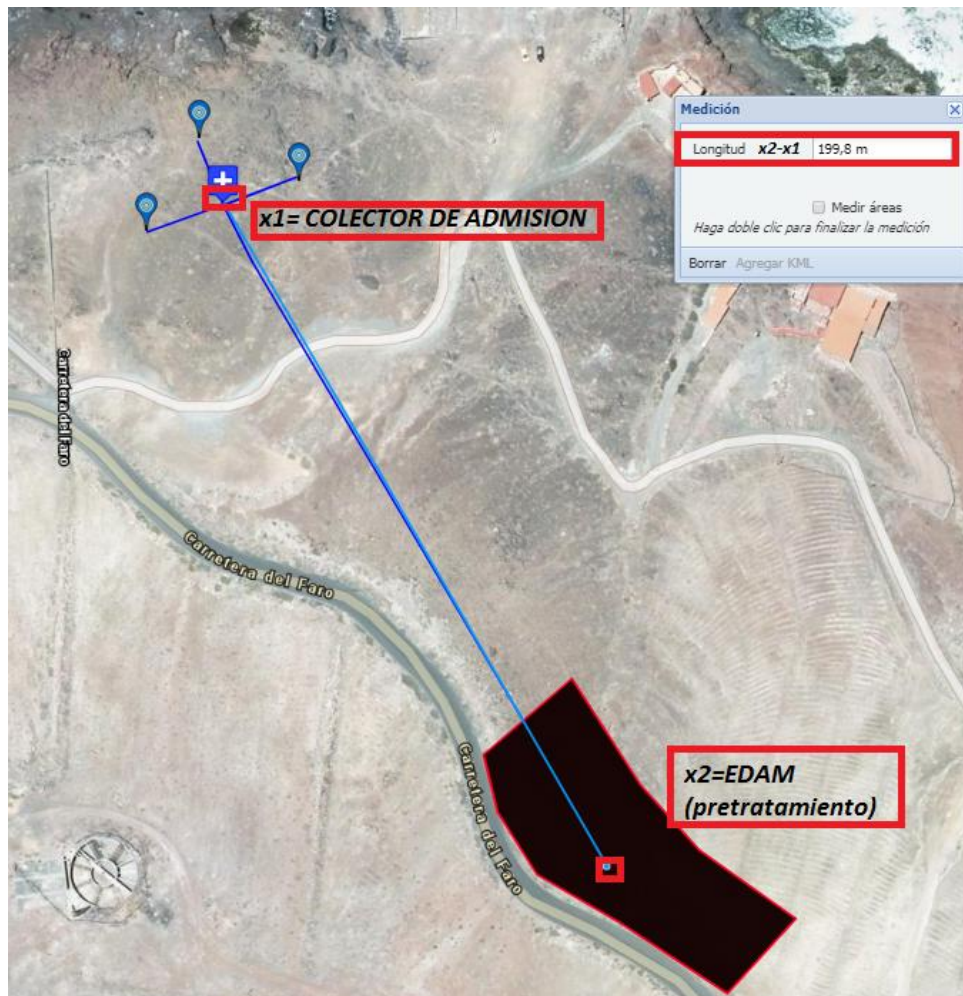


Figura 3.11: Distancia colector de admisión a EDAM. Fuente: Grafcan

3.2.5 Cálculo de pérdidas de carga en tuberías

Como paso previo al dimensionamiento de las bombas, también es necesario conocer la pérdida de carga que se produce en las tuberías.

La pérdida de carga total que se produce a lo largo de una tubería, se corresponde con la suma de la pérdida de carga que sufre el fluido a su paso por la tubería en sí (pérdidas primarias), y la producida en cada uno de los accesorios (codos, válvulas, empalmes, etc.), también conocido como pérdidas secundarias.

$$\Sigma Hr = Hr_{primarias} + Hr_{secundarias} \quad (3.7)$$

Esta última se puede estimar como un 3-20% de la pérdida de carga primaria en las tuberías, y será lo que haremos ante la falta de datos concretos del trazado de las tuberías y por tanto los accesorios que deben instalarse. Será tanto más cercano al valor 20% cuanto mayor 'densidad de accesorios' exista en el tramo, o cuanto más corto sea éste. Así, se ha estimado un 20% de pérdidas secundarias

respecto a las primarias para la distribución, un 10% para el rechazo y un 3% para los tramos de captación y alimentación.

Las pérdidas de carga primarias en las tuberías, por su parte, se puede calcular a partir de la ecuación de Darcy Weisbach:

$$Hr_{primarias} = \frac{f * L * v^2}{2 * \emptyset * g} \quad (3.8)$$

Donde: f, factor de fricción.

L, longitud de la tubería

v, velocidad del fluido en la tubería

\emptyset , diámetro de la tubería

g, aceleración de la gravedad = 9.81 m/s²

La expresión necesaria para el cálculo del factor de fricción depende del régimen del fluido, que se puede conocer a través del número de Reynolds (Re).

Desde un punto de vista matemático, el número de Reynolds es un parámetro adimensional que indica la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosidad (o fricción) en el interior de un fluido. Para una tubería de sección circular, se expresa como:

$$Re = \frac{v * \emptyset}{\vartheta (fluido, T)} = \frac{4 * Q}{\pi * \emptyset * \vartheta (fluido, T)} \quad (3.9)$$

Sabemos que:

- Si $Re < 2000 \rightarrow$ Régimen laminar
- Si $3000 < Re < 4000 \rightarrow$ Régimen mixto
- Si $Re > 4000 \rightarrow$ Régimen turbulento

Así, a modo de ejemplo, si Re tomara el valor de 50 000, indicaría que el régimen es turbulento: en este caso, las fuerzas de viscosidad (ϑ) son despreciables frente a las fuerzas de inercia ($v * D$). Por el contrario, si Re fuera 1800, el régimen sería laminar, indicando que las fuerzas de inercia son despreciables frente a las fuerzas de viscosidad.

Para el cálculo del número de Reynolds, el único factor que desconocemos es el correspondiente a la velocidad cinemática del agua, que depende directamente del fluido temperatura. Para todos los casos, supondremos que la temperatura del agua coincide con la de captación, y las variaciones en la misma resultan despreciables. Entonces, tomando como valor fijo $T=21^{\circ} C$ y suponiendo que no exista variación con la salinidad (o dicho de otro modo, despreciando la variación

en las propiedades que suponga la variación de salinidad), obtenemos la viscosidad cinemática.

Para ello recurrimos a valores tabulados de las propiedades del agua saturada, e interpolamos el valor de la viscosidad cinemática del agua entre 20 y 25° C. Así, obtenemos: $\nu(\text{agua}, 21^\circ\text{C}) = 0,9819 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 0,9819 \text{ mm}^2/\text{s}$

Sustituyendo los datos que conocemos en la ecuación 3.9 tenemos los resultados de la tabla 3.6:

Tuberías	Q [m ³ /s]	Ø [m]	v [m ² /s]	Re [adim]	Condición	Régimen
Captación	0,038580247	0,25	0,0000009819	200109.5672	Re > 4000	Turbulento
Alimentación	0,077160494	0,35	0,0000009819	285870.8103	Re > 4000	Turbulento
Distribución	0,034722222	0,25	0,0000009819	180098.6105	Re > 4000	Turbulento
Rechazo	0,042438272	0,25	0,0000009819	220120.524	Re > 4000	Turbulento

Tabla 3.6: Cálculo del número de Reynolds. Elaboración propia

Para régimen turbulento, la ecuación necesaria a aplicar para conocer el factor de fricción es la de Colebrook:

$$f_{n+1}^{-1/2} = -2 * \log\left[\frac{\frac{k(\text{material})}{\phi}}{3,75} + \frac{2,51}{Re * f_n^2}\right] \quad (3.10)$$

El valor de rugosidad de la tubería, k, depende únicamente del material y lo obtenemos directamente del fabricante: k(PRFV) = 0,029mm

El factor f_n representa un primer valor tentativo para el factor de fricción, que típicamente suele tomarse como 0,015. Al resolver la ecuación, obtenemos un valor iterado del factor de fricción, f_{n+1} que deberá reintroducirse en la ecuación como nuevo valor tentativa hasta que se cumpla que el valor iterado prácticamente coincida con el tentativo.

Consideraremos que se cumple esto último cuando exista menos de un 0,01% de variación entre el valor tentativo y el iterado:

$$\frac{f_{n+1} - f_n}{f_{n+1}} < 0,0001 \quad (3.11)$$

Así, sustituyendo los valores de la tabla 3.7 en las expresiones 3.10 y 3.11, se tienen los resultados de las tablas 3.7 a 3.12:

	k (PRFV) [mm]	Ø[mm]	Re
Captación	0,029	250	200293,154
Alimentación	0,029	350	286133,0771
Distribución	0,029	250	180263,8386
Rechazo	0,029	250	220322,4694

Tabla 3.7: Valores de los parámetros a introducir en la ecuación de Colebrook. Elaboración propia

	f₀	f₁	f₁-f₀ / f₁ [%]
Captación	0,015	0,016646567	10%
Alimentación	0,015	0,015407224	3%
Distribución	0,015	0,016956296	12%
Rechazo	0,015	0,016379831	8%

Tabla 3.8: Resultados de la primera iteración para el cálculo del factor de fricción. Elaboración propia

	f₁	f₂	f₂-f₁ / f₁ [%]
Captación	0,016646567	0,016499266	-0,89%
Alimentación	0,015407224	0,015373329	-0,22%
Distribución	0,016956296	0,016774183	-1,09%
Rechazo	0,016379831	0,016260899	-0,73%

Tabla 3.9: Resultados de la segunda iteración para el cálculo del factor de fricción. Elaboración propia

	f₂	f₃	f₃-f₂ / f₂ [%]
Captación	0,016499266	0,016511689	0,08%
Alimentación	0,015373329	0,015376107	0,02%
Distribución	0,016774183	0,016790008	0,09%
Rechazo	0,016260899	0,016270648	0,06%

Tabla 3.10: Resultados de la tercera iteración para el cálculo del factor de fricción. Elaboración propia

	f_3	f_4	$f_4 - f_3 / f_3$ [%]
Captación	0,016511689	0,016510636	-0,01%
Alimentación	0,015376107	0,015375879	0,00%
Distribución	0,016790008	0,016788625	-0,01%
Rechazo	0,016270648	0,016269846	0,00%

Tabla 3.11: Resultados de la cuarta iteración para el cálculo del factor de fricción. Elaboración propia

	f_4	f_5	$f_5 - f_4 / f_4$ [%]
Captación	0,016510636	0,016510725	0,00%
Alimentación	0,015375879	0,015375898	0,00%
Distribución	0,016788625	0,016788746	0,00%
Rechazo	0,016269846	0,016269912	0,00%

Tabla 3.12: Resultados de la quinta iteración para el cálculo del factor de fricción. Elaboración propia

Sustituyendo los valores de las tablas 3.12, 3.4 y 3.5 en las ecuaciones 3.7 y 3.8 se obtienen las pérdidas de carga totales (tabla 3.13). Se recuerda que las pérdidas secundarias se han obtenido como un porcentaje de las primarias, ante la imposibilidad de conocer el trazado exacto de las tuberías en el terreno y con ello, los correspondientes accesorios necesarios. Se considera, no obstante, que la aproximación realizada se acerca al valor real.

	$H_{r_{prim}}$ [m]	$H_{r_{sec}}$ [% respecto prim]	$H_{r_{total}}$ [m]
Captación	0.14	20%	0.17
Alimentación	0.29	20%	0.35
Distribución	17.11	3%	17.62
Rechazo	4.47	10%	4.91

Tabla 3.13: Obtención de las pérdidas de carga primarias y secundarias. Elaboración propia



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

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO V:

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE BOMBEO

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

**DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA
ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES**

Autor: Alexander Hernández García

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Índice de contenido

1. Introducción	1
2. Obtención del caudal a impulsar	2
3. Cálculo de la altura útil	4
3.1 Ecuación de Bernoulli	4
3.1.1 Principales cotas, velocidades y pérdidas de carga.....	5
3.2 Bomba de alimentación:	7
3.3 Bomba de alta presión:	8
3.4 Bomba Booster	9
3.5 Bomba de distribución	10
3.6 Bomba de postratamiento.....	10
3.7 Bomba de rechazo	11
3.8 Resultados y conclusiones.....	12
4. Cálculo de la altura neta de aspiración disponible (NPSHd)14	
4.1 Ecuación aplicada.....	14
4.2 Bomba de alimentación.....	16
4.3 Bomba de alta presión	16
4.4 Bomba de distribución	17
4.5 Bomba Booster	17
4.6 Bomba de postratamiento.....	18
4.7 Resultados finales y conclusión	18

Índice de figuras

Figura 1.1: Esquema simplificado del sistema de bombeo. Elaboración propia	1
Figura 2.1: Caudales del sistema de bombeo. Fuente: LewaPlus	3

Figura 2.2: Esquema simplificado con los caudales del sistema de bombeo. Elaboración propia	3
Figura 3.1: Cota respecto al nivel del mar de los pozos y el colector. Elaboración propia	6
Figura 3.2: Cotas mínimas y máximas en la zona donde se ubicará la EDAM. Fuente: Grafcan.....	6
Figura 3.3: Esquema para la presión final de alimentación. Elaboración propia	7
Figura 3.4: Presión del agua de aporte. Fuente: LewaPlus	8
Figura 3.5: Presión entrada a la bomba booster. Fuente: LewaPlus	9
Figura 3.6: Presión entrada a la hipotética bomba de rechazo. Fuente: LewaPlus	11
Figura 4.1: Valor tabulado de la presión de saturación del agua. Fuente: Moran Saphiro	14

Índice de tablas

Tabla 1.1: Parámetros objetivo a calcular para el dimensionamiento. Elaboración propia	2
Tabla 2.1: Caudales del sistema de bombeo. Elaboración propia	2
Tabla 3.1: Velocidad de circulación de los principales caudales. Elaboración propia.....	5
Tabla 3.2: Obtención de las pérdidas de carga primarias y secundarias. Elaboración propia	5
Tabla 3.3: Principales cotas respecto al nivel del mar. Elaboración propia	6
Tabla 3.4: Valores a introducir en la ecuación de Bernoulli para cada bomba. Elaboración propia	12
Tabla 3.5: Resultados de las principales alturas para cada bomba. Elaboración propia.....	12
Tabla 3.6: Proporción porcentual de las alturas para cada bomba. Elaboración propia.....	12
Tabla 3.7: Caudal y altura útil de las bombas. Elaboración propia	13
Tabla 4.1: Valores de presión relativa, absoluta y NPSHd estimado. Elaboración propia	15

Tabla 4.2: Cálculo de NPSHd. Elaboración propia 18

Tabla 4.3: Comparación entre NPSHd calculado y estimado. Elaboración propia..... 19

Tabla 4.4: Datos necesarios para el dimensionamiento de las bombas. Elaboración propia 19

1. Introducción

En principio, se requieren un total de 6 bombas para una EDAM de este tipo:

- **Bombas de alimentación:** encargada de transportar el caudal de captación desde los pozos de captación hasta la instalación del bastidor de membranas. Habrá una bomba por cada pozo de captación.
- **Bomba de alta presión:** encargada de transportar el caudal de permeado y vencer la presión osmótica en el bastidor de membranas para la conversión prefijada
- **Bomba de distribución:** encargada de transportar el caudal de permeado desde el núcleo de membranas hasta el depósito de regulación (lugar desde el cual se transportará el agua a los hogares mediante gravedad)
- **Bomba booster:** se encarga de igualar la presión de una fracción del caudal de alimentación a la salida del dispositivo de recuperación de energía con la presión a la salida de la bomba de alta presión.
- **Bomba de postratamiento:** encargada de suministrar la diferencia de presión necesaria para que el caudal de permeado (que sale a presión atmosférica) pase a través del descarbonatador.
- **Bomba de rechazo:** encargada de transportar la salmuera hasta un lugar lo suficientemente alejado del agua de captación en el mar (emisario submarino). Normalmente, debido a la diferencia de cota entre la EDAM y el fondo marino, y a la presión que trae ya de por sí el concentrado, no resulta necesaria.

Se muestra a continuación (fig. 1.1) un esquema simplificado para facilitar la comprensión de la función y disposición de cada bomba. Se ha omitido la bomba de rechazo al considerarse en principio innecesaria, si bien esto se comprobará y demostrará a posteriori:

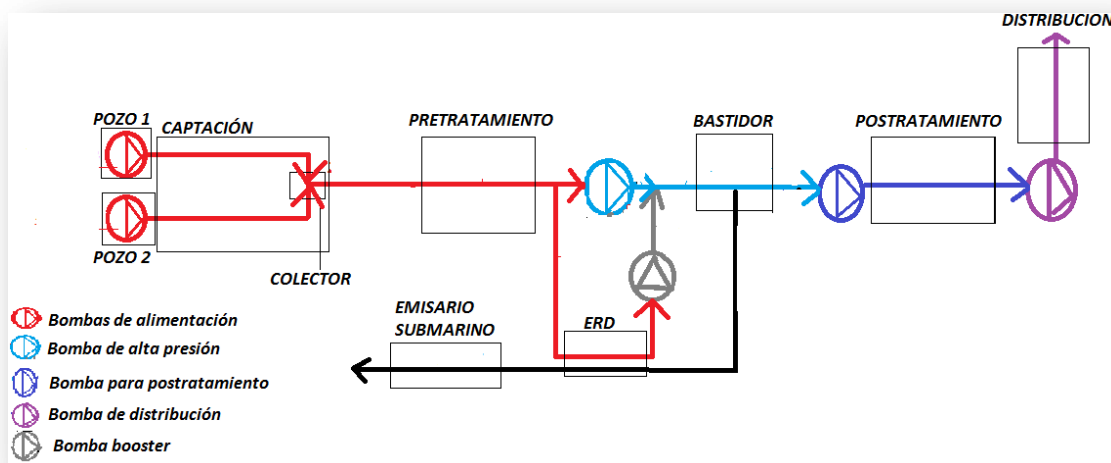


Figura 1.1: Esquema simplificado del sistema de bombeo. Elaboración propia

En este anexo se procederá a obtener tres parámetros básicos necesarios para el dimensionamiento: el caudal a impulsar, la altura útil a vencer (H_b , que obtendremos mediante un balance energético) y la altura neta de aspiración disponible (NPSH_d), que nos permitirá verificar que no se produzca el fenómeno de cavitación. En esencia, entonces, el objetivo consistirá en rellenar la tabla 1.1

	Q [m ³ /h]	H _b [m]	NPSH _d [m]
Bombas de alimentación	-	-	-
Bomba de alta presión	-	-	-
Bomba de postratamiento	-	-	-
Bomba de distribución	-	-	-
Bomba booster	-	-	-
Bomba de rechazo	-	-	-

Tabla 1.1: Parámetros objetivo a calcular para el dimensionamiento. Elaboración propia

2. Obtención del caudal a impulsar

El caudal exacto que debe impulsar cada bomba se obtiene de LewaPlus (fig. 2.1). Debe tenerse en cuenta que el caudal del agua de aporte, o caudal de alimentación, debe dividirse en dos, puesto que se supone que se extraerá una cantidad equivalente en cada pozo por medio de dos bombas. En cuanto al caudal de la bomba de alta presión, éste se refiere al punto previo de unión de caudales entre alimentación y booster, como se muestra en la figura 1.2. Aproximando al siguiente valor entero para asumir la situación más desfavorable, se obtienen los valores de la tabla 2.1:

	Q [m ³ /h]	H _b [m]	NPSH _d [m]
Bombas de alimentación	139	-	-
Bomba de alta presión	128	-	-
Bomba de postratamiento	125	-	-
Bomba de distribución	125	-	-
Bomba booster	151	-	-
Bomba de rechazo	153	-	-

Tabla 2.1: Caudales del sistema de bombeo. Elaboración propia

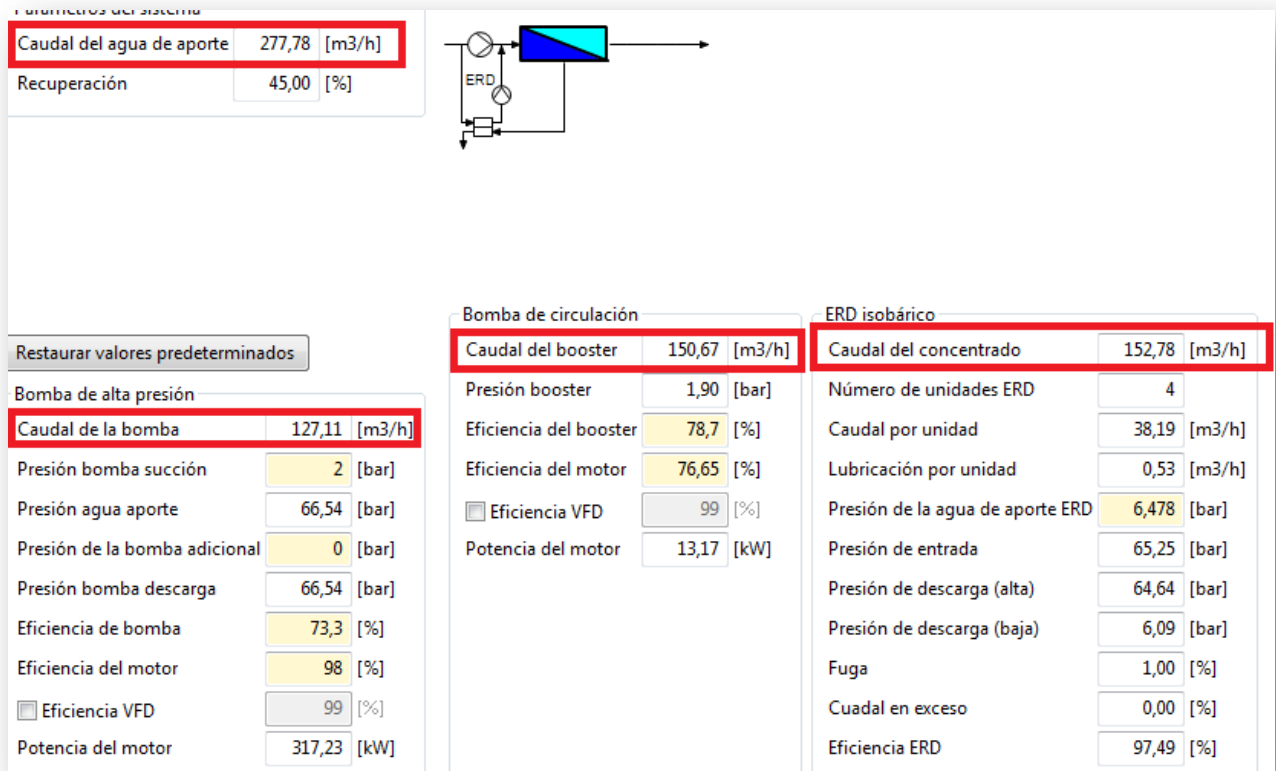


Figura 2.1: Caudales del sistema de bombeo. Fuente: LewaPlus

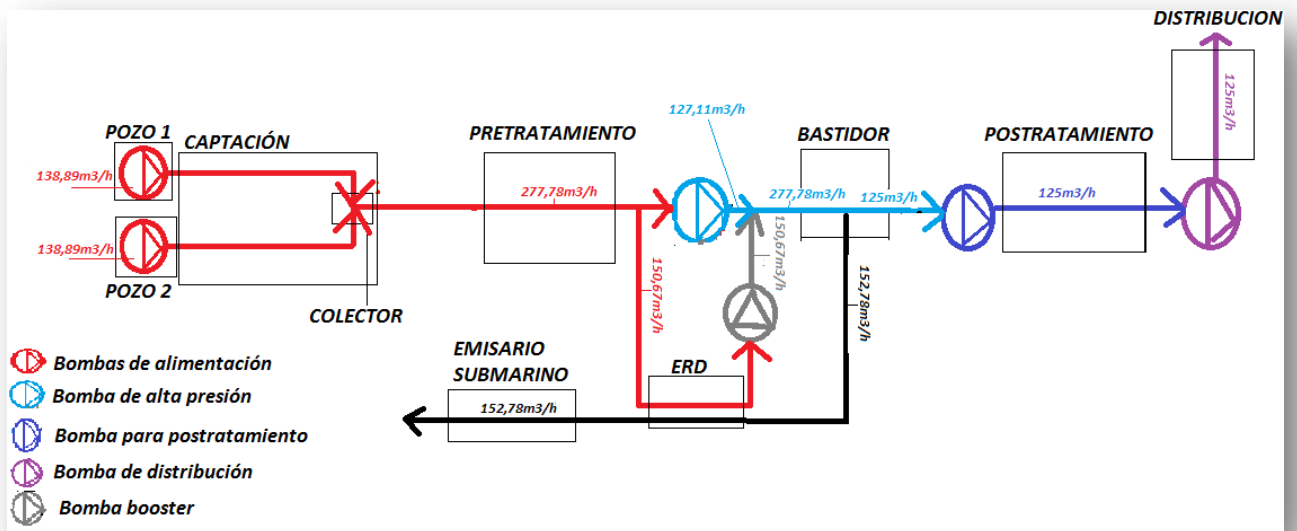


Figura 2.2: Esquema simplificado con los caudales del sistema de bombeo. Elaboración propia

3. Cálculo de la altura útil

3.1 Ecuación de Bernoulli

La altura útil o manométrica que tiene que vencer una bomba se puede calcular a partir de la suma de la altura de cota, cinética y de presión que tiene que vencer la bomba, y añadiendo las pérdidas de carga. En conjunto, esta expresión se muestra a continuación (ec. 3.1):

$$H_B = H_{cota} + H_{cinética} + H_{presión} + \Sigma Hr \quad (3.1)$$

Donde, tomando como subíndices 'f' para indicar el punto final e 'i' para indicar el punto inicial, y asumiendo régimen estacionario y una temperatura constante del agua a 21°C, se tiene (ecs. 3.2 a 3.4):

$$H_{cota} [m] = z_f [m] - z_i [m] \quad (3.2)$$

$$H_{cinética} [m] = \frac{(v_f^2 - v_i^2)}{2 * g} = \frac{\left(v_f^2 \left[\frac{m}{s} \right] - v_i^2 \left[\frac{m}{s} \right] \right)}{19,62} \quad (3.3)$$

$$H_{presión} [m] = \frac{(p_f - p_i)}{\gamma [agua]} \sim \frac{(p_f [Pa] - p_i [Pa])}{\frac{1000 \text{ kg}}{m^3} * 9,81 \text{ m/s}^2} = \frac{(p_f [Pa] - p_i [Pa])}{9810} \quad (3.4)$$

Nótese que se ha tomado la aproximación de que la densidad del agua se encuentra en torno a 1000 kg/m³, sin tener en cuenta la pequeña variación que se produce debido a la desviación de su temperatura y salinidad respecto a condiciones estándar a lo largo del proceso.

Esta aproximación se ha tomado como válida por dos motivos:

- La influencia que tiene en el dimensionamiento y selección final de las bombas es despreciable
- Dado el limitado alcance de este proyecto, se han tenido que realizar diversas simplificaciones con el objeto de reducir la complejidad que tiene una EDAM real. Por lo tanto, no tiene sentido refinar el cálculo para un dimensionamiento que parte de modelos tan simplificados.

Así, la altura útil o total se puede expresar como (ec. 3.5):

$$H_B = (z_f [m] - z_i [m]) + \frac{\left(v_f^2 \left[\frac{m}{s} \right] - v_i^2 \left[\frac{m}{s} \right] \right)}{19,62} + \frac{(p_f [Pa] - p_i [Pa])}{9810} + \Sigma Hr [m] \quad (3.5)$$

3.1.1 Principales cotas, velocidades y pérdidas de carga

Se recuerda la velocidad (*tabla 3.1*) de los principales caudales, así como las pérdidas de carga (*tabla 3.2*), todo ello determinado en el anexo IV:

Caudal	v [m/s]
Captación	0,786
Alimentación	0,802
Permeado	0,707
Rechazo	0,865

Tabla 3.1: Velocidad de circulación de los principales caudales. Elaboración propia

	Hr_{prim} [m]	Hr_{sec} [% respecto prim]	Hr total [m]
Captación	0.14	20%	0.17
Alimentación	0.29	20%	0.35
Distribución	17.11	3%	17.62
Rechazo	4.47	10%	4.91

Tabla 3.2: Obtención de las pérdidas de carga primarias y secundarias. Elaboración propia

De cara al dimensionamiento de las bombas, resulta necesario conocer las cotas a las que se encuentran los tramos iníciales y finales de cada una de las tuberías. Para ello se buscan las cotas que aún se desconocen: que son las del colector y la EDAM en sí.

- Tomando como referencia el nivel del mar, tanto el el colector como los pozos (fig. 3.1) se encuentran entre 25 y 32 m. Se usarán ambos valores en lugar de una cota media para ofrecer un mayor margen de seguridad en los cálculos, siempre suponiendo la situación más desfavorable – anteponiendo en este caso la seguridad a los posibles costes.
- Por otro lado, a partir de múltiples muestras podemos saber que la EDAM en sí (fig. 3.12) tendrá entre 29 y 50 m de cota respecto al nivel del mar.
- Los valores de las cotas de la bomba de captación, el depósito de distribución y el emisario submarino se conocen a partir del anexo IV.

En la tabla 3.3 se muestra un resumen de las cotas respecto al nivel del mar de cada uno de los principales puntos de interés para el dimensionado del sistema de bombeo (anexo V)

	z [m] respecto al nivel del mar
Pozos	25(mín) a 32(máx)
Colector	25(mín) a 32(máx)
EDAM (bastidor)	29(mín) a 50(máx)
Bomba de captación	-15
Depósito de distribución	302
Emisario submarino	-50

Tabla 3.3: Principales cotas respecto al nivel del mar. Elaboración propia



Figura 3.1: Cota respecto al nivel del mar de los pozos y el colector. Elaboración propia



Figura 3.2: Cotas mínimas y máximas en la zona donde se ubicará la EDAM. Fuente: Grafcan

3.2 Bomba de alimentación:

- Cotas (tabla 3.3)
 - La cota final (z_f) se corresponde con la entrada a la EDAM, que en el caso más desfavorable se sitúa a una cota máxima de +50 m.
 - La cota inicial (z_i) se corresponde con la profundidad de la bomba, que tomando como referencia el nivel del mar en el caso más desfavorable, se sitúa a -15 m

- Velocidades (tabla 3.1)
 - La velocidad final (v_f) se considera como prácticamente igual a la inicial (v_i). Por tanto, su diferencia será cero y el valor concreto 0.786m/s, no tiene importancia para el cálculo.
 - No debe confundirse v_f con la velocidad del caudal de alimentación (0,802m/s), pues habrán dos bombas de este tipo que actuarán simultáneamente en todo momento, cada una impulsando la mitad del caudal de alimentación (o caudal de captación).

- Presiones
 - La presión relativa final (fig. 3.3), en la entrada al colector de admisión, se corresponde con la suma de la pérdida de carga producida en el pretratamiento, 2 bar, y la presión necesaria para evitar la cavitación en la bomba de alta presión, 2 bar. Así, $p_f = 4$ bar
 - La presión relativa inicial, p_i , al ser tomada en la superficie libre de líquido del pozo, será igual a cero

- Pérdidas de carga (tabla 3.2). Se corresponden con la suma de las pérdidas de carga en las tuberías de captación y en las de rechazo: 0,17 m + 0,35 m = 0,52 m

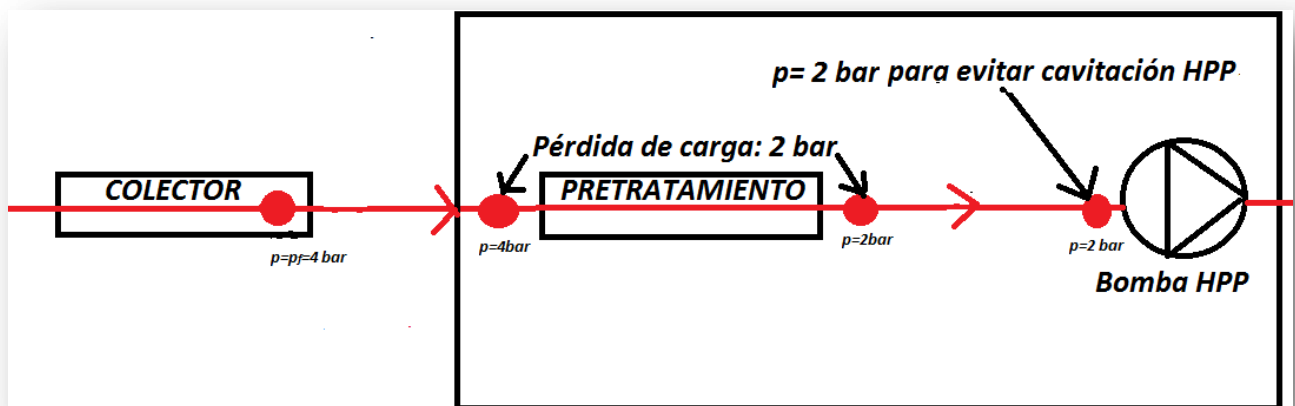


Figura 3.3: Esquema para la presión final de alimentación. Elaboración propia

3.3 Bomba de alta presión:

- Cotas (tabla 3.3)
 - La cota final (z_f) coincide con la cota inicial (z_i), al encontrarse en el interior de la EDAM (infraestructura donde se localiza el bastidor de membranas), y por tanto su valor, entre 29 y 50 m, no tiene importancia para el cálculo.

- Velocidades (tabla 3.1)
 - La velocidad final (v_f) se considera como prácticamente igual a la inicial (v_i). Por tanto, su diferencia será cero y el valor concreto, 0,707m/s, no tiene importancia para el cálculo.

- Presiones
 - La presión relativa final (fig. 3.4), p_f , se corresponde con la presión de entrada al bastidor de membranas, que será: 66,54 bar.
 - La presión relativa inicial (p_i) se ha comentado anteriormente (fig. 3.3), y es de 2 bar ($2 \cdot 10^5$ Pa) para evitar la cavitación.

Paso 1

Presión de la agua de aporte	66,54	[bar]
Presión del concentrado	65,25	[bar]

	Posición	Caudal [m ³ /h]	TDS [mg/l]	Conductividad [uS/cm]	pH
Agua de aporte	F1.1	277,78	38882,89	56050,93	6,50
Permeado	P1.1	125,00	176,91	324,92	4,36
Concentrado	C1.1	152,78	70864,21	99347,84	6,73

Incrustación (Concentrado)		[% Sat.]		[% Sat.]	
Ca ₃ (PO ₄) ₂ :	0,00	CaSO ₄ :	52,32	SiO ₂ :	1,83
LSI:	-0,00	BaSO ₄ :	173,31	CaF ₂ :	490,25
SDSI:	-1,01	SrSO ₄ :	76,55		

Figura 3.4: Presión del agua de aporte. Fuente: LewaPlus

- Pérdidas de carga en el interior del núcleo de membranas (EDAM en sí), tal y como se estableció en el alcance del proyecto, se consideran despreciables: Hr=0

3.4 Bomba Booster

- Cotas (tabla 3.3)
 - La cota final (z_f) coincide con la cota inicial (z_i), al encontrarse en el interior de la EDAM (infraestructura donde se localiza el bastidor de membranas), y por tanto su valor, 29-50m, no tiene importancia para el cálculo.

- Velocidades (tabla 3.1)
 - La velocidad final (v_f) se considera como prácticamente igual a la inicial (v_i). Por tanto, su diferencia será cero y el valor concreto, 0,865m/s, no tiene importancia para el cálculo.

- Presiones
 - La presión relativa final (p_f) es la presión de salida de la bomba de alta presión comentada anteriormente, que se corresponde con la presión de entrada al bastidor de membranas (fig. 3.4),, 66,54 bar
 - La presión relativa inicial (p_i) se corresponde con la presión de salida (alta) del dispositivo de recuperación de energía. Este valor lo podemos tomar directamente del software de dimensionamiento del bastidor de membranas (fig. 3.5): 64,64 bar

ERD isobárico	
Caudal del concentrado	152,78 [m3/h]
Número de unidades ERD	4
Caudal por unidad	38,19 [m3/h]
Lubricación por unidad	0,53 [m3/h]
Presión de la agua de aporte ERD	6,478 [bar]
Presión de entrada	65,25 [bar]
Presión de descarga (alta)	64,64 [bar]
Presión de descarga (baja)	6,09 [bar]
Fuga	1,00 [%]
Cuadral en exceso	0,00 [%]
Eficiencia ERD	97,49 [%]

Figura 3.5: Presión entrada a la bomba booster. Fuente: LewaPlus

- Pérdidas de carga en el interior del núcleo de membranas (EDAM en sí), tal y como se estableció en el alcance del proyecto, se consideran despreciables: $H_r=0$ m

3.5 Bomba de distribución

- Cotas (tabla 3.3)
 - La cota final (z_f) se corresponde con la cota respecto al nivel del mar del depósito de regulación, 273 m.
 - La cota inicial, (z_i), en la situación más desfavorable, se corresponde con la cota mínima de la EDAM: 29 m
- Velocidades (tabla 3.1)
 - La velocidad final (v_f) se considera como prácticamente igual a la inicial (v_i). Por tanto, su diferencia será cero y el valor concreto, 0,707m/s, no tiene importancia para el cálculo.
- Presiones
 - La presión relativa final (p_f) se corresponde con la presión relativa en la superficie libre de líquido del depósito, que será cero.
 - La presión relativa inicial (p_i) se corresponde con la presión de salida del bastidor de membranas para el permeado, que también es nula.
- Pérdidas de carga en las tuberías de distribución se han calculado anteriormente (tabla 3.2). y tienen un valor de 17,62 m

3.6 Bomba de postratamiento

- Cotas (tabla 3.3)
 - La cota final (z_f) coincide con la cota inicial (z_i), al encontrarse en el interior de la EDAM (infraestructura donde se localiza el bastidor de membranas), y por tanto su valor, 29-50 m, no tiene importancia para el cálculo.
- Velocidades (tabla 3.1)
 - La velocidad final (v_f) se considera como prácticamente igual a la inicial (v_i). Por tanto, su diferencia será cero y el valor concreto, 0,707m/s, no tiene importancia para el cálculo.
- Presiones
 - La presión relativa final (p_f) es la presión necesaria para introducir el caudal de permeado en el descarbonatador sin que se produzca cavitación, que se estima en 2 bar ($2 \cdot 10^5$ Pa).
 - La presión relativa inicial (p_i) es la presión de salida del permeado, que se ha asumido en 0 bar (presión atmosférica)
- Pérdidas de carga en el interior del núcleo de membranas, tal y como se estableció en el alcance del proyecto, se consideran despreciables: Hr=0

3.7 Bomba de rechazo

- Cotas (tabla 3.3)
 - La cota final (z_f) se corresponde con la cota del tramo final del emisario submarino, que se ha dimensionado para que llegue hasta 50m.
 - La cota inicial, (z_i), en la situación más desfavorable, se corresponde con la cota mínima respecto al nivel del mar de la EDAM: +29 m
- Velocidades (tabla 3.1)
 - La velocidad final (v_f) se considera como prácticamente igual a la inicial (v_i). Por tanto, su diferencia será cero y el valor concreto, 0,865m/s, no tiene importancia para el cálculo.
- Presiones
 - La presión relativa final (p_f) se supondrá como la mínima necesaria para evacuar la salmuera a 50 metros bajo el mar. Esta presión será:

$$p = \rho(\text{agua}, 21^\circ\text{C}) * g * h = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 50\text{m} = 490500 \text{ Pa}$$
 - La presión relativa inicial (p_i) se corresponde con la presión de salida del dispositivo de recuperación de energía (baja), que según LewaPlus (fig. 3.6) será de 6,09 bar

ERD isobárico	
Caudal del concentrado	152,78 [m3/h]
Número de unidades ERD	4
Caudal por unidad	38,19 [m3/h]
Lubricación por unidad	0,53 [m3/h]
Presión de la agua de aporte ERD	6,478 [bar]
Presión de entrada	65,25 [bar]
Presión de descarga (alta)	64,64 [bar]
Presión de descarga (baja)	6,09 [bar]
Fuga	1,00 [%]
Cudal en exceso	0,00 [%]
Eficiencia ERD	97,49 [%]

Figura 3.6: Presión entrada a la hipotética bomba de rechazo. Fuente: LewaPlus

- Pérdidas de carga, obtenidas anteriormente (tabla 3.2), serán de 4,91 m

3.8 Resultados y conclusiones

Finalmente se reúnen estos datos en la tabla 3.4, y se sustituyen en las ecuaciones 3.2 a 3.5 para obtener los resultados mostrados en las tablas 3.5 y 3.6:

	z_f [m]	z_i [m]	v_f [m/s]	v_i [m/s]	p_f [Pa]	p_i [Pa]	H_r [m]
Bomba de alimentación	50	-15	0,786	0,786	400000	0	0,52
Bomba de alta presión	29	29	0,707	0,707	6654000	200000	0
Bomba Booster	29	29	0,865	0,865	6654000	6464000	0
Bomba de distribución	273	29	0,707	0,707	0	0	17,62
Bomba de rechazo	-50	29	0,865	0,865	490500	609000	4,91
Bomba postratamiento	29	29	0,707	0,707	200000	0	0

Tabla 3.4: Valores a introducir en la ecuación de Bernoulli para cada bomba. Elaboración propia

	H_{cota} [m]	$H_{cinética}$ [m]	$H_{presión}$ [m]	H_r [m]	H_b [m]
Bomba de alimentación	65	0	40,77	0,52	106,29
Bomba de alta presión	0	0	657,9	0	657,90
Bomba Booster	0	0	19,37	0	19,37
Bomba de distribución	244	0	0,0	17,62	261,62
Bomba de rechazo	-79	0	-12,08	4,91	-86,17
Bomba postratamiento	0	0	20,39	0	20,39

Tabla 3.5: Resultados de las principales alturas para cada bomba. Elaboración propia

	H_{cota} [m]	$H_{cinética}$ [m]	$H_{presión}$ [m]	H_r [m]	H_b [m]
Bomba de alimentación	61%	0%	38%	0%	100%
Bomba de alta presión	0%	0%	100%	0%	100%
Bomba Booster	0%	0%	100%	0%	100%
Bomba de distribución	93%	0%	0%	7%	100%
Bomba de rechazo	92%	0%	14%	-6%	100%
Bomba postratamiento	0%	0%	100%	0%	100%

Tabla 3.6: Proporción porcentual de las alturas para cada bomba. Elaboración propia

Los resultados de las tablas anteriores son coherentes:

- La bomba de alimentación debe vencer fundamentalmente la altura de cota (por la profundidad de los pozos) y de presión (pérdidas de carga en el pretratamiento, y para evitar la cavitación en HPP).
- La bomba de alta presión invierte la totalidad de su energía en vencer la altura de presión (necesaria para compensar la presión osmótica).
- Ídem para las bombas booster y de postratamiento, que en este caso se utilizan para cubrir una diferencia de presión.
- Y en cuanto a la bomba de distribución, su energía se invertirá en vencer la altura de cota y las pérdidas de carga asociadas, llevando el fluido hasta el depósito de regulación.
- Finalmente, se observa que la bomba de rechazo tiene una altura útil negativa. Esto implica que la bomba no tiene que actuar: basta la propia energía acumulada en el fluido (en forma de energía potencial y de presión; o altura de cota y de presión) para su propio transporte, venciendo fácilmente la pérdida de carga que se produce en la misma.

Por tanto, hasta el momento, y redondeado para el valor superior, se tiene la siguiente información (tabla 3.7):

	Q [m³/h]	H_b [m]	NPSH_d [m]
Bombas de alimentación	139	107	-
Bomba de alta presión	128	658	-
Bomba de postratamiento	125	21	-
Bomba de distribución	125	262	-
Bomba booster	151	20	-
Bomba de rechazo	No se requiere ($H_b < 0$)		

Tabla 3.7: Caudal y altura útil de las bombas. Elaboración propia

4. Cálculo de la altura neta de aspiración disponible (NPSHd)

4.1 Ecuación aplicada

Para que no se produzca cavitación, se debe comprobar que se cumpla:

$$NPSHd > NPSHr \rightarrow \text{No hay cavitación} \tag{4.1}$$

Donde NPSHr (altura neta de aspiración requerida) es aportado por el fabricante, y NPSHd (altura neta de aspiración disponible) se puede calcular como:

$$NPSHd [m] = (z_1 - z_E) + \frac{(v_1^2 - v_E^2)}{2 * g} + \frac{p_1 - p_s(21^\circ C)}{\gamma [agua, 21^\circ C]} \tag{4.2}$$

En esta ecuación, el subíndice '1' representa la tubería de aspiración acoplada a la bomba (o superficie libre de líquido, en el caso de la bomba sumergible de alimentación), y el subíndice 'E' a la boca de entrada de la bomba.

Donde:

- $\gamma [agua, 21^\circ C] = \rho(agua, 21^\circ C) * g \sim 1000 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 = 9810 \text{ N/m}^3$.
- $p_s (21^\circ C) = 0,02487 \text{ bar} = 2487 \text{ Pa} = \text{Presión absoluta de saturación del agua a } 21^\circ C \text{ (fig. 4.3)}$

Nótese que, de nuevo, se ha optado por obtener este parámetro de manera simplificada (sin considerar la variación en temperatura o salinidad a lo largo del proceso),

Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de temperaturas

Temp. °C	Presión bar	Volumen específico m³ / kg		Energía interna kJ / kg		Entalpía kJ / kg			Entropía kJ / kg K	
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor vaporiz.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.
		$v_f \times 10^3$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
.01	0,00611	1,0002	206,136	0,00	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562
4	0,00813	1,0001	157,232	16,77	2380,9	16,78	2491,9	2508,7	0,0610	9,0514
5	0,00872	1,0001	147,120	20,97	2382,3	20,98	2489,6	2510,6	0,0761	9,0257
6	0,00935	1,0001	137,734	25,19	2383,6	25,20	2487,2	2512,4	0,0912	9,0003
8	0,01072	1,0002	120,917	33,59	2386,4	33,60	2482,5	2516,1	0,1212	8,9501
10	0,01228	1,0004	106,379	42,00	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	0,1510	8,9008
11	0,01312	1,0004	99,857	46,20	2390,5	46,20	2475,4	2521,6	0,1658	8,8765
12	0,01402	1,0005	93,784	50,41	2391,9	50,41	2473,0	2523,4	0,1806	8,8524
13	0,01497	1,0007	88,124	54,60	2393,3	54,60	2470,7	2525,3	0,1953	8,8285
14	0,01598	1,0008	82,848	58,79	2394,7	58,80	2468,3	2527,1	0,2099	8,8048
15	0,01705	1,0009	77,926	62,99	2396,1	62,99	2465,9	2528,9	0,2245	8,7814
16	0,01818	1,0011	73,333	67,18	2397,4	67,19	2463,6	2530,8	0,2390	8,7582
17	0,01938	1,0012	69,044	71,38	2398,8	71,38	2461,2	2532,6	0,2535	8,7351
18	0,02064	1,0014	65,038	75,57	2400,2	75,58	2458,8	2534,4	0,2679	8,7123
19	0,02198	1,0016	61,293	79,76	2401,6	79,77	2456,5	2536,2	0,2823	8,6897
20	0,02339	1,0018	57,791	83,95	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	0,2966	8,6672
21	0,02487	1,0020	54,514	88,14	2404,3	88,14	2451,8	2539,9	0,3109	8,6450
22	0,02645	1,0022	51,447	92,32	2405,7	92,33	2449,4	2541,7	0,3251	8,6229

Figura 4.1: Valor tabulado de la presión de saturación del agua. Fuente: Moran Saphiro

Entonces, la expresión se puede reescribir como:

$$NPSHd [m] = (z_{t[m]} - z_b [m]) + \frac{(v_t^2 \frac{[m]}{[s]} - v_b^2 \frac{[m]}{[s]})}{19,62} + \frac{p_t [Pa] - 2487}{9810} \quad (4.3)$$

Alternativamente, se puede estimar la altura neta de aspiración disponible a partir de la presión absoluta de entrada a la bomba, sabiendo que ésta se puede calcular como la suma de la presión relativa (conocida) y la presión ejercida por la atmósfera (1,01325 bar).

Por otro lado, en cuanto a la equivalencia aproximada (tomando $g \sim 10m/s^2$) entre un metro de columna de agua y altura de presión:

$$p = \rho(\text{agua}) * g * h = 1000 \frac{kg}{m^3} * 10 \frac{m}{s^2} * 1m = 10000 Pa = 1m.c.a \quad (4.4)$$

En general, la altura cinética, de cota y pérdidas de carga son despreciables entre la tubería de aspiración y la boca de entrada a la bomba, lo que permite que la aproximación tomando en cuenta únicamente la altura de presión sea bastante próxima al valor real.

En cualquier caso, utilizaremos ambos métodos y compararemos los resultados. Para el caso particular de la bomba de alimentación, la presión relativa de entrada se puede conocer a partir de los metros de columna de agua que tiene encima, (11,54m en el caso más desfavorable – véase anexo IV -). Entonces, teniendo en cuenta esto, se reúnen los valores en la tabla 4.1:

	p_{IN} relativa [bar]	p_{IN} absoluta [bar]	NPSHd estimado [m.c.a]
Bombas de alimentación	1,154	2.16725	21,7
Bomba de alta presión	2	3,0125	30,1
Bomba de distribución	0	1,01325	10,1
Bomba booster	64,64	65,65325	646,4
Bomba postratamiento	0	1,01325	10,1

Tabla 4.1: Valores de presión relativa, absoluta y NPSHd estimado. Elaboración propia

Procedemos ahora con el cálculo mediante la ecuación 4.3, identificando primeramente cada una de las variables

4.2 Bomba de alimentación

- Cotas
 - La cota de la superficie líquida del agua respecto al nivel del mar (en el caso más desfavorable) será de $z_1 = -3.46$ m
 - La cota de la entrada de la bomba de captación es de $z_e = -15$ m
- Velocidades
 - La velocidad del agua en la superficie libre de líquido del pozo (v_1) se puede considerar despreciable, en tanto que debido a las dimensiones del pozo, su nivel bajará muy lentamente
 - La velocidad del agua en la entrada de la bomba de captación (v_e), asumiendo que el diámetro de la boca de aspiración sea igual al de la tubería, será 0,786 m/s
- Presiones
 - La presión absoluta del agua en la superficie libre de líquido del pozo se corresponde con la atmosférica: $p_1 = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$
- Pérdidas de carga: en el tramo entre la bomba de captación y la superficie libre de líquido del pozo se pueden considerar despreciables

4.3 Bomba de alta presión

- Cotas
 - La cota de la entrada a la bomba de alta presión se considera igual a la de la tubería, y por tanto $z_e = z_1$
- Velocidades
 - La velocidad del agua en la entrada a la bomba de alta presión, suponiendo que la tubería de aspiración tiene el mismo diámetro que la boca de entrada de la bomba, no varía ($v_1 = v_e$)
- Presiones
 - La presión absoluta de entrada a la bomba de alta presión será: $p = 2 \text{ bar} + 1,01325 \text{ bar} = 3,01325 \text{ bar} = 3,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
- Pérdidas de carga en el tramo son despreciables

4.4 Bomba de distribución

- Cotas
 - La cota de la entrada a la bomba de alta presión se considera igual a la de la tubería de aspiración ($z_e=z_1$), y por tanto su diferencia será cero
- Velocidades
 - La velocidad del agua en de entrada a la bomba de distribución, suponiendo que la tubería de aspiración tiene el mismo diámetro que la boca de entrada de la bomba, no varía ($v_1=v_e$)
- Presiones
 - La presión absoluta de entrada a la bomba de alta presión será la atmosférica: 1,01325 bar
- Pérdidas de carga en el tramo entre la bomba booster y el inicio de la tubería son despreciables

4.5 Bomba Booster

- Cotas
 - La cota de la entrada a la bomba booster se considera igual a la de la tubería de aspiración ($z_e=z_1$)
- Velocidades
 - La velocidad del agua en la entrada a la bomba Booster, suponiendo que la tubería de aspiración tiene el mismo diámetro que la boca de entrada de la bomba, no varía ($v_1=v_e$)
- Presiones
 - La presión absoluta a la entrada de la bomba será $p = 64,64\text{bar} + 1,01325\text{ bar} = 65,65\text{ bar}$
- Pérdidas de carga son despreciables

4.6 Bomba de postratamiento

- Cotas
 - La cota de la entrada a la bomba de postratamiento se considera igual a la de la tubería de aspiración ($z_e=z_1$)
- Velocidades
 - La velocidad del agua en la entrada a la bomba para postratamiento, suponiendo que la tubería de aspiración tiene el mismo diámetro que la boca de entrada de la bomba, no varía ($v_1=v_e$)
- Presiones
 - La presión absoluta a la entrada de la bomba será la atmosférica: $p = 1,01325 \text{ bar}$
- Pérdidas de carga son despreciables

4.7 Resultados finales y conclusión

En la tabla 4.2 resumen los resultados de introducir los valores comentados en el apartado 4.6 en la ecuación 4.3

	v_1 [m/s]	v_e [m/s]	p_1 [Pa]	p_s [Pa]	z_1 [m]	z_e [m]	NPSHd [m]
Bombas de alimentación	0	0,786	101325	2487	-3,46	-15	21,58
Bomba de alta presión	0	0	301325	2487	0	0	30,46
Bomba de distribución	0	0	101325	2487	0	0	10,08
Bomba Booster	0	0	6565325	2487	0	0	668,99
Bomba postratamiento	0	0	101325	2487	0	0	10,08

Tabla 4.2: Cálculo de NPSHd. Elaboración propia

Se observa que, como era de esperar, se obtienen valores muy similares a los estimados anteriormente (tabla 4.3), por lo que los tomaremos como válidos.

Entonces, podemos concluir de esta manera la tabla 4.4 con los datos necesarios para el dimensionamiento de las bombas (tras tomar el valor más desfavorable), y proceder así con el anexo VI, dedicado a la selección de las bombas disponibles en el mercado.

	p_{IN} [bar]	NPSHd estimado [m.c.a]	NPSHd calculado [m]
Bombas de alimentación	2.16725	21,7	21,58
Bomba de alta presión	3,0125	30,1	30,46
Bomba de postratamiento	1,01325	10,1	10,08
Bomba de distribución	1,01325	10,1	10,08
Bomba booster	65,67	656,7	668,99

Tabla 4.3: Comparación entre NPSHd calculado y estimado. Elaboración propia

	Q [m ³ /h]	H _b [m]	NPSHd [m]
Bombas de alimentación	139	107	21
Bomba de alta presión	128	658	30
Bomba de postratamiento	125	21	10
Bomba de distribución	125	262	10
Bomba booster	151	20	656
Bomba de rechazo	No se requiere ($H_b < 0$)		

Tabla 4.4: Datos necesarios para el dimensionamiento de las bombas. Elaboración propia



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

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO VI:
**SELECCIÓN DE BOMBAS DISPONIBLES EN EL
MERCADO**

TRABAJO DE FIN DE GRADO:
**DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA
ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES**

Autor: Alexander Hernández García

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Índice de contenido

1. Introducción.....	1
2. Selección de la bomba de alimentación.....	2
2.1 Mejor opción del fabricante Flowserve.....	2
2.2 Mejor opción del fabricante Grundfos.....	3
2.3 Mejor opción del fabricante KSB.....	4
2.4 Mejor opción del fabricante Lowara.....	5
2.5 Mejor opción del fabricante Sulzer.....	6
2.6 Mejor opción del fabricante Wilo.....	7
2.7 Selección final de la bomba de alimentación.....	8
3. Selección de la bomba de distribución.....	9
3.1 Mejor opción del fabricante Flowserve.....	9
3.2 Mejor opción del fabricante Grundfos.....	10
3.3 Mejor opción del fabricante KSB.....	11
3.4 Mejor opción del fabricante Lowara.....	12
3.5 Mejor opción del fabricante Sulzer.....	13
3.6 Mejor opción del fabricante Wilo.....	14
3.7 Selección final de la bomba de distribución.....	15
4. Selección de la bomba de alta presión.....	16
4.1 Mejor opción del fabricante Flowserve.....	16
4.2 Mejor opción del fabricante Grundfos.....	17
4.3 Mejor opción del fabricante KSB.....	18
4.4 Mejor opción del fabricante Lowara.....	19
4.5 Mejor opción del fabricante Sulzer.....	20
4.6 Mejor opción del fabricante Wilo.....	21
4.7 Selección final de la bomba de alta presión.....	22

5. Selección de la bomba Booster	23
5.1 Mejor opción del fabricante Flowserve.....	23
5.2 Mejor opción del fabricante Grundfos	24
5.3 Mejor opción del fabricante KSB.....	25
5.4 Mejor opción del fabricante Lowara.....	26
5.5 Mejor opción del fabricante Sulzer	27
5.6 Mejor opción del fabricante Wilo.....	28
5.7 Selección final de la bomba booster.....	29
6. Selección de la bomba de postratamiento	30
6.1 Mejor opción del fabricante Flowserve.....	30
6.2 Mejor opción del fabricante Grundfos	31
6.3 Mejor opción del fabricante KSB.....	32
6.4 Mejor opción del fabricante Lowara.....	33
6.5 Mejor opción del fabricante Sulzer	34
6.6 Mejor opción del fabricante Wilo.....	35
6.7 Selección final de la bomba de postratamiento.....	36
7. Resumen de bombas seleccionadas	37

Índice de figuras

Figura 1.1: Fabricantes consultados. Fuente: Flowserve, Grundfos, KSB, Lowara, Sulzer y Wilo.....	1
Figura 2.1: Resultados del fabricante Flowserve para la bomba de alimentación. Fuente: Flowserve.....	2
Figura 2.2: Curva característica de la bomba de alimentación. Fuente: Grundfos.....	3
Figura 2.3: Curva característica de la bomba de alimentación. Fuente: KSB....	4
Figura 2.4: Curva característica de la bomba de alimentación. Fuente: Lowara	5

Figura 2.5: Curva característica de la bomba de alimentación. Fuente: Sulzer.	6
Figura 2.6: Curva característica de la bomba de alimentación. Fuente: Wilo....	7
Figura 2.7: Curva característica de la bomba de alimentación. Fuente: KSB....	8
Figura 3.1: Curva característica de la bomba de distribución. Fuente: Flowserve	9
Figura 3.2: Curva característica de la bomba de distribución. Fuente: Grundfos	10
Figura 3.3: Curva característica de la bomba de distribución. Fuente: KSB....	11
Figura 3.4: Curva característica de la bomba de distribución. Fuente: Lowara	12
Figura 3.5: Rango de operación de las bombas disponibles. Fuente: Sulzer..	13
Figura 3.6: Curva característica de la bomba de distribución. Fuente: Wilo....	14
Figura 3.7: Imagen real del modelo CRN 125-10 . Fuente: Grundfos	15
Figura 4.1: Curva característica de la bomba de alta presión. Fuente: Flowserve	16
Figura 4.2: Mensaje de error en la búsqueda de bombas. Fuente: Grundfos .	17
Figura 4.3: Mensaje de error en la búsqueda de bombas. Fuente: KSB	18
Figura 4.4: Curva característica de la bomba de alta presión. Fuente: Lowara	19
Figura 4.5: Rango de operación de bombas disponibles. Fuente: Sulzer	20
Figura 4.6: Mensaje de error en la búsqueda de bombas. Fuente: Wilo	21
Figura 4.7: Curva característica de la bomba de alta presión. Fuente: Flowserve	22
Figura 5.1: Curva característica de la bomba Booster. Fuente: Flowserve	23
Figura 5.2: Curva característica de la bomba Booster. Fuente: Grundfos	24
Figura 5.3: Curva característica de la bomba Booster. Fuente: KSB	25
Figura 5.4: Curva característica de la bomba Booster. Fuente: Lowara	26
Figura 5.5: Curva característica de la bomba Booster. Fuente: Sulzer	27
Figura 5.6: Curva característica de la bomba Booster. Fuente: Flowserve	28

Figura 5.7: Curva característica del modelo seleccionado. Fuente: Flowserve	29
Figura 6.1: Curva característica de la bomba de postratamiento. Fuente: Flowserve	30
Figura 6.2: Curva característica de la bomba de postratamiento. Fuente: Grundfos.....	31
Figura 6.3: Curva característica de la bomba de postratamiento. Fuente: KSB	32
Figura 6.4: Curva característica de la bomba de postratamiento. Fuente: Lowara.....	33
Figura 6.5: Curva característica de la bomba de postratamiento. Fuente: Sulzer	34
Figura 6.6: Curva característica de la bomba de postratamiento. Fuente: Wilo	35
Figura 6.7: Curva característica de la bomba de postratamiento. Fuente: Flowserve	36

Índice de tablas

Tabla 1.1: Datos necesarios para el dimensionamiento de las bombas. Elaboración propia	1
Tabla 2.1: Punto de operación para la bomba de alimentación. Elaboración propia.....	2
Tabla 2.2: Características de la bomba de alimentación. Fuente: Grundfos	3
Tabla 2.3: Características de la bomba de alimentación. Fuente: KSB.....	4
Tabla 2.4: Características de la bomba de alimentación. Fuente: Lowara	5
Tabla 2.5: Características de la bomba de alimentación. Fuente: Sulzer	6
Tabla 2.6: Características de la bomba de alimentación. Fuente: Wilo.....	7
Tabla 2.7: Resumen de los modelos consultados. Elaboración propia	8
Tabla 3.1: Punto de operación para la bomba de distribución. Elaboración propia.....	9
Tabla 3.2: Características de la bomba de distribución. Fuente: Flowserve.....	9

Tabla 3.3: Características de la bomba de distribución. Fuente: Grundfos	10
Tabla 3.4: Características de la bomba de distribución. Fuente: KSB.....	11
Tabla 3.5: Características de la bomba de distribución. Fuente: Lowara	12
Tabla 3.6: Características de la bomba de distribución. Fuente: Wilo	14
Tabla 3.7: Resumen de los modelos consultados. Elaboración propia	15
Tabla 4.1: Punto de operación para la bomba de alta presión. Elaboración propia.....	16
Tabla 4.2: Características de la bomba de alta presión. Fuente: Flowserve ...	16
Tabla 4.3: Características de la bomba de alta presión. Fuente: Lowara	19
Tabla 4.4: Resumen de los modelos consultados. Elaboración propia	22
Tabla 5.1: Punto de operación para la bomba Booster. Elaboración propia....	23
Tabla 5.2: Características de la bomba Booster. Fuente: Flowserve	23
Tabla 5.3: Características de la bomba Booster. Fuente: Grundfos	24
Tabla 5.4: Características de la bomba Booster. Fuente: KSB.....	25
Tabla 5.5: Características de la bomba Booster. Fuente: Lowara	26
Tabla 5.6: Características de la bomba Booster. Fuente: Sulzer.....	27
Tabla 5.7: Características de la bomba Booster. Fuente: Wilo	28
Tabla 5.8: Resumen de los modelos consultados. Elaboración propia	29
Tabla 6.1: Punto de operación para la bomba de postratamiento. Elaboración propia.....	30
Tabla 6.2: Características de la bomba de postratamiento. Fuente: Flowserve	30
Tabla 6.3: Características de la bomba de postratamiento. Fuente: Grundfos	31
Tabla 6.4: Características de la bomba de postratamiento. Fuente: KSB	32
Tabla 6.5: Características de la bomba de postratamiento. Fuente: Lowara ..	33
Tabla 6.6: Características de la bomba de postratamiento. Fuente: Sulzer ...	34
Tabla 6.7: Características de la bomba de postratamiento. Fuente: Wilo.....	35
Tabla 6.8: Resumen de los modelos consultados. Elaboración propia	36

Tabla 7.1: Resumen de los modelos seleccionados para el sistema de bombeo. Elaboración propia 37

1. Introducción

Se consultará el catálogo de un total de 6 fabricantes de bombas de remarcada reputación a nivel mundial: Flowserve, Grundfos, KSB, Lowara, Sulzer y Wilo (fig 1.1).



Figura 1.1: Fabricantes consultados. Fuente: Flowserve, Grundfos, KSB, Lowara, Sulzer y Wilo

Para ello se hará uso de la herramienta de selección online de bombas de cada fabricante, introduciendo el punto de operación requerido (tabla 1.1)

	Q [m ³ /h]	H _b [m]	NPSH _d [m]
Bombas de alimentación	139	107	21
Bomba de alta presión	128	658	30
Bomba de postratamiento	125	21	10
Bomba de distribución	125	262	10
Bomba booster	151	20	656
Bomba de rechazo	No se requiere (H _b < 0)		

Tabla 1.1: Datos necesarios para el dimensionamiento de las bombas. Elaboración propia

En algunos casos no se facilita el rendimiento del motor, pero éste se puede calcular:

- A partir del rendimiento total R_t y el hidráulico R_h , se puede determinar el rendimiento del motor R_m como:

$$Rm [\%] = \frac{R_t}{R_h} * 100 \quad (1.1)$$

- Alternativamente, también se puede determinar mediante la relación entre la potencia total absorbida P_1 y la potencia en el eje P_2 :

$$Rm [\%] = \frac{P_2}{P_1} * 100 \quad (1.2)$$

2. Selección de la bomba de alimentación

2.1 Mejor opción del fabricante Flowserve

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 2.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de alimentación (x3)	139	107	21

Tabla 2.1: Punto de operación para la bomba de alimentación. Elaboración propia

No ha sido posible encontrar ningún modelo de bomba sumergible que permita alcanzar el punto de operación (fig. 2.1).

The screenshot shows the Flowserve Affinity website interface. The 'Classification' filter is set to 'Submersible'. The 'Available Product Lines' table is as follows:

Group	Product Line	Max Flow (m ³ /h)	Max Head (m)	Min Temp. (°C)
<input checked="" type="checkbox"/>	MSX Dry Pit Submersible	5,678.1	106.68	4
<input checked="" type="checkbox"/>	MSX Wet Pit Submersible	5,678.1	106.68	4

Figura 2.1: Resultados del fabricante Flowserve para la bomba de alimentación. Fuente: Flowserve

Como se puede observar en la figura superior, únicamente existen dos opciones para bomba sumergible:

- MSX Dry Pit Submersible
- MSX Wet Pit Submersible

No resultan válidos debido a dos parámetros: la altura máxima que puede alcanzar la bomba, 106.68 m, y la temperatura mínima del fluido. Se ha probado a reducir la altura útil desde 107 m a 106 m, pues al fin y al cabo se ha realizado un ligero sobredimensionamiento inicial para ir en el lado de la seguridad; sin embargo, sigue sin ser válido debido a que la línea de productos no es compatible con la temperatura mínima del fluido (existe riesgo de congelación al usar agua).

Se descarta por tanto a este fabricante para la selección de bombas del sistema de captación.

2.2 Mejor opción del fabricante Grundfos

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 2.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de alimentación (x3)	139	107	21

Tabla 2.1: Punto de operación para la bomba de alimentación. Elaboración propia

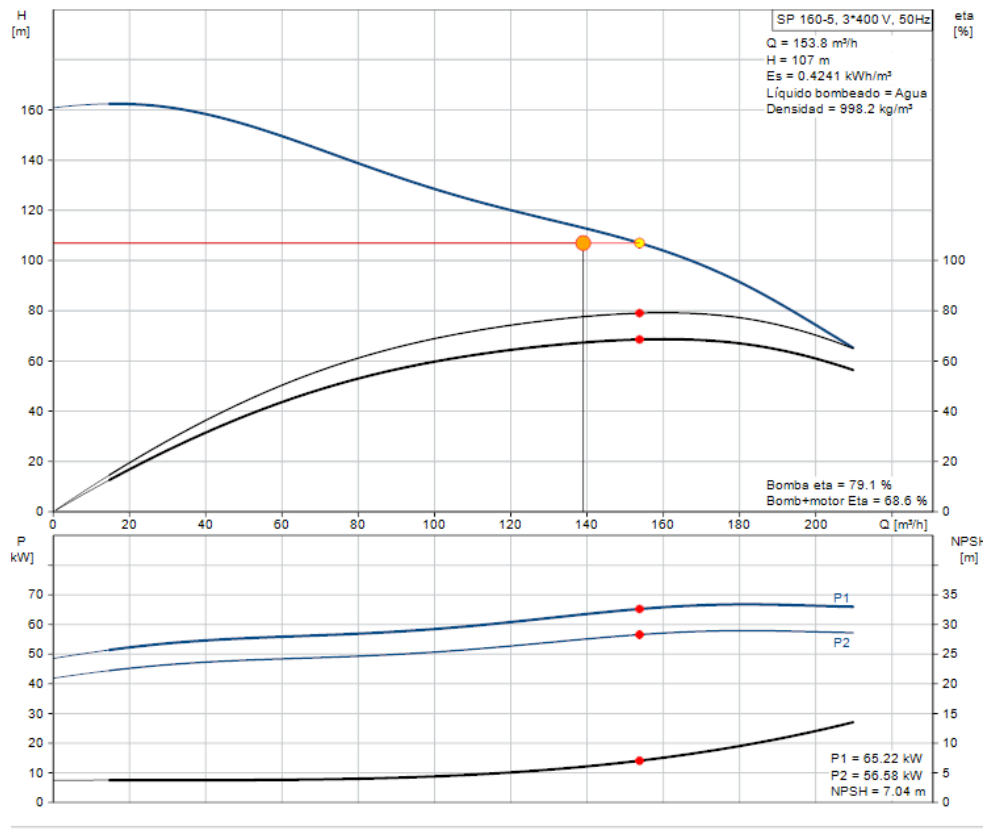


Figura 2.2: Curva característica de la bomba de alimentación. Fuente: Grundfos

La mejor opción de este fabricante es el modelo **SP 160-5** (fig. 2.2), que trabaja en el punto de operación Q=153,8 m³/h, H=107 m y tiene las siguientes características (tabla 2.2). Su NPSHr es 7,04 m, que es inferior a NPSHd = 21 m y por tanto no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
65.22	56.58	68.6	79.1	86,7

Tabla 2.2: Características de la bomba de alimentación. Fuente: Grundfos

2.3 Mejor opción del fabricante KSB

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 2.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de alimentación (x3)	139	107	21

Tabla 2.1: Punto de operación para la bomba de alimentación. Elaboración propia

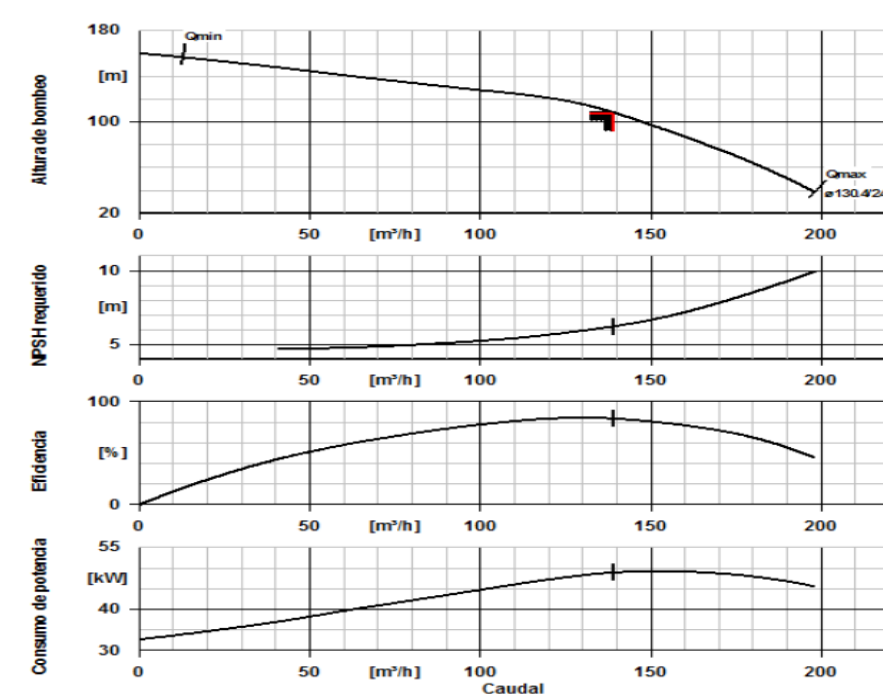


Figura 2.3: Curva característica de la bomba de alimentación. Fuente: KSB

La mejor opción de este fabricante es el modelo **UPAS 200-135** (fig. 2.3), que trabaja en el punto de operación $Q=139 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=107,5 \text{ m}$ y tiene las siguientes características (tabla 2.3). Su NPSHr es 6,22m, que es inferior a $NPSHd=21 \text{ m}$ y por tanto no habrá cavitación. No se indica el rendimiento del motor ni la potencia en el eje; y el rendimiento mostrado se asume (ante la falta de información que lo especifique) que se trata del hidráulico. Por tanto, a priori no es posible conocer el rendimiento del motor,

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
49,04	-	-	82,8	-

Tabla 2.3: Características de la bomba de alimentación. Fuente: KSB

2.4 Mejor opción del fabricante Lowara

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 2.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de alimentación (x3)	139	107	21

Tabla 2.1: Punto de operación para la bomba de alimentación. Elaboración propia

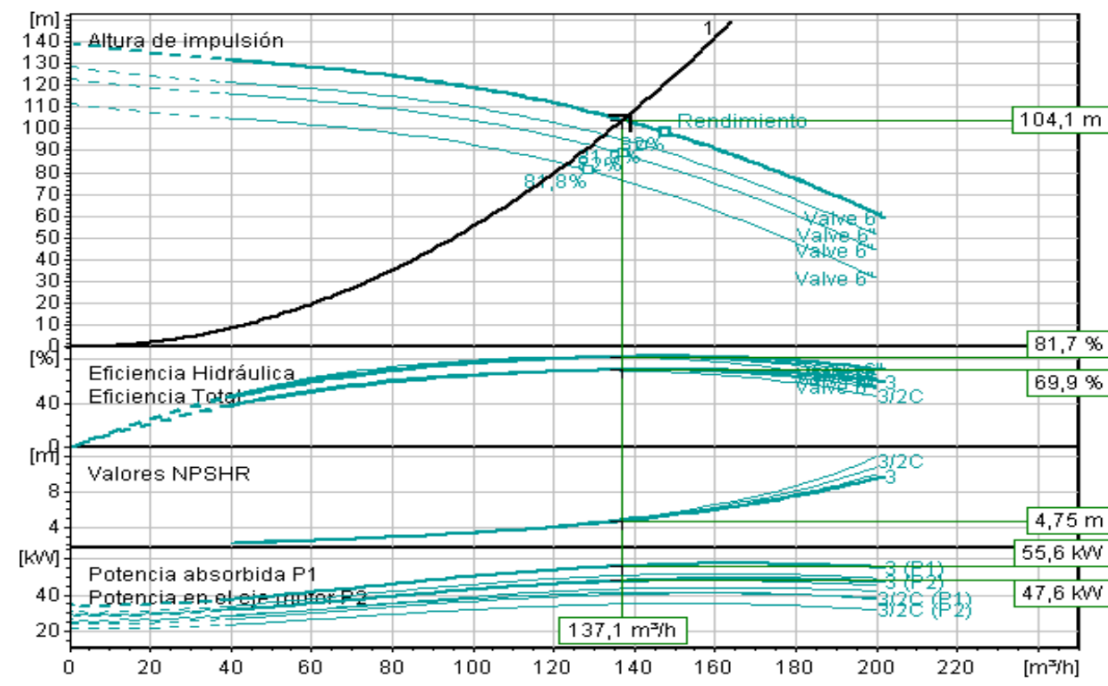


Figura 2.4: Curva característica de la bomba de alimentación. Fuente: Lowara

La mejor opción de este fabricante es el modelo **Z10150 03-L8W** (fig. 2.4), que trabaja en el punto de operación $Q=137,1 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=104,1 \text{ m}$, que si bien en principio no es suficiente, en la práctica sí que podría bastar teniendo en cuenta que se ha sobredimensionado ligeramente el sistema. Tiene las siguientes características (tabla 2.4). Su NPSHr es 4,75 m, que es inferior a $NPSHd=21 \text{ m}$ y por tanto no habrá cavitación.:

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
55,6	47,6	69,9	81,7	85,6

Tabla 2.4: Características de la bomba de alimentación. Fuente: Lowara

2.5 Mejor opción del fabricante Sulzer

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 2.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de alimentación (x3)	139	107	21

Tabla 2.1: Punto de operación para la bomba de alimentación. Elaboración propia

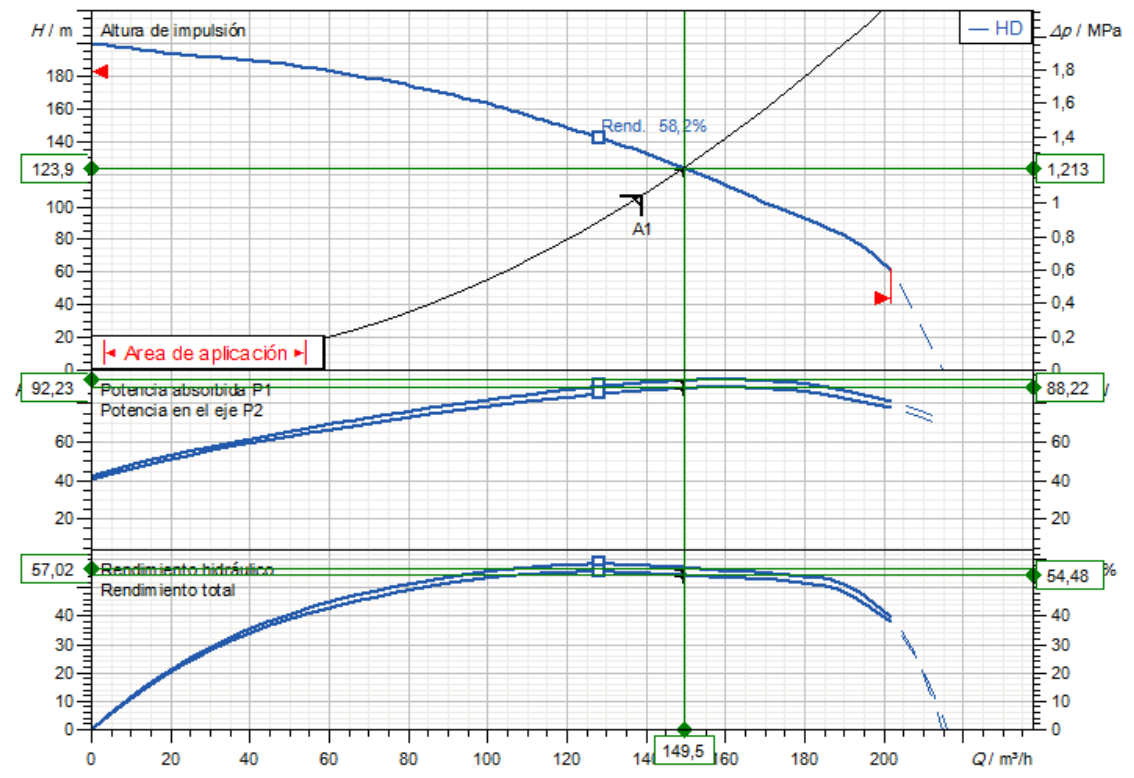


Figura 2.5: Curva característica de la bomba de alimentación. Fuente: Sulzer

La mejor opción de este fabricante es el modelo **XJ 900 HD** (fig. 2.5), que trabaja en el punto de operación $Q=149,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=123,9 \text{ m}$ y tiene las siguientes características (tabla 2.5). El fabricante no indica el valor de NPSHr en la ficha técnica del producto, con lo que no es posible saber con seguridad si habrá o no cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
92,23	88,22	54,48	57,02	95,6

Tabla 2.5: Características de la bomba de alimentación. Fuente: Sulzer

2.6 Mejor opción del fabricante Wilo

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 2.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de alimentación (x3)	139	107	21

Tabla 2.1: Punto de operación para la bomba de alimentación. Elaboración propia

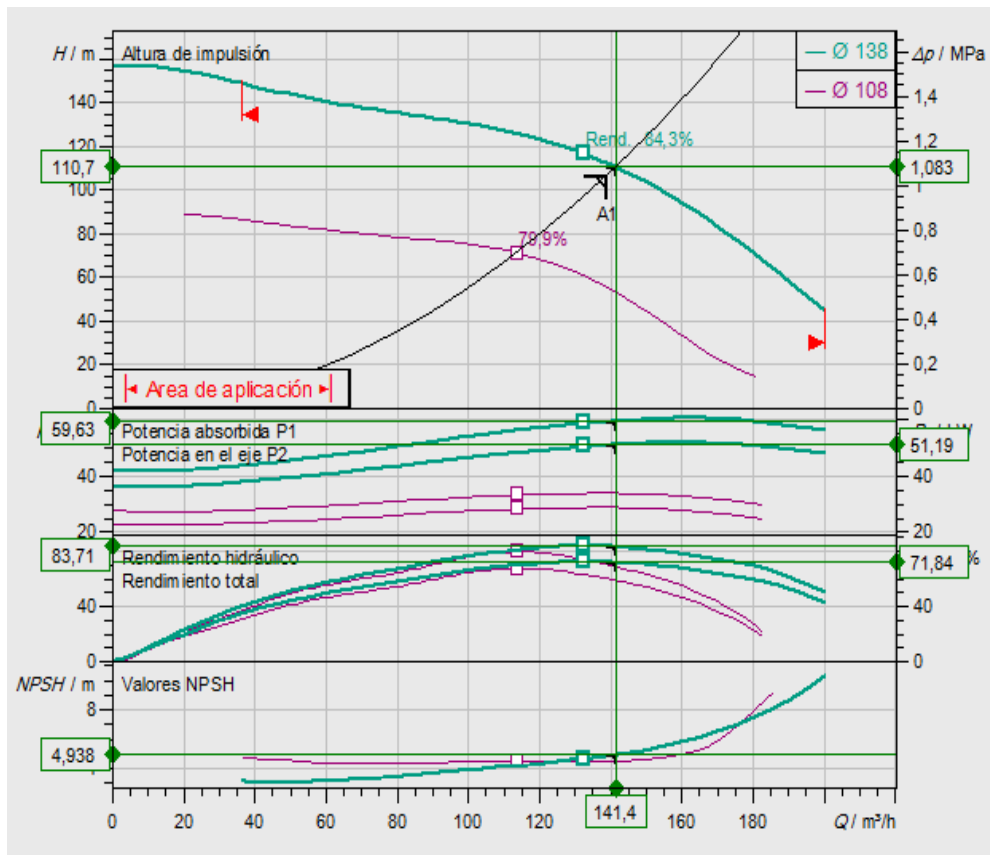


Figura 2.6: Curva característica de la bomba de alimentación. Fuente: Wilo

La mejor opción de este fabricante es el modelo **K8.130** (fig. 2.6), que trabaja en el punto de operación Q=141,4 m³/h, H=110,7 m y tiene las siguientes características (tabla 2.6):

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
59,63	51,19	71,84	83,71	85,8

Tabla 2.6: Características de la bomba de alimentación. Fuente: Wilo

2.7 Selección final de la bomba de alimentación

Fabricante	Modelo	Potencia absorbida [kW]	Rendimiento hidráulico [%]
Flowserve	-	-	-
Grundfos	SP 160-5	65,22	79,1
KSB	UPAS 200-135	49,04	82,8
Lowara	Z10150 03-L8W	55,6	81,7
Sulzer	XJ 900 HD	92,23	57,02
Wilo	K8.130	59,63	83,71

Tabla 2.7: Resumen de los modelos consultados. Elaboración propia

Entre todos los fabricantes consultados (tabla 2.7) se selecciona la bomba **KSB UPAS 250-135** (fig. 2.7), que trabajando en el punto de operación $Q=139 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=108,06 \text{ m}$ absorbe una potencia de 49,04 kW con 82,8% de rendimiento hidráulico sin producir cavitación. Se recuerda que serán necesarias un total de tres unidades: una para cada pozo, si bien solo dos actuarán simultáneamente, sirviendo la tercera como reserva.

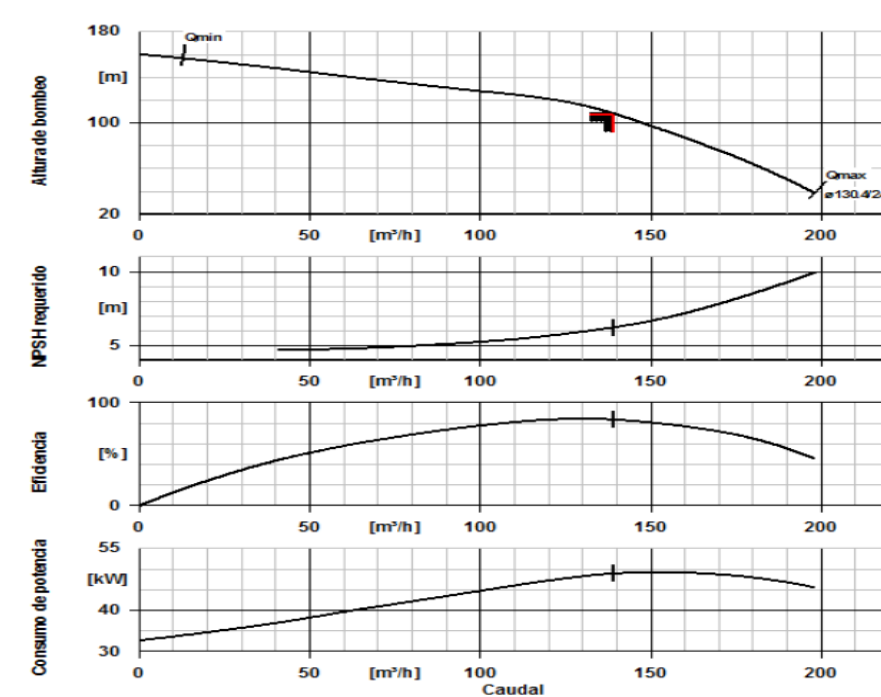


Figura 2.7: Curva característica de la bomba de alimentación. Fuente: KSB

3. Selección de la bomba de distribución

3.1 Mejor opción del fabricante Flowserve

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 3.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de distribución	125	262	10

Tabla 3.1: Punto de operación para la bomba de distribución. Elaboración propia

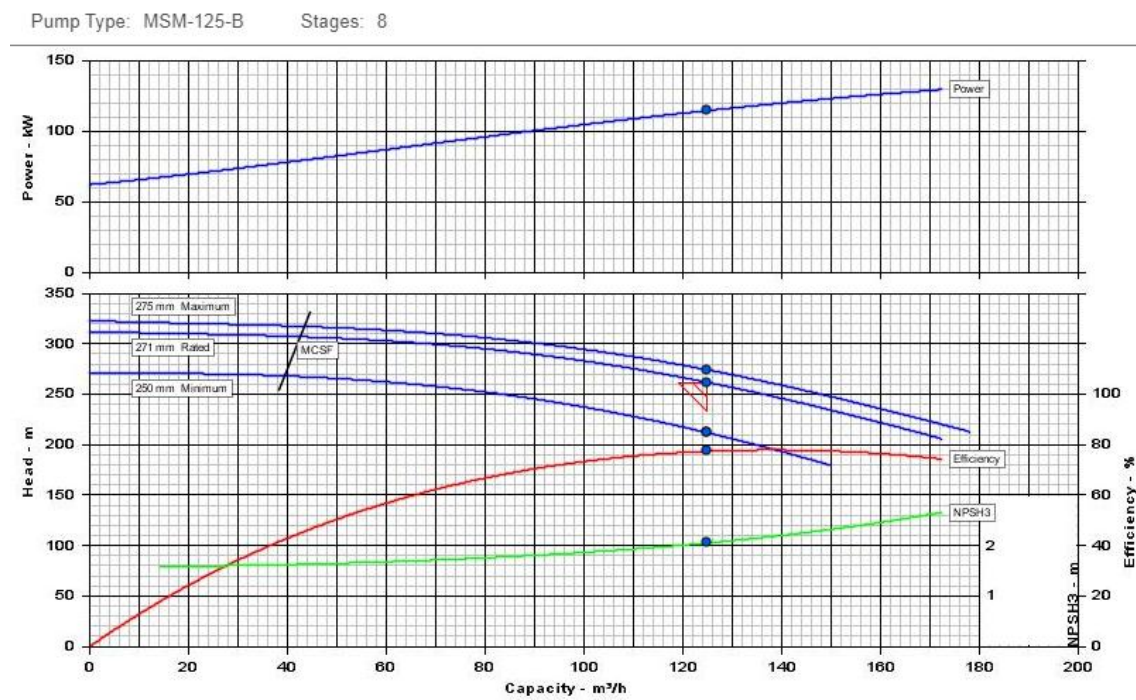


Figura 3.1: Curva característica de la bomba de distribución. Fuente: Flowserve

La mejor opción de este fabricante es el modelo **MSM-125-B** (fig. 3.1), que trabaja en el punto de operación $Q=125,1 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=261,86 \text{ m}$ y tiene las siguientes características (tabla 3.2). Su NPSHr es 2,1 m, que es inferior a $NPSHd=10 \text{ m}$ y por tanto no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
114,8	89,1	-	77,6	-

Tabla 3.2: Características de la bomba de distribución. Fuente: Flowserve

3.2 Mejor opción del fabricante Grundfos

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 3.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de distribución	125	262	10

Tabla 3.1: Punto de operación para la bomba de distribución. Elaboración propia

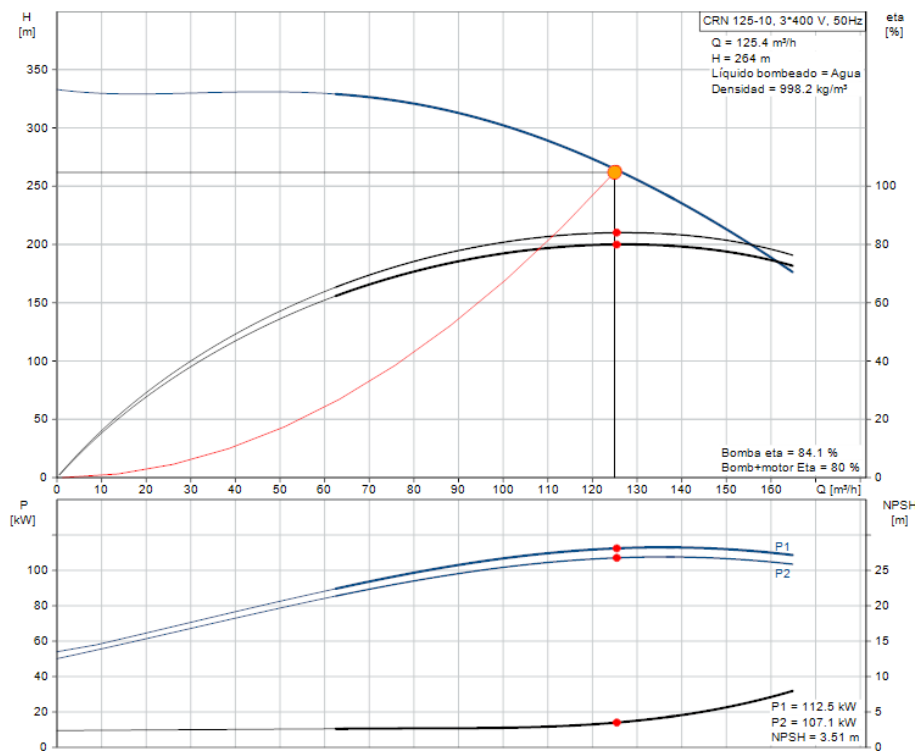


Figura 3.2: Curva característica de la bomba de distribución. Fuente: Grundfos

La mejor opción de este fabricante es el modelo **CRN 125-10** (fig. 3.2), que trabaja en el punto de operación Q=125,4 m³/h, H=264 m y tiene las siguientes características (tabla 3.3). Su NPSHr es 3,51 m, que es inferior a NPSHd=10 m y por tanto no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
112,5	107,1	80	84,1	95,2

Tabla 3.3: Características de la bomba de distribución. Fuente: Grundfos

3.3 Mejor opción del fabricante KSB

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 3.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de distribución	125	262	10

Tabla 3.1: Punto de operación para la bomba de distribución. Elaboración propia

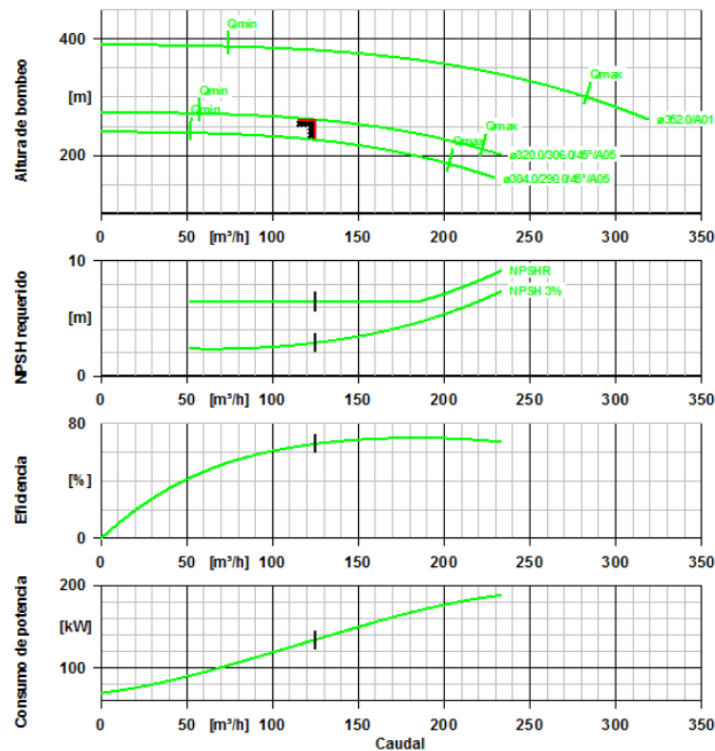


Figura 3.3: Curva característica de la bomba de distribución. Fuente: KSB

La mejor opción (no sumergible) de este fabricante es el modelo **RPHb 100-350/2** (fig. 3.3), que trabaja en el punto de operación $Q=125 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=262 \text{ m}$ y tiene las siguientes características (tabla 3.4). Su NPSHr es 6,48 m, que es inferior a $NPSHd=10 \text{ m}$ y por tanto no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
134,93	-	-	65,97	-

Tabla 3.4: Características de la bomba de distribución. Fuente: KSB

3.4 Mejor opción del fabricante Lowara

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 3.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de distribución	125	262	10

Tabla 3.1: Punto de operación para la bomba de distribución. Elaboración propia

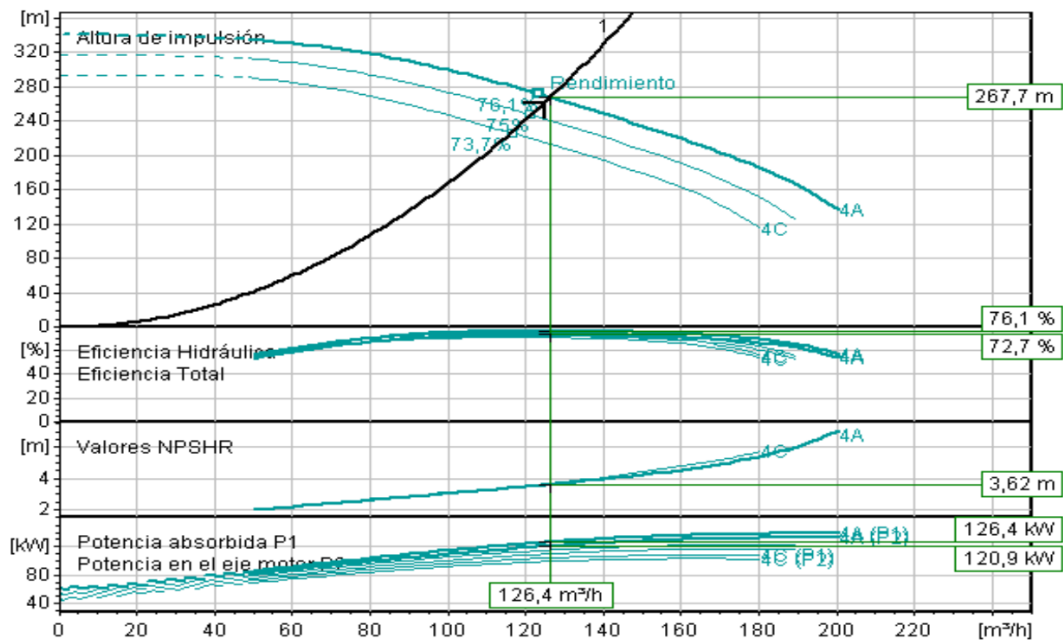


Figura 3.4: Curva característica de la bomba de distribución. Fuente: Lowara

La mejor opción (no sumergible) de este fabricante es el modelo **MPA100A/04A/BD1320/W25VCCC4** (fig. 3.4), que trabaja en el punto de operación $Q=126,4 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=267,7 \text{ m}$ y tiene las siguientes características (tabla 3.5). Su NPSHr es 3,62 m, que es inferior a $NPSHd=10 \text{ m}$ y por tanto no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
134,93	-	-	65,97	-

Tabla 3.5: Características de la bomba de distribución. Fuente: Lowara

3.5 Mejor opción del fabricante Sulzer

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 3.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de distribución	125	262	10

Tabla 3.1: Punto de operación para la bomba de distribución. Elaboración propia

Al introducir los valores del punto de operación en el selector online de bombas del fabricante Sulzer, aparece la siguiente ventana donde se indica que no hay ninguna bomba disponible (fig. 3.5):

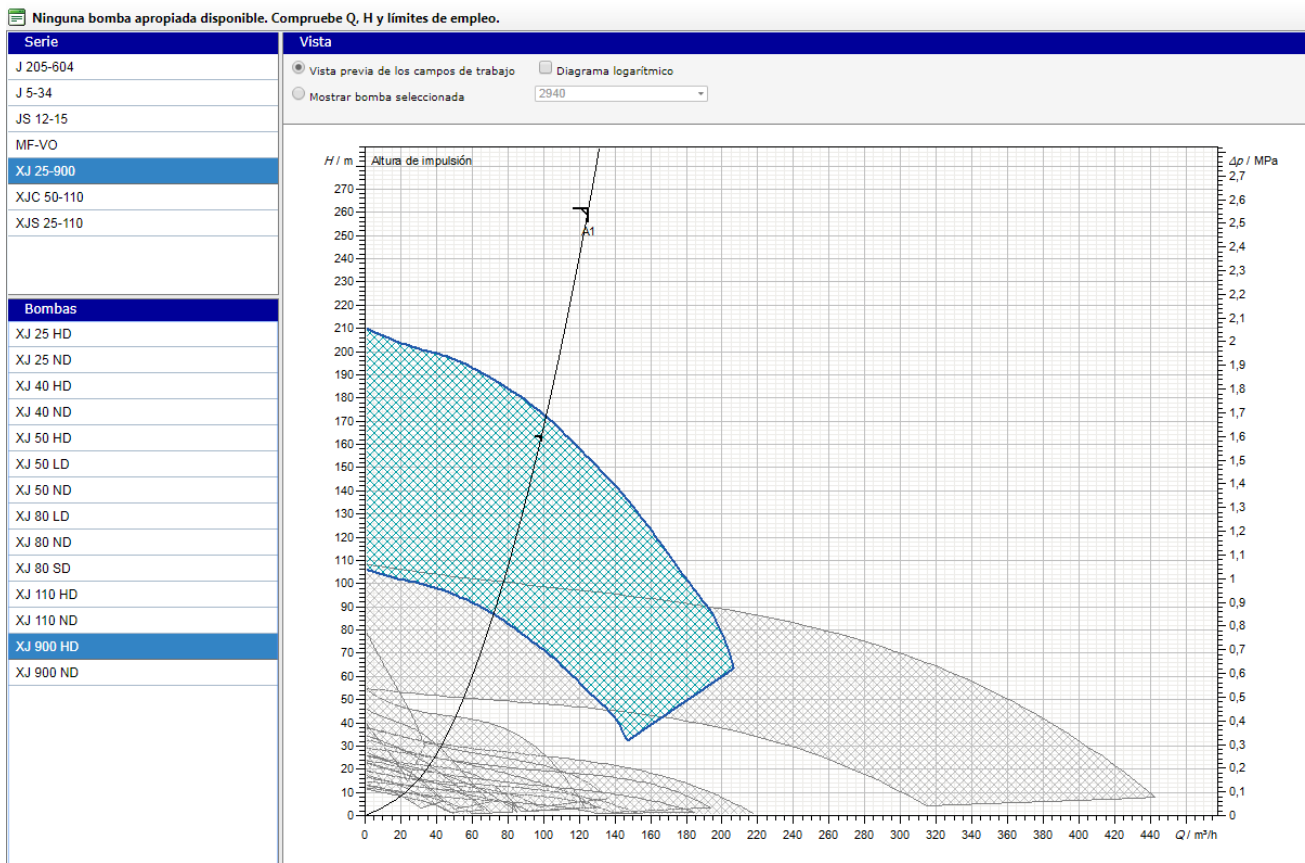


Figura 3.5: Rango de operación de las bombas disponibles. Fuente: Sulzer

La serie XJ 25-900 es la que permite alcanzar una mayor altura de impulsión, pero como se puede comprobar, se encuentra limitado a un máximo de 210 m (para el modelo XJ 900 HD). Por lo tanto, se descarta este fabricante de cara a la selección.

3.6 Mejor opción del fabricante Wilo

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 3.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de distribución	125	262	10

Tabla 3.1: Punto de operación para la bomba de distribución. Elaboración propia

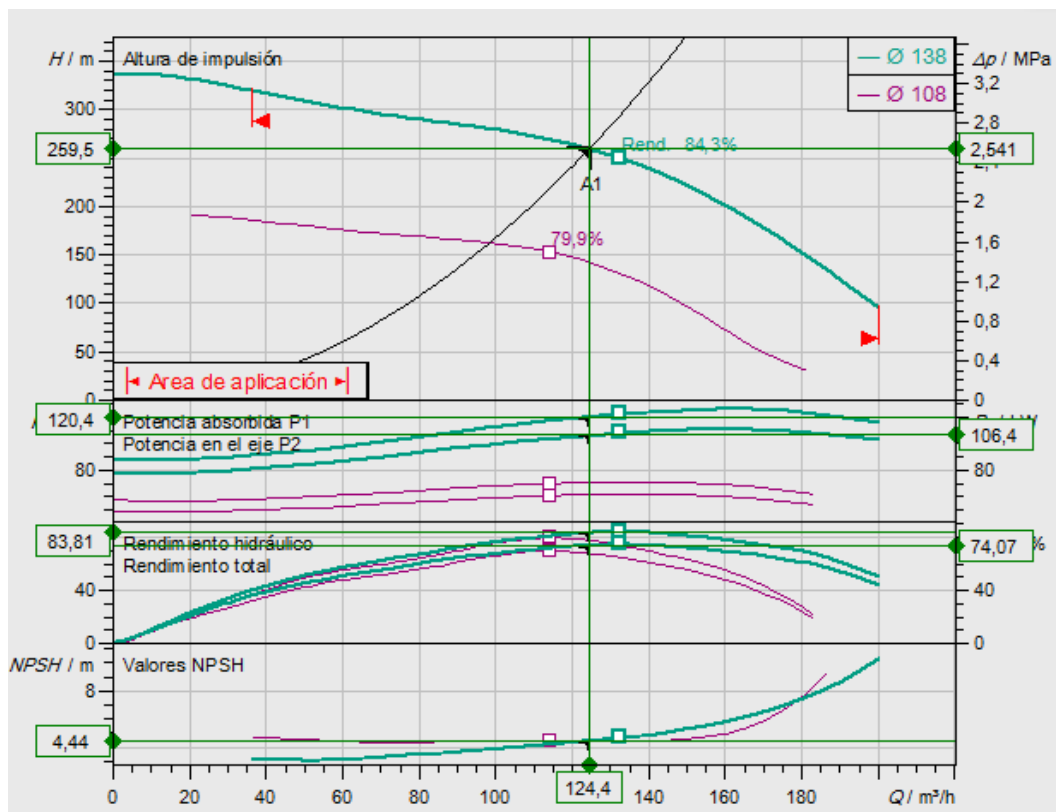


Figura 3.6: Curva característica de la bomba de distribución. Fuente: Wilo

La mejor opción de este fabricante es el modelo **K8.130** (fig. 3.6), que trabaja en el punto de operación $Q=124,4 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=259,5 \text{ m}$ (lo cual es aceptable teniendo en cuenta que se ha sobredimensionado ligeramente el sistema), y tiene las siguientes características (tabla 3.6). Su NPSHr es 4,44 m, que es inferior a $NPSHd=10 \text{ m}$ y por tanto no habrá cavitación:

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
120,4	106,4	74,07	83,81	88,4

Tabla 3.6: Características de la bomba de distribución. Fuente: Wilo

3.7 Selección final de la bomba de distribución

Fabricante	Modelo	Potencia absorbida [kW]	Rendimiento hidráulico [%]
Flowserve	MSM-125-B	114,8	77,6
Grundfos	CRN 125-10	112,5	84,1
KSB	RPHb 100-350/2	134,93	65,97
Lowara	MPA100A/04A/BD1320	126,4	76,1
Sulzer	-	-	-
Wilo	K8.130	120,4	83,81

Tabla 3.7: Resumen de los modelos consultados. Elaboración propia

Entre los resultados obtenidos (tabla 3.7), en base a la menor potencia absorbida y al mayor rendimiento hidráulico, se decide escoger la bomba **Grundfos CRN 125-10** (fig. 3.7), que trabajando en el punto de operación $Q=125,4 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=264 \text{ m}$ absorbe una potencia de 112,5 kW y tiene un rendimiento hidráulico de 84,1%.



Figura 3.7: Imagen real del modelo CRN 125-10 . Fuente: Grundfos

4. Selección de la bomba de alta presión

4.1 Mejor opción del fabricante Flowserve

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 4.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de alta presión	128	658	30

Tabla 4.1: Punto de operación para la bomba de alta presión. Elaboración propia

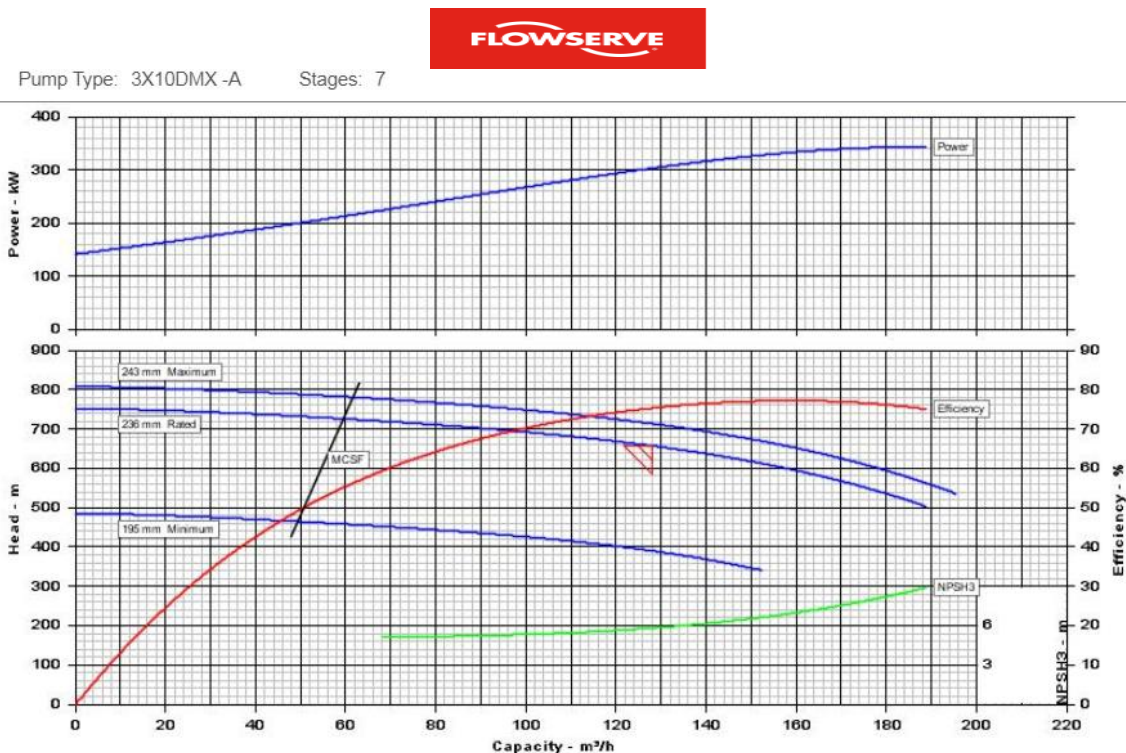


Figura 4.1: Curva característica de la bomba de alta presión. Fuente: Flowserve

La mejor opción de este fabricante es el modelo **3X10DMX-A** (figura 4.1), que trabaja en el punto de operación Q=128,2 m³/h, H=657,65 m y tiene las siguientes características (tabla 4.2). Su NPSHr es 5,9 m, que es inferior a NPSHd=30 m y por tanto no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
304	-	-	75,1	-

Tabla 4.2: Características de la bomba de alta presión. Fuente: Flowserve

4.2 Mejor opción del fabricante Grundfos

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 4.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de alta presión	128	658	30

Tabla 4.1: Punto de operación para la bomba de alta presión. Elaboración propia

Al introducir dicho punto de operación en el selector de bombas online del fabricante Grundfos, aparece el siguiente mensaje (fig. 4.2):

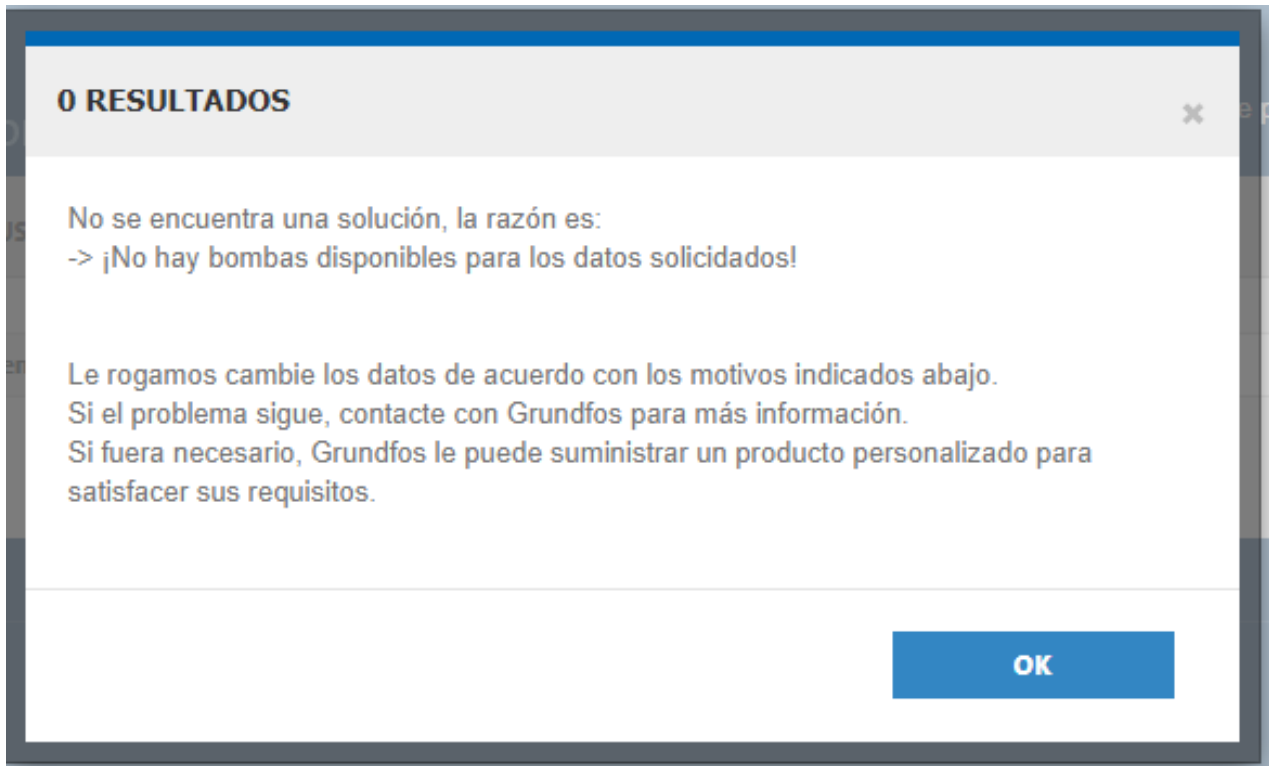


Figura 4.2: Mensaje de error en la búsqueda de bombas. Fuente: Grundfos

Como se puede comprobar, el fabricante no dispone de ninguna bomba que cumpla los criterios indicados. Por tanto, se descartará de cara a la selección.

4.3 Mejor opción del fabricante KSB

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 4.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de alta presión	128	658	30

Tabla 4.1: Punto de operación para la bomba de alta presión. Elaboración propia

Al introducir dicho punto de operación en el selector de bombas online del fabricante KSB, aparece el siguiente mensaje (fig. 4.3):

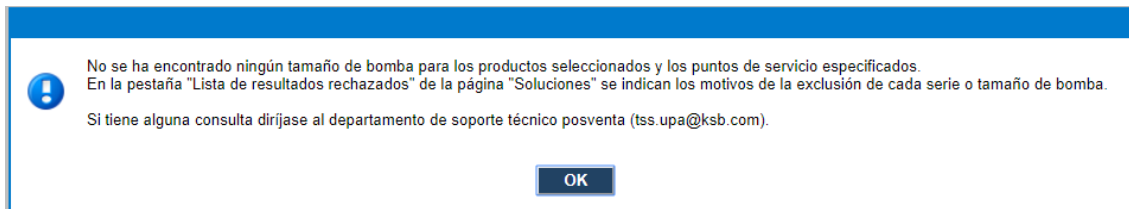


Figura 4.3: Mensaje de error en la búsqueda de bombas. Fuente: KSB

Como se puede comprobar, el fabricante no dispone de ninguna bomba que cumpla los criterios indicados. Por tanto, se descartará de cara a la selección.

4.4 Mejor opción del fabricante Lowara

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 4.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de alta presión	128	658	30

Tabla 4.1: Punto de operación para la bomba de alta presión. Elaboración propia

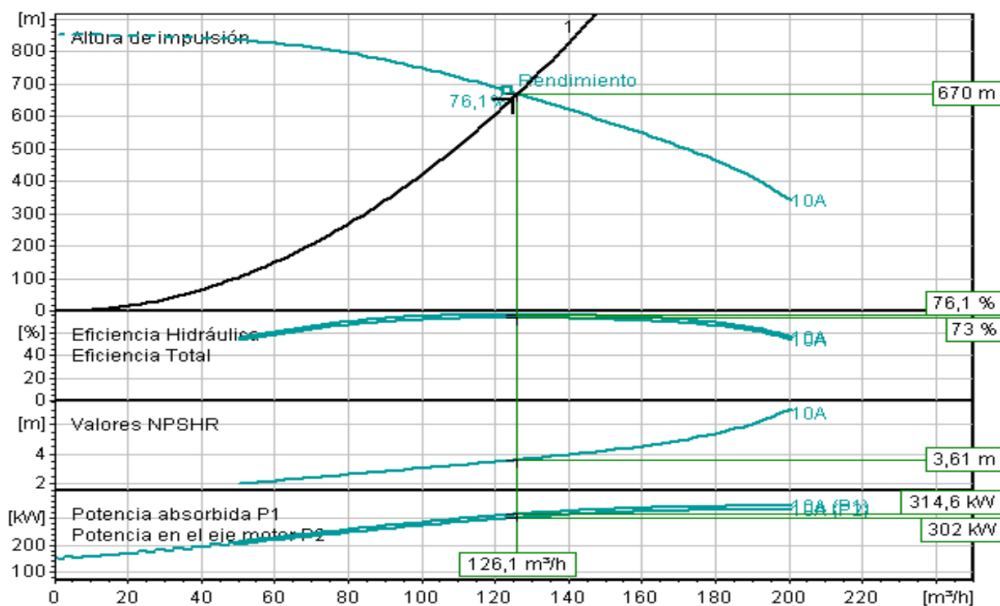


Figura 4.4: Curva característica de la bomba de alta presión. Fuente: Lowara

La mejor opción (no sumergible) de este fabricante es el modelo **MPAE100A/10A/BF3150** (fig. 4.4), que trabaja en el punto de operación $Q=126,1\text{m}^3/\text{h}$, $H=670\text{ m}$ y tiene las siguientes características (tabla 4.3). Su NPSHr es 3,61 m, que es inferior a $NPSHd=10\text{ m}$ y por tanto no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
314,6	302	73	76,1	95,9

Tabla 4.3: Características de la bomba de alta presión. Fuente: Lowara

4.5 Mejor opción del fabricante Sulzer

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 4.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de alta presión	128	658	30

Tabla 4.1: Punto de operación para la bomba de alta presión. Elaboración propia

Al introducir los valores del punto de operación en el selector online de bombas del fabricante Sulzer, aparece la siguiente ventana donde se indica que no hay ninguna bomba disponible (fig. 4.5):

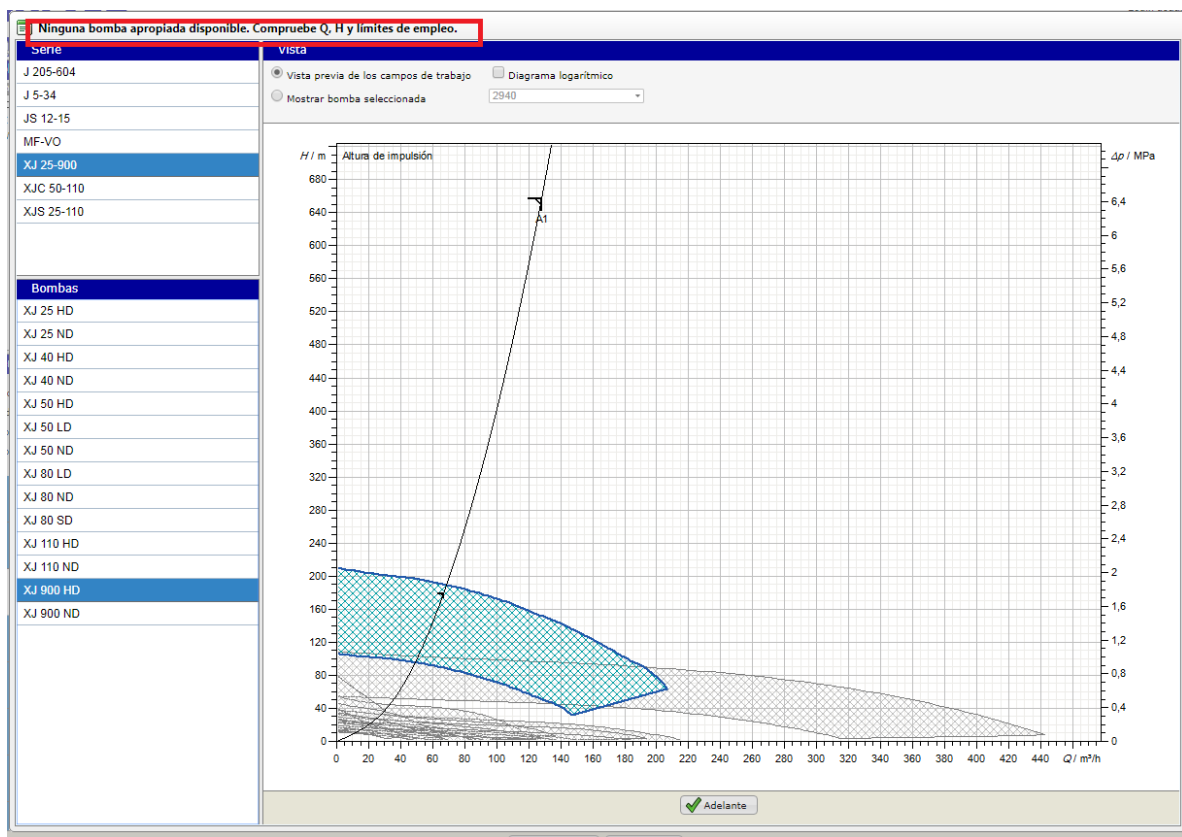


Figura 4.5: Rango de operación de bombas disponibles. Fuente: Sulzer

La serie XJ 25-900 es la que permite alcanzar una mayor altura de impulsión, pero como se puede comprobar, se encuentra limitado a un máximo de 210 m (para el modelo XJ 900 HD). Por lo tanto, se descarta este fabricante de cara a la selección.

4.6 Mejor opción del fabricante Wilo

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 4.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de alta presión	128	658	30

Tabla 4.1: Punto de operación para la bomba de alta presión. Elaboración propia

Al introducir dicho punto de operación en el selector de bombas online del fabricante Wilo, aparece el siguiente mensaje:

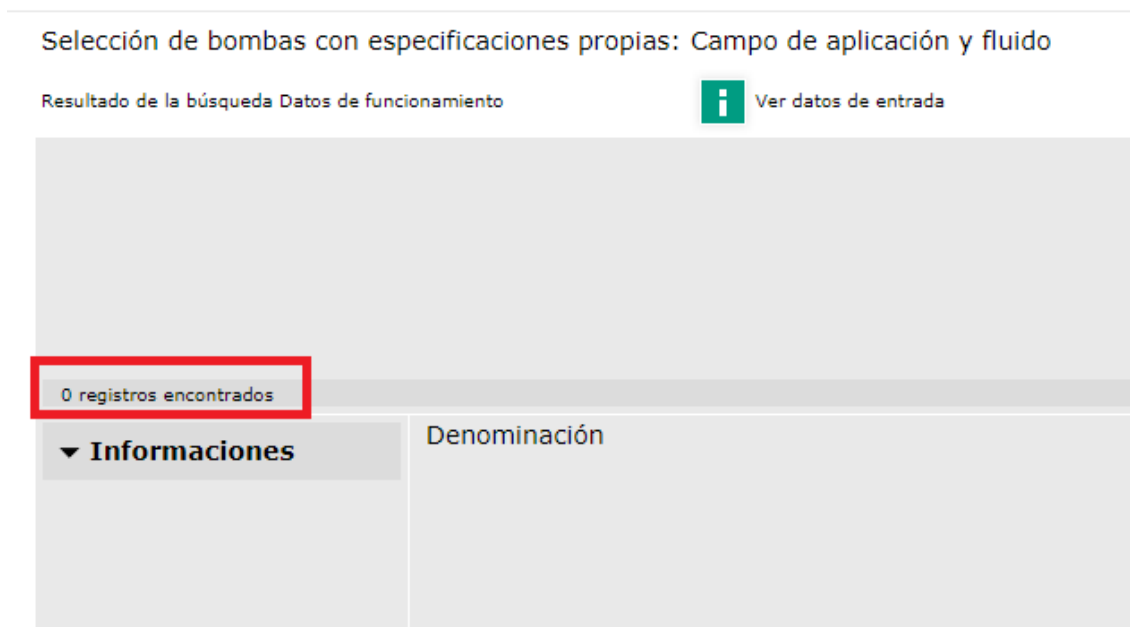


Figura 4.6: Mensaje de error en la búsqueda de bombas. Fuente: Wilo

Como se puede comprobar, el fabricante no dispone de ninguna bomba que cumpla los criterios indicados. Por tanto, se descartará de cara a la selección.

4.7 Selección final de la bomba de alta presión

Fabricante	Modelo	Potencia absorbida [kW]	Rendimiento hidráulico [%]
Flowserve	3X10DMX -A	304	75,4
Grundfos	-	-	-
KSB	-	-	-
Lowara	MPAE100A/10A/	314,6	76,1
Sulzer	-	-	-
Wilo	-	-	-

Tabla 4.4: Resumen de los modelos consultados. Elaboración propia

Entre los resultados obtenidos (tabla 4.4) Se selecciona la bomba con menor potencia absorbida: **Flowserve 3X10DMX –A** (fig. 4.7), que trabajando en el punto de operación $Q=128,2 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=657,65 \text{ m}$ absorbe una potencia de 298 kW con un rendimiento del motor de 75,4% sin producir cavitación

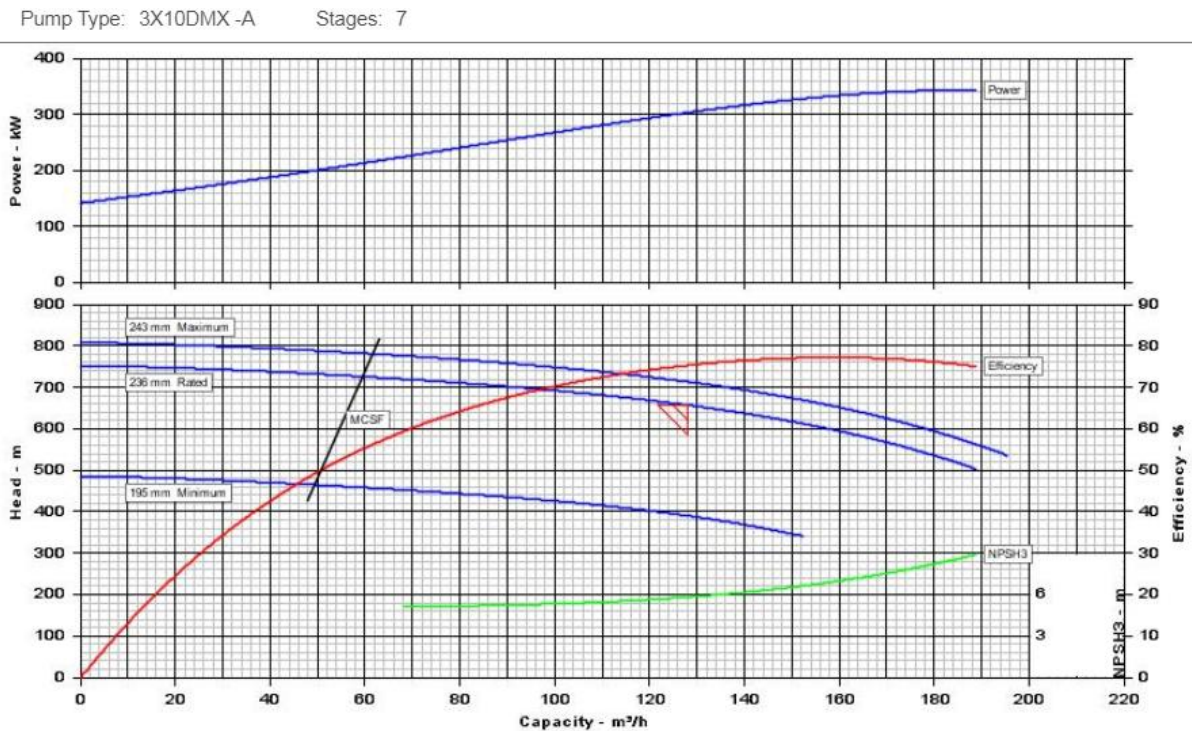


Figura 4.7: Curva característica de la bomba de alta presión. Fuente: Flowserve

5. Selección de la bomba Booster

5.1 Mejor opción del fabricante Flowserve

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 5.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bomba Booster	151	20	656

Tabla 5.1: Punto de operación para la bomba Booster. Elaboración propia

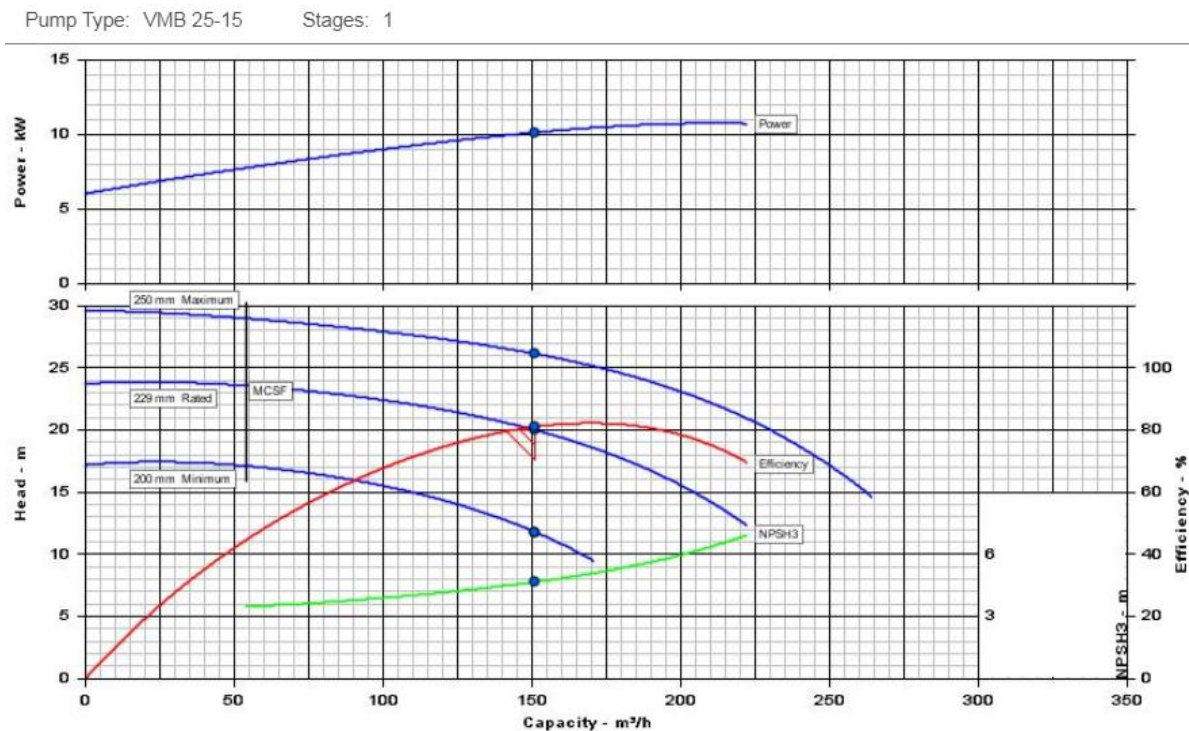


Figura 5.1: Curva característica de la bomba Booster. Fuente: Flowserve

La mejor opción de este fabricante es el modelo **VMB 25-15** (fig. 5.1), que trabaja en el punto de operación $Q=151 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=20 \text{ m}$ y tiene las siguientes características (tabla 5.2). Su NPSHr es 4,7 m, que es inferior a $NPSHd=656 \text{ m}$ y por tanto no habrá cavitación:

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
10,1	8,21	-	81,1	-

Tabla 5.2: Características de la bomba Booster. Fuente: Flowserve

5.2 Mejor opción del fabricante Grundfos

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 5.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bomba Booster	151	20	656

Tabla 5.1: Punto de operación para la bomba Booster. Elaboración propia

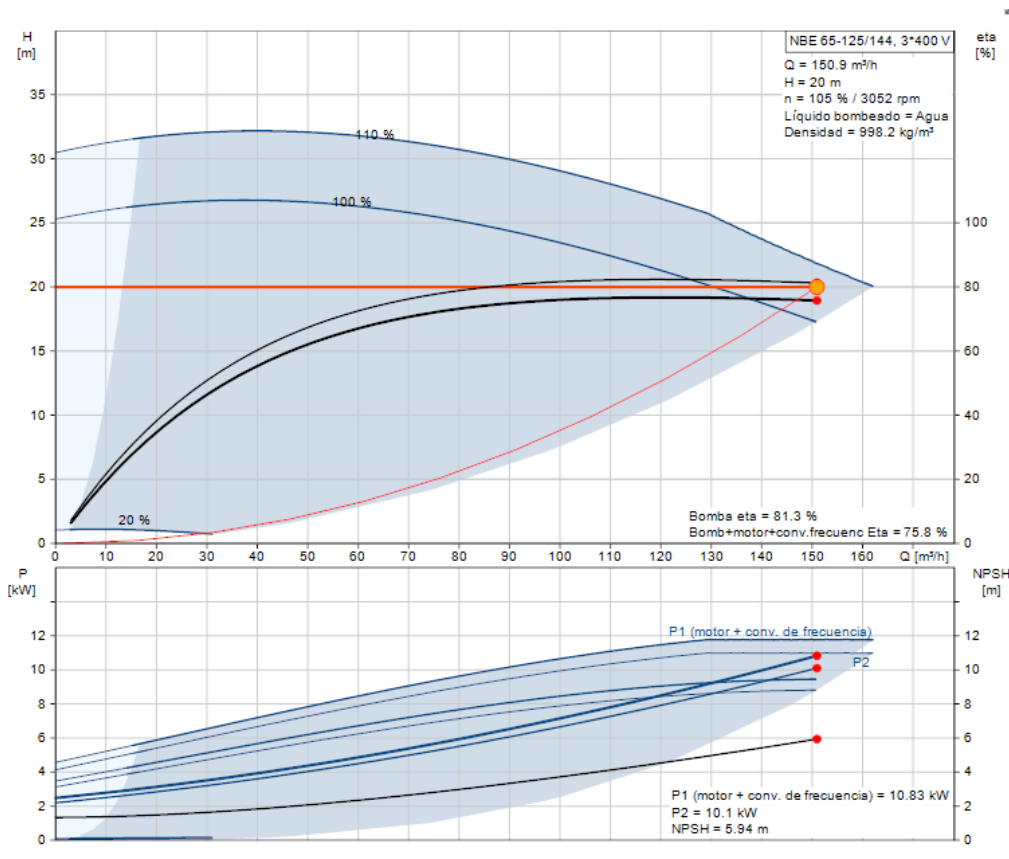


Figura 5.2: Curva característica de la bomba Booster. Fuente: Grundfos

La mejor opción de este fabricante es el modelo **NBE 65-125/144** (fig. 5.2), que trabaja en el punto de operación Q=153 m³/h, H=20 m y tiene las siguientes características (tabla 5.3). Su NPSHr es 5,94 m, que es inferior a NPSHd=656 m y por tanto no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
10,83	10,1	75,8	81,3	93,2

Tabla 5.3: Características de la bomba Booster. Fuente: Grundfos

5.3 Mejor opción del fabricante KSB

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 5.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bomba Booster	151	20	656

Tabla 5.1: Punto de operación para la bomba Booster. Elaboración propia

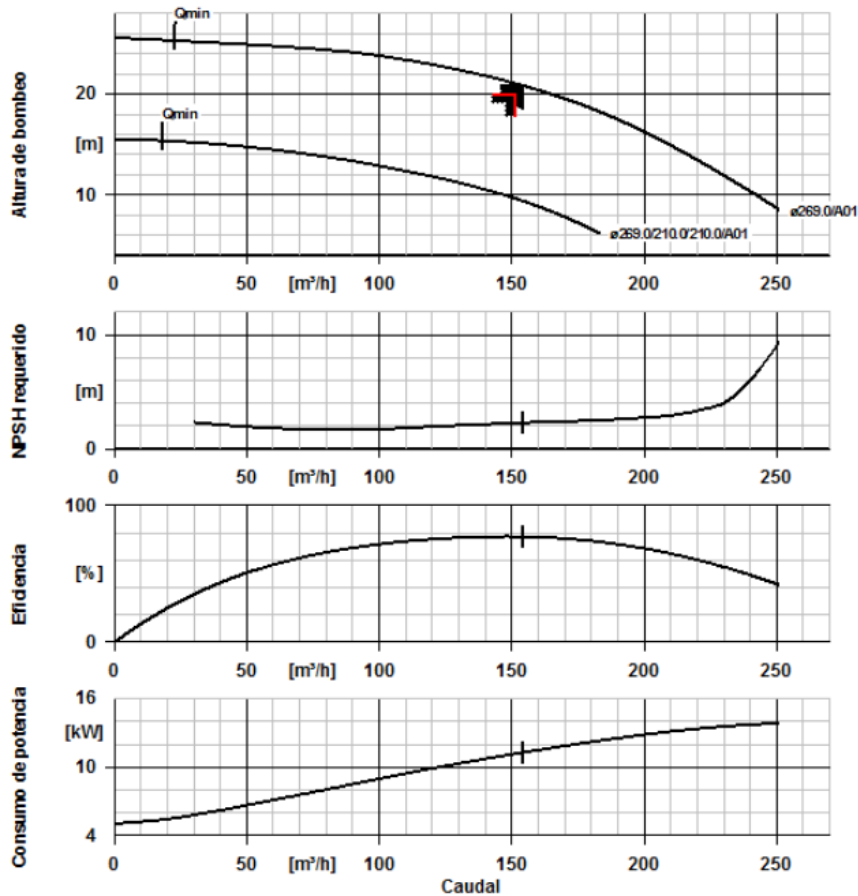


Figura 5.3: Curva característica de la bomba Booster. Fuente: KSB

La mejor opción de este fabricante es el modelo **Etaline 125-125-150** (fig. 5.3), que trabaja en el punto de operación $Q=154,18 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=20,85 \text{ m}$ y tiene las siguientes características (tabla 5.4). Su NPSHr es 7,48 m, que es inferior a $NPSHd=656 \text{ m}$ y por tanto no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
11,31	-	-	77,26	-

Tabla 5.4: Características de la bomba Booster. Fuente: KSB

5.4 Mejor opción del fabricante Lowara

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 5.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bomba Booster	151	20	656

Tabla 5.1: Punto de operación para la bomba Booster. Elaboración propia

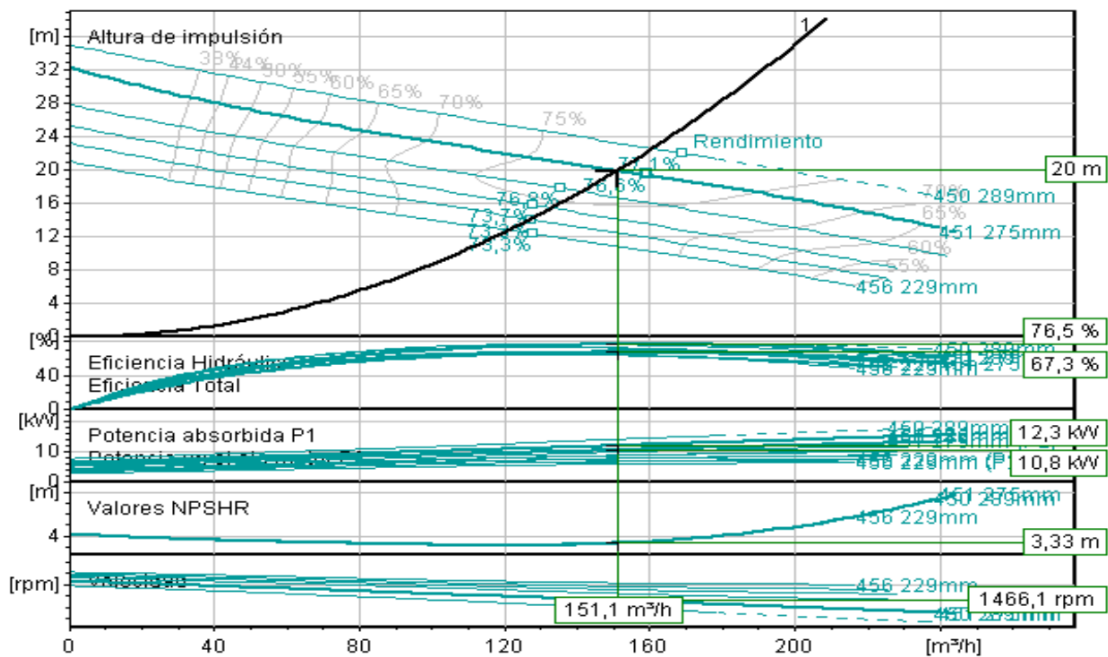


Figura 5.4: Curva característica de la bomba Booster. Fuente: Lowara

La mejor opción de este fabricante es el modelo **NP 3153 HT 3** (fig. 5.4), que trabaja en el punto de operación $Q=151,1 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=20 \text{ m}$ y tiene las siguientes características (tabla 5.5). Su NPSHr es 3,33 m, que es inferior a $NPSHd=656 \text{ m}$ y por tanto no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
12,3	10,8	67,3	76,5	87,8

Tabla 5.5: Características de la bomba Booster. Fuente: Lowara

5.5 Mejor opción del fabricante Sulzer

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 5.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bomba Booster	151	20	656

Tabla 5.1: Punto de operación para la bomba Booster. Elaboración propia

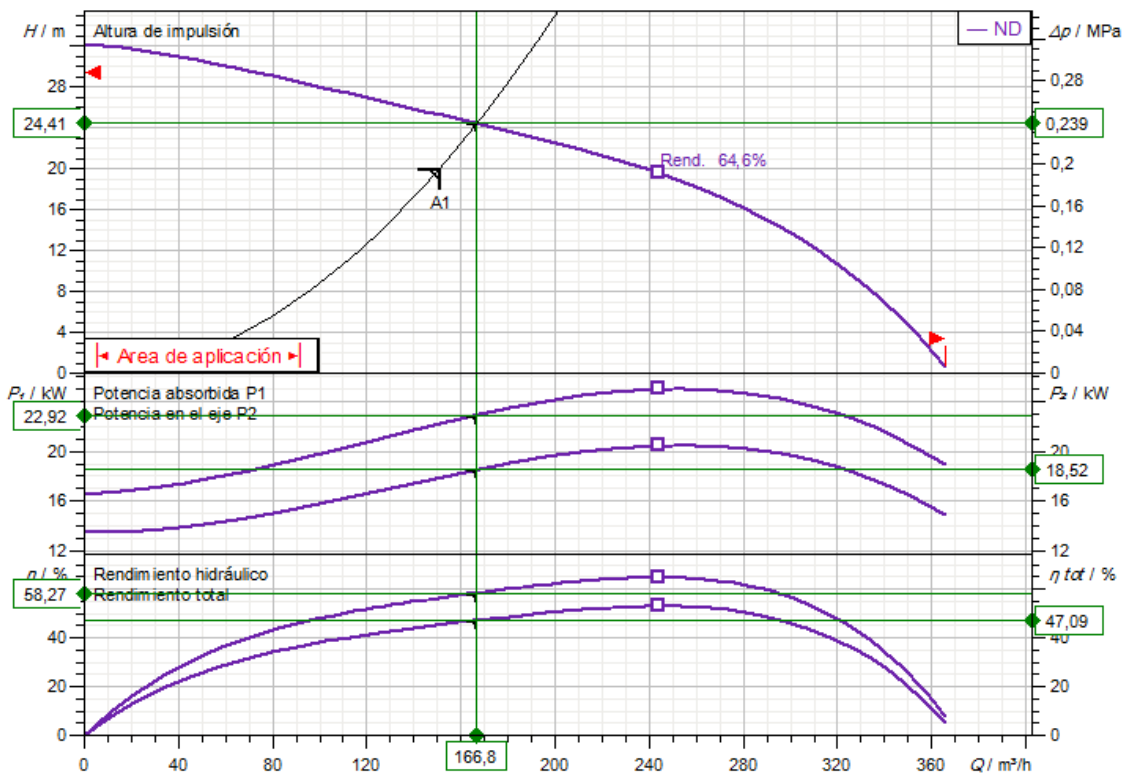


Figura 5.5: Curva característica de la bomba Booster. Fuente: Sulzer

La mejor opción de este fabricante es el modelo **J 205 ND** (fig. 5.5), que trabaja en el punto de operación $Q=168,8 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=24,41 \text{ m}$ y tiene las siguientes características (tabla 5.6). Su NPSHr no está indicado en la ficha técnica del producto, pero dada la magnitud del NPSHd, casi que con toda seguridad no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
12,3	10,8	67,3	76,5	87,8

Tabla 5.6: Características de la bomba Booster. Fuente: Sulzer

5.6 Mejor opción del fabricante Wilo

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 5.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bomba Booster	151	20	656

Tabla 5.1: Punto de operación para la bomba Booster. Elaboración propia

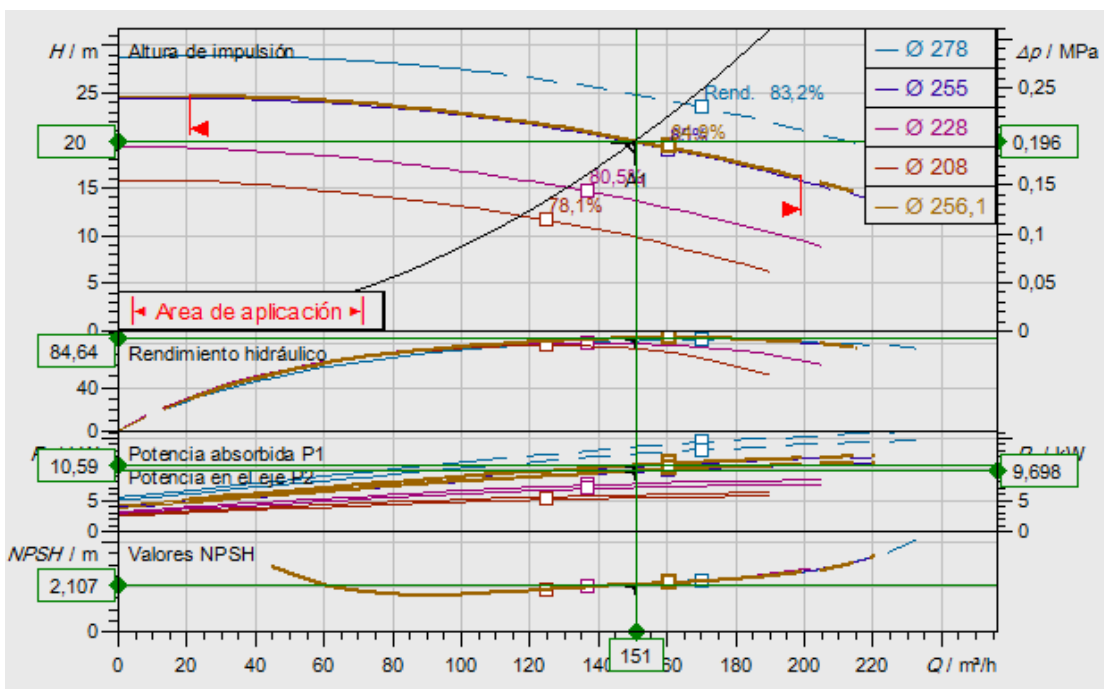


Figura 5.6: Curva característica de la bomba Booster. Fuente: Flowserve

La mejor opción de este fabricante es el modelo **Atmos GIGA-N 100/250-11/4** (fig. 5.6), que trabaja en el punto de operación Q=151 m³/h, H=20 m y tiene las siguientes características (tabla 5.7). Su NPSHr es 2,107 m, que es inferior a NPSHd=656 m y por tanto no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
10,59	9,698	77,5	84,64	91,6

Tabla 5.7: Características de la bomba Booster. Fuente: Wilo

5.7 Selección final de la bomba booster

Fabricante	Modelo	Potencia absorbida [kW]	Rendimiento hidráulico [%]
Flowserve	VMB 25-15	10,1	81,1
Grundfos	NBE 65-125/144	10,83	81,3
KSB	Etaline 100-100-125	11,31	77,26
Lowara	NP 3153 HT 3	12,3	76,5
Sulzer	J 205 ND	22,92	58,27
Wilo	Atmos GIGA-N 100/250-11/4	10,59	84,64

Tabla 5.8: Resumen de los modelos consultados. Elaboración propia

A partir de los modelos consultados (tabla 5.8), en base a la menor potencia absorbida, se selecciona la bomba **Flowserve VMB 25-15** (fig. 5.7), que trabajando en el punto de operación $Q=151 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=20\text{m}$ absorbe una potencia de 10,1 kW con un rendimiento del motor de 81,1% sin producir cavitación.

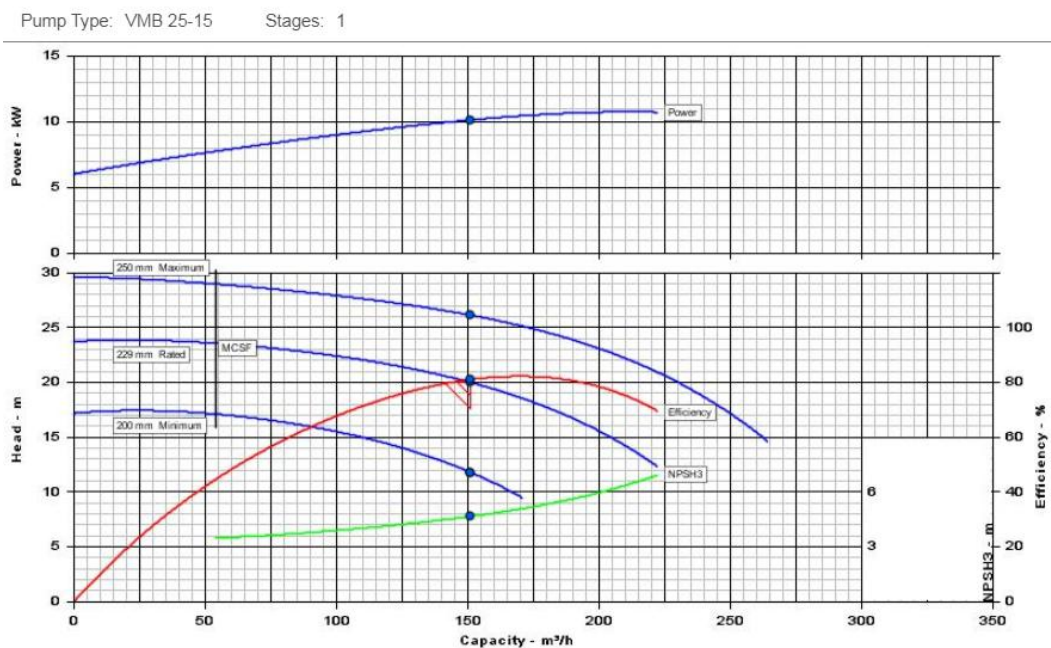


Figura 5.7: Curva característica del modelo seleccionado. Fuente: Flowserve

6. Selección de la bomba de postratamiento

6.1 Mejor opción del fabricante Flowserve

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 6.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de postratamiento	125	21	10

Tabla 6.1: Punto de operación para la bomba de postratamiento. Elaboración propia

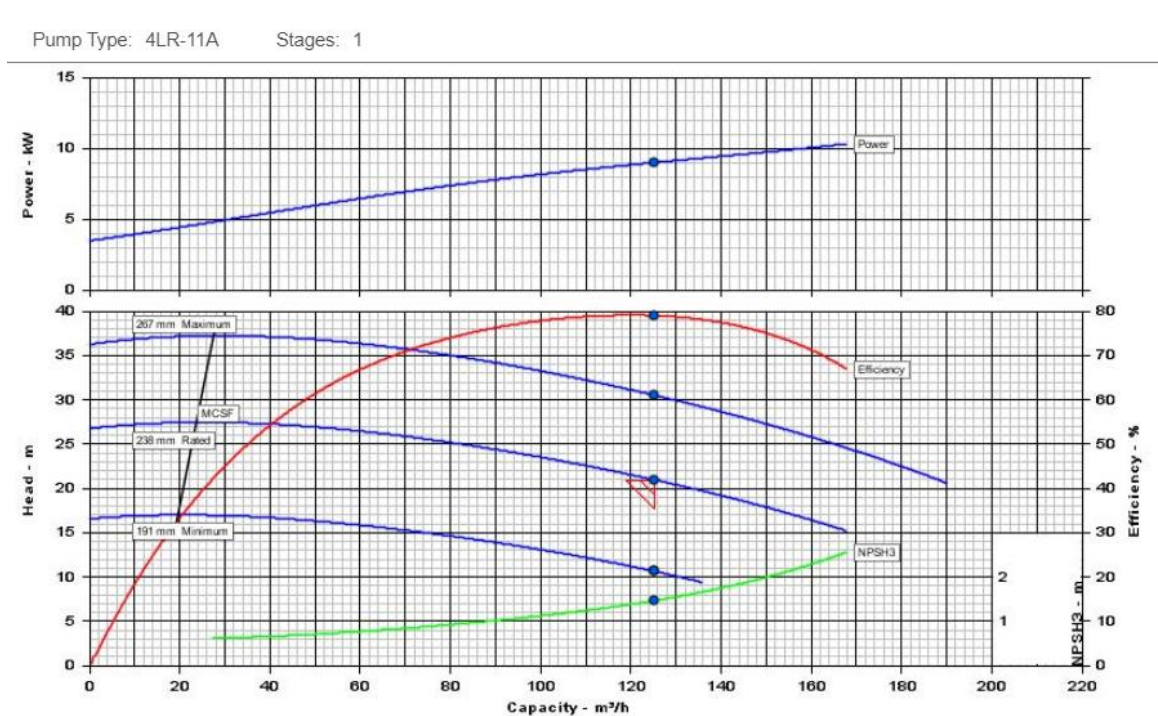


Figura 6.1: Curva característica de la bomba de postratamiento. Fuente: Flowserve

La mejor opción de este fabricante es el modelo 4LR-11A (fig. 6.1), que trabaja en el punto de operación $Q=125,1 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=20,99 \text{ m}$ y tiene las siguientes características (tabla 6.2). Su NPSHr es 4,7m, que es inferior a $NPSHd=10 \text{ m}$ y por tanto no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
9,02	7,14	-	79,1	-

Tabla 6.2: Características de la bomba de postratamiento. Fuente: Flowserve

6.2 Mejor opción del fabricante Grundfos

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 6.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de postratamiento	125	21	10

Tabla 6.1: Punto de operación para la bomba de postratamiento. Elaboración propia

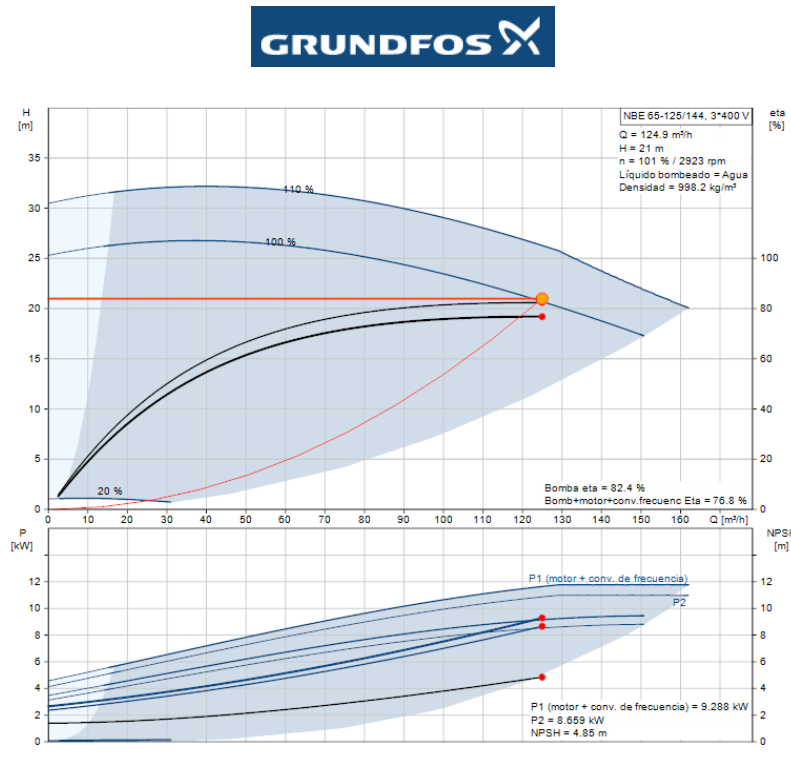


Figura 6.2: Curva característica de la bomba de postratamiento. Fuente: Grundfos

La mejor opción de este fabricante es el modelo **NBE 65-125/144** (fig. 6.2), que trabaja en el punto de operación Q=125 m³/h, H=21 m y tiene las siguientes características (tabla 6.3). Su NPSHr es 4,85 m, que es inferior a NPSHd=10 m y por tanto no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
9,288	8,659	76,8	82,4	93,2

Tabla 6.3: Características de la bomba de postratamiento. Fuente: Grundfos

6.3 Mejor opción del fabricante KSB

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 6.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de postratamiento	125	21	10

Tabla 6.1: Punto de operación para la bomba de postratamiento. Elaboración propia

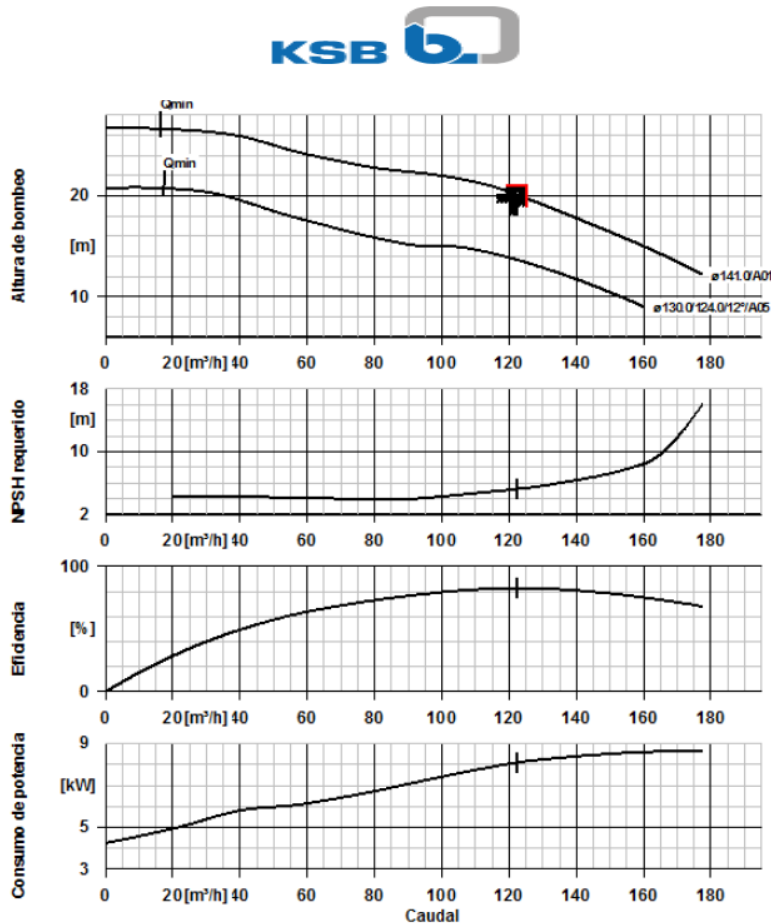


Figura 6.3: Curva característica de la bomba de postratamiento. Fuente: KSB

La mejor opción de este fabricante es el modelo **Etaline 100-100-125** (fig. 6.3), que trabaja en el punto de operación Q=122,3 m³/h, H=20,1 m y tiene las siguientes características (tabla 6.4). Su NPSHr es 5,26 m, que es inferior a NPSHd=10 m y por tanto no habrá cavitación

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
8,1	-	-	82,8	-

Tabla 6.4: Características de la bomba de postratamiento. Fuente: KSB

6.4 Mejor opción del fabricante Lowara

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 6.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de postratamiento	125	21	10

Tabla 6.1: Punto de operación para la bomba de postratamiento. Elaboración propia

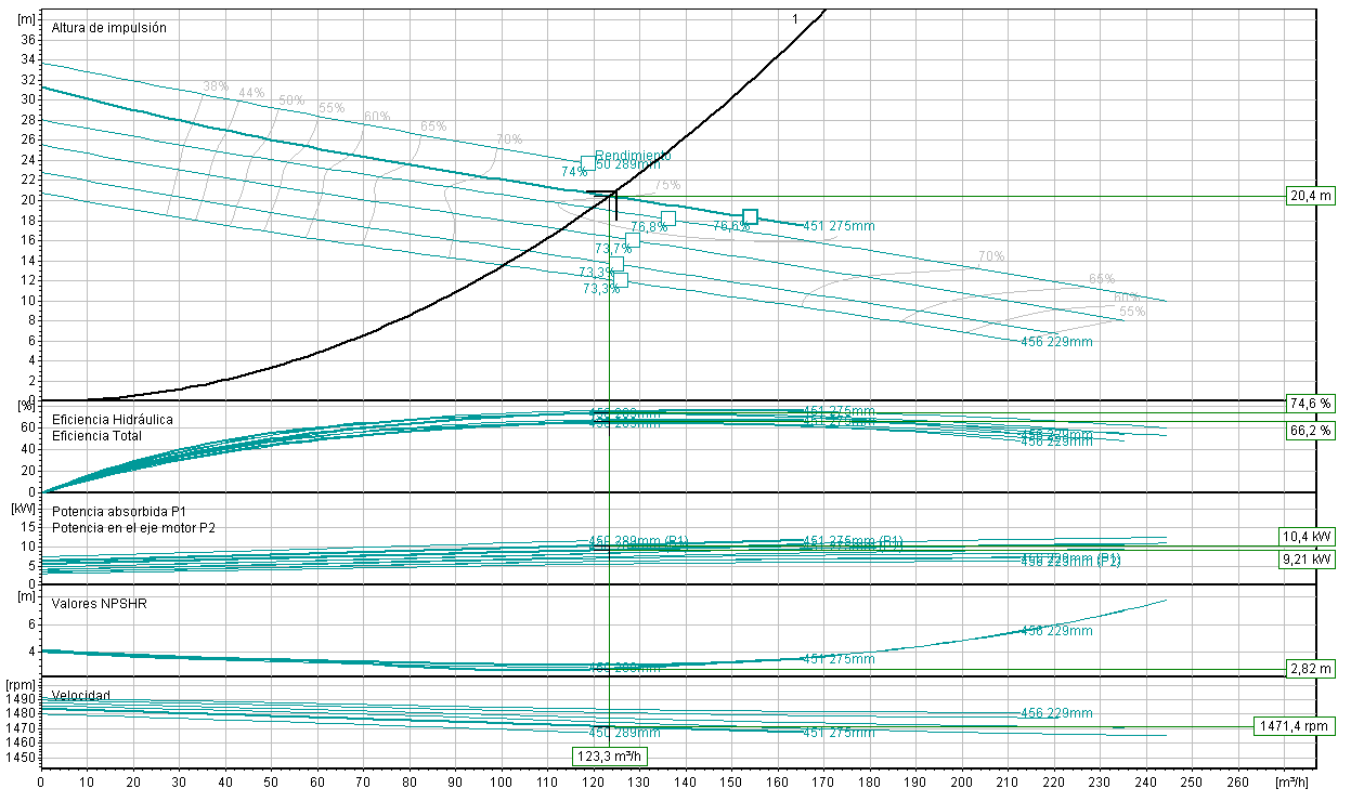


Figura 6.4: Curva característica de la bomba de postratamiento. Fuente: Lowara

La mejor opción de este fabricante es el modelo **NP 3153 HT 3** (fig. 6.4), que trabaja en el punto de operación Q=123,3 m³/h, H=20,4 m y tiene las siguientes características (tabla 6.5). Su NPSHr es 2,82 m, que es inferior a NPSHd=10 m y por tanto no habrá cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
10,4	9,21	66,2	74,6	88,7

Tabla 6.5: Características de la bomba de postratamiento. Fuente: Lowara

6.5 Mejor opción del fabricante Sulzer

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 6.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de postratamiento	125	21	10

Tabla 6.1: Punto de operación para la bomba de postratamiento. Elaboración propia

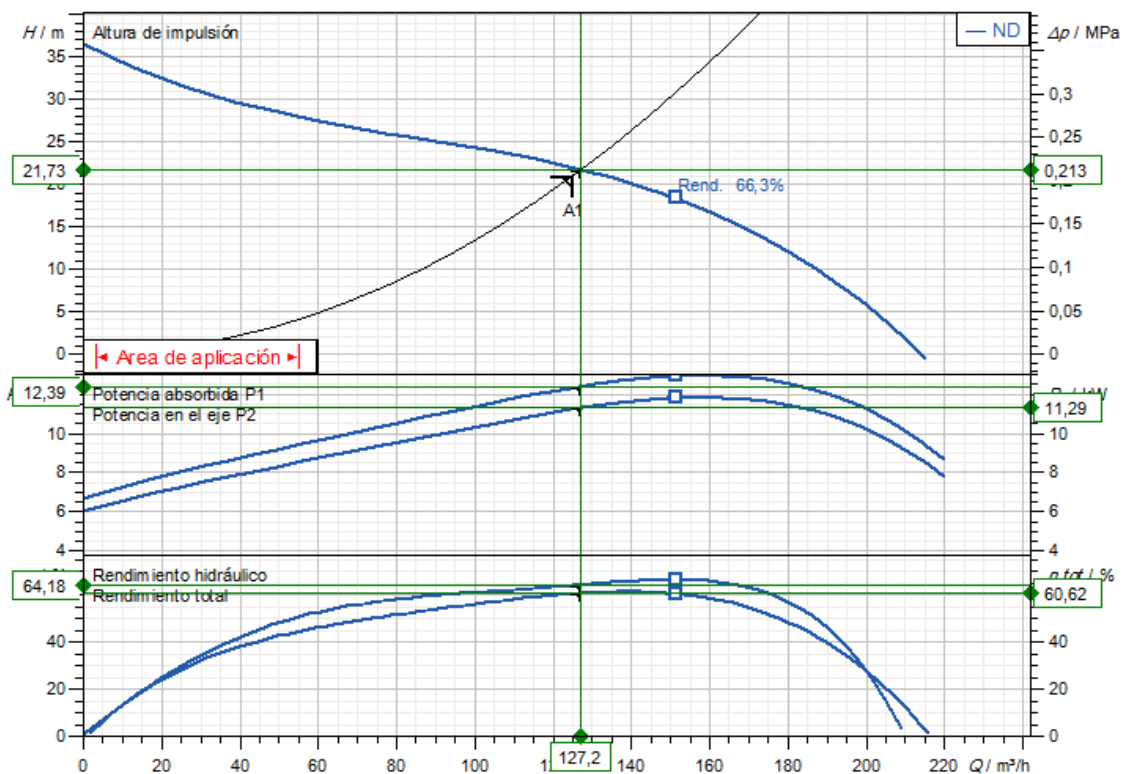


Figura 6.5: Curva característica de la bomba de postratamiento. Fuente: Sulzer

La mejor opción de este fabricante es el modelo **XJC 110 ND** (fig. 6.5), que trabaja en el punto de operación $Q=127,2 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=21,73 \text{ m}$ y tiene las siguientes características (tabla 6.6). Su NPSHr no se encuentra indicado por el fabricante en la ficha técnica del producto y por tanto no se puede saber con seguridad si habrá o no cavitación.

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
12,39	11,29	60,62	64,18	94,4

Tabla 6.6: Características de la bomba de postratamiento. Fuente: Sulzer

6.6 Mejor opción del fabricante Wilo

Se recuerda el punto de operación necesario (tabla 6.1):

	Q [m ³ /h]	Hb [m]	NPSHd [m]
Bombas de postratamiento	125	21	10

Tabla 6.1: Punto de operación para la bomba de postratamiento. Elaboración propia

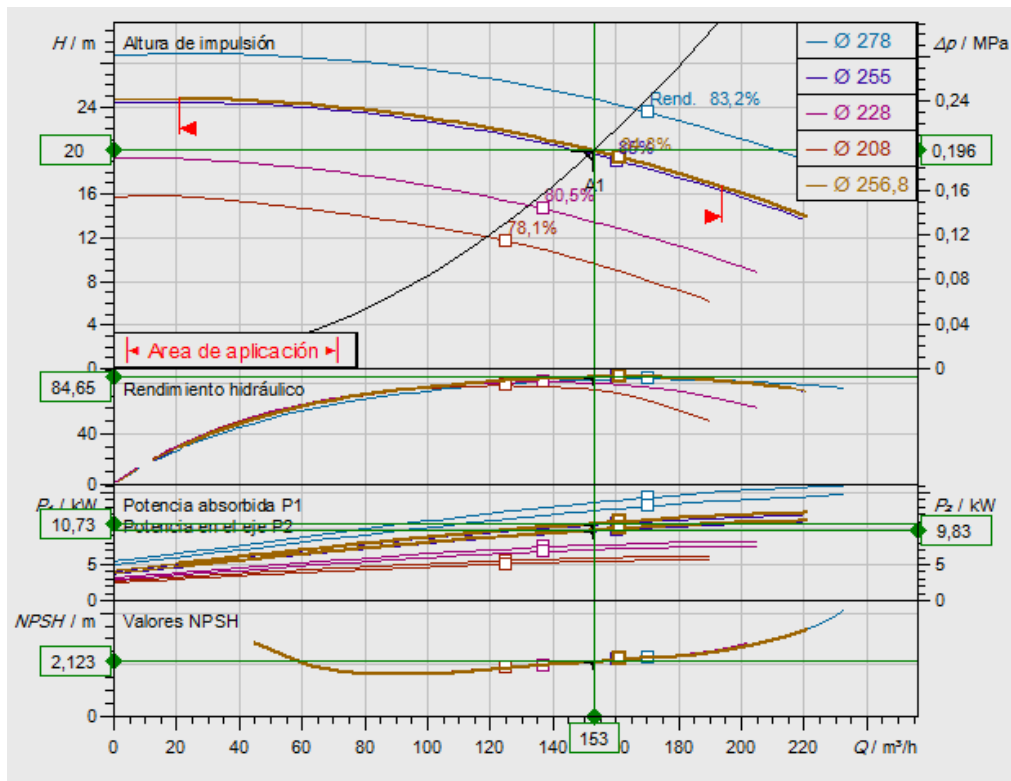


Figura 6.6: Curva característica de la bomba de postratamiento. Fuente: Wilo

La mejor opción de este fabricante es el modelo **Atmos GIGA-N 100/250-11/4** (fig. 6.6), que trabaja en el punto de operación Q=153 m³/h, H=20 m y tiene las siguientes características (tabla 6.7). Su NPSHr es 2,123 m, que es inferior a NPSHd=656 m y por tanto no habrá cavitación

Potencia absorbida [kW]	Potencia en el eje [kW]	Rendimiento total [%]	Rendimiento hidráulico [%]	Eficiencia del motor [%]
10,73	9,83	77,54	84,65	91,6

Tabla 6.7: Características de la bomba de postratamiento. Fuente: Wilo

6.7 Selección final de la bomba de postratamiento

Fabricante	Modelo	Potencia absorbida [kW]	Rendimiento hidráulico [%]
Flowserve	4LR-11A	9,02	79,1
Grundfos	NBE 65-125/144	9,288	82,4
KSB	Etaline 100-100-125	8,1	82,8
Lowara	NP 3153 HT 3	10,4	74,6
Sulzer	XJC 110 ND	12,39	64,18
Wilo	Atmos GIGA-N 100/250-11/4	10,73	84,65

Tabla 6.8: Resumen de los modelos consultados. Elaboración propia

Respecto a los modelos consultados (tabla 6.8), en base a la menor potencia absorbida, se selecciona la bomba **Flowserve 4LR-11A** (fig. 6.7), que trabajando en el punto de operación $Q=125,1 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=20,99 \text{ m}$ absorbe una potencia de 10,2 kW con un **rendimiento del motor de 81,4% sin producir cavitación**.

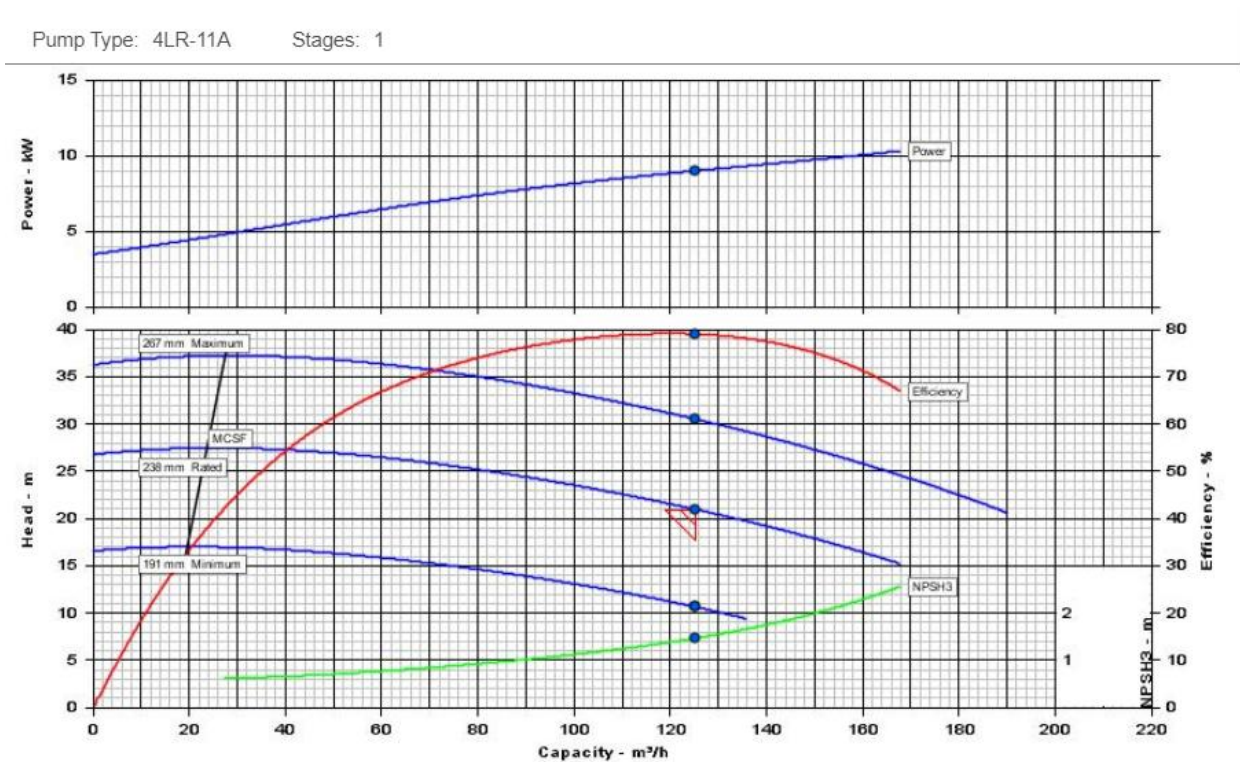


Figura 6.7: Curva característica de la bomba de postratamiento. Fuente: Flowserve

7. Resumen de bombas seleccionadas

Se muestra a continuación un resumen final (tabla 7.1) con el fabricante y modelo de bomba para cada uno de los sistemas, junto con los principales parámetros: la potencia absorbida y el rendimiento hidráulico. Se ha comprobado que ninguna de estas bombas producirá cavitación. Se recuerda, además, que para el caso del sistema de alimentación, son necesarias un total de 3 bombas (del mismo modelo) para cubrir cada uno de los pozos – si bien solo dos actuarán simultáneamente, actuando la tercera como reserva. En el anexo VIII puede encontrarse la correspondiente ficha técnica de cada una de las bombas seleccionadas.

Sistema	Fabricante	Modelo	Potencia absorbida [kW]	Rendimiento hidráulico [%]
Alimentación (x3)	KSB	UPAS 250-135	48,92	83,5
Distribución	Grundfos	CRN 125-10	112,5	84,1
Alta presión	Flowserve	3X10DMX -A	304	75,4
Booster	Flowserve	VMB 25-15	10,1	81,1
Postratamiento	Flowserve	4LR-11A	9,02	79,1
Rechazo	No es necesaria ninguna bomba para el rechazo de salmuera ($H_b < 0$)			

Tabla 7.1: Resumen de los modelos seleccionados para el sistema de bombeo. Elaboración propia



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

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO VII:

**DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE
ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA**

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

**DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA
ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES**

Autor: Alexander Hernández García

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Índice de contenidos

1. Justificación del empleo de un parque eólico como sistema de abastecimiento de energía	1
2. Consumo de energía final de la EDAM	1
3. Estudio del recurso eólico	3
3.1 Distribución de Weibull	3
3.2 Orientación del aerogenerador.....	5
2.3 Curva de potencia	7
4. Selección de aerogeneradores actualmente disponibles en el mercado.....	8
4.1 Lista completa de los modelos disponibles según ITC	8
4.2 Análisis de los modelos actualmente disponibles en el mercado.....	12
4.2.1 Potencia nominal	12
4.2.2 Energía generada anual.....	12
4.2.3 Comparación por exceso energético respecto a EDAM	15
4.3.4 Comparación por factor de carga	16
4.3.5 Discusión de resultados y selección final.....	17
4.3.6 Comprobación de cumplimiento de normativa.....	18
4.3.7 Características del modelo de aerogenerador seleccionado	20
5. Posibles vías de aprovechamiento del exceso energético ..	23
5.1 Vender exceso energético a la red.....	23
5.2 Generación de hidrógeno	23
5.3 Bombeo hidráulico	23
5.4 Aire comprimido	24
5.5 Disipación de energía.....	24

Índice de figuras

Figura 2.1: Resumen del consumo del sistema OI. Fuente: LewaPlus	3
Figura 3.1: Coordenadas y constantes de Weibull del parque eólico. Fuente: Grafcan.....	4
Figura 3.2: Relación entre velocidad del viento y su probabilidad según Weibull. Elaboración propia.....	5
Figura 3.3: Dirección predominante del viento. Fuente: ITC.....	5
Figura 3.4: Dirección predominante del viento tabulado. Fuente: ITC.....	6
Figura 3.5: Dirección predominante del viento. Fuente: Global Wind Atlas.....	7
Figura 3.6: Interfaz de la herramienta para la estimación de energía de un aerogenerador. Fuente: ITC.....	7
Figura 3.7: Ejemplo de los modelos disponibles para seleccionar. Fuente: ITC	8
Figura 4.1: Información sobre la disponibilidad de los modelos. Fuente: TheWindPower.net.....	9
Figura 4.2: Energía anual estimada para la mínima altura de la góndola, Enercon E-44. Fuente: ITC	13
Figura 4.3: Energía anual estimada para la máxima altura de la góndola, Enercon E-44. Fuente: ITC	13
Figura 4.4: Distancia de los aerogeneradores entre sí, Fuente: Grafcan	18
Figura 4.5: Distancia de los aerogeneradores respecto al núcleo habitado más cercano, Fuente: Grafcan.....	19
Figura 4.6: Curva de potencia de Enercon E44/900 Fuente: TheWindPower.net	21
Figura 4.7: Curva de potencia de Enercon E44/900 Fuente: TheWindPower.net	21
Figuras 4.8 (izq) y 4.9 (dcha): Fotografías del modelo Enercon E44/900 Fuente: TheWindPower.net.....	22
Figuras 4.10 (izq) y 4.11 (dcha): Fotografías del modelo Enercon E44/900 Fuente: TheWindPower.net.....	22

Índice de tablas

Tabla 2.1: Consumo de energía de la instalación. Elaboración propia.....	1
Tabla 2.2: Resumen del consumo de las bombas consideradas por LewaPlus. Elaboración propia	2
Tabla 2.3: Comparación entre el consumo necesario según LewaPlus y fabricantes. Elaboración propia.....	2
Tabla 3.1: Relación entre velocidad del viento y su probabilidad según Weibull. Fuente: Elaboración propia	4
Tabla 4.1: Modelos disponibles (amarillo) y no disponibles (blanco) del ITC. Fuente: TheWindPower.net.....	11
Tabla 4.2: Información sobre la potencia nominal y altura de la góndola. Fuente: TheWindPower.net.....	12
Tabla 4.3: Energía anual estimada para cada modelo de aerogenerador. Fuente: ITC.....	12
Tabla 4.4: Energía generada por el aerogenerador respecto lo que necesita la EDAM. Elaboración propia	14
Tabla 4.5: Ajuste de unidades para garantizar exceso energético. Elaboración propia.....	14
Tabla 4.6: Ajuste de unidades para garantizar exceso energético. Elaboración propia.....	15
Tabla 4.7: Exceso energético respecto EDAM. Elaboración propia	15
Tabla 4.8: Factor de carga y valoración. Fuente: Ingeniería de la energía eólica, Miguel Villarrubia López.....	16
Tabla 4.9: Factor de carga para la altura mínima de góndola. Elaboración propia.....	17
Tabla 4.10: Factor de carga para la altura mínima de góndola. Elaboración propia.....	17
Tabla 4.11: Características técnicas de Enercon E44/900. Fuente: TheWindPower.net.....	20

1. Justificación del empleo de un parque eólico como sistema de abastecimiento de energía

Como fuentes de energía renovables, la solar y la eólica destacan frente a las demás en cuanto a su potencial de implantación en Canarias. Finalmente se ha optado por esta última, motivado no solo por el hecho de que una turbina eólica permite generar energía tanto de día como de noche (aunque de manera variable), sino también, y de manera determinante, porque un parque eólico requiere una menor superficie de instalación que un conjunto de paneles solares para la misma generación energética. Ello ha facilitado la búsqueda de suficiente suelo urbanizable cercano a la costa para ubicar la EDAM, como se puede comprobar en el anexo II.

Para suplir la intermitencia y variabilidad del recurso eólico, tanto la EDAM como el parque eólico se apoyarán en la red eléctrica. Es decir: en realidad la EDAM consumirá la energía directamente de la red eléctrica, pero a su vez, ésta misma energía será vertida a la red por el parque eólico. De esta manera, al menos en teoría, el empleo adicional de fuentes de energías no renovables para el abastecimiento de la EDAM es nulo.

2. Consumo de energía final de la EDAM

Necesitamos conocer el consumo total y específico de la EDAM antes de comenzar a dimensionar el parque eólico. Considerando la potencia absorbida de todas las bombas de la instalación y asumiendo que el funcionamiento es continuo (24 horas al día, 365 días al año), se tiene (tabla 2.1):

	Potencia abs. [kW]	Consumo específico [kWh/m ³]	Consumo anual [MWh/año]	Contribución [%]
Alimentación(x2)	49,04x2=98,08	0,78	859.2	18%
Distribución	112.5	0.90	985.5	21%
Alta presión	304	2.43	2663	57%
Booster	10.1	0.08	88.5	2%
Postratamiento	9.02	0.07	79	2%
Total	533.7	4.27	4675.2	100%

Tabla 2.1: Consumo de energía de la instalación. Elaboración propia

Nótese que para la alimentación se toman en cuenta únicamente dos de las tres bombas, pues sólo dos estarán actuando simultáneamente. La tercera, aunque necesaria, se emplea sólo a modo de reserva, cuando falle alguna de las otras

dos. Se tiene entonces que la planta, con un consumo de energía específico de 4,27 kWh/m³ (valor típico para este tipo de instalaciones), tiene un consumo de energía anual de aproximadamente 4675 MWh, lo cual debe ser abastecido por el sistema de producción de energía (parque eólico)

A modo de comprobación, se sustituyen los valores reales de eficiencia de las bombas en LewaPlus, que habían sido inicialmente supuestos con valores estándar, para comparar con el consumo de energía específico obtenido mediante esta herramienta.

Hay que tener en cuenta que el software LewaPlus solo toma en cuenta el consumo de las bombas de alta presión y de circulación (booster), por lo que se muestra el consumo de energía específico únicamente de estas bombas (tabla 2.2) para proceder así a una comparación más equitativa:

Sistema	Potencia absorbida [kW]	Rendimiento hidráulico [%]	Consumo de energía específico [kWh/m ³]
Alta presión	304	75,4	2,43
Booster	10,1	81,1	0,08
Total	314.1	-	2,51

Tabla 2.2: Resumen del consumo de las bombas consideradas por LewaPlus. Elaboración propia

En el software LewaPlus, como no se ha podido obtener el rendimiento del motor de dichas bombas a partir del fabricante, se prueba con distintos valores hasta obtener un valor lo más próximo posible de potencia absorbida. Así se comprueba que el rendimiento del motor debe ser 98% (valor máximo permitido por el software) o superior (fig. 2.1)

De esta manera, se determina que la EDAM (considerada únicamente como bomba booster + bomba de alta presión + bastidor de membranas) requerirá un consumo de energía específico de 2,55 kWh/m³ absorbiendo una potencia eléctrica de 318,39 kW, valores muy similares a los obtenidos anteriormente (tabla 2.3)

	Potencia absorbida [kW]	Consumo de energía específico [kWh/m ³]
Según fabricantes	314.1	2,51
Según software LewaPlus	318,39	2,55

Tabla 2.3: Comparación entre el consumo necesario según LewaPlus y fabricantes. Elaboración propia

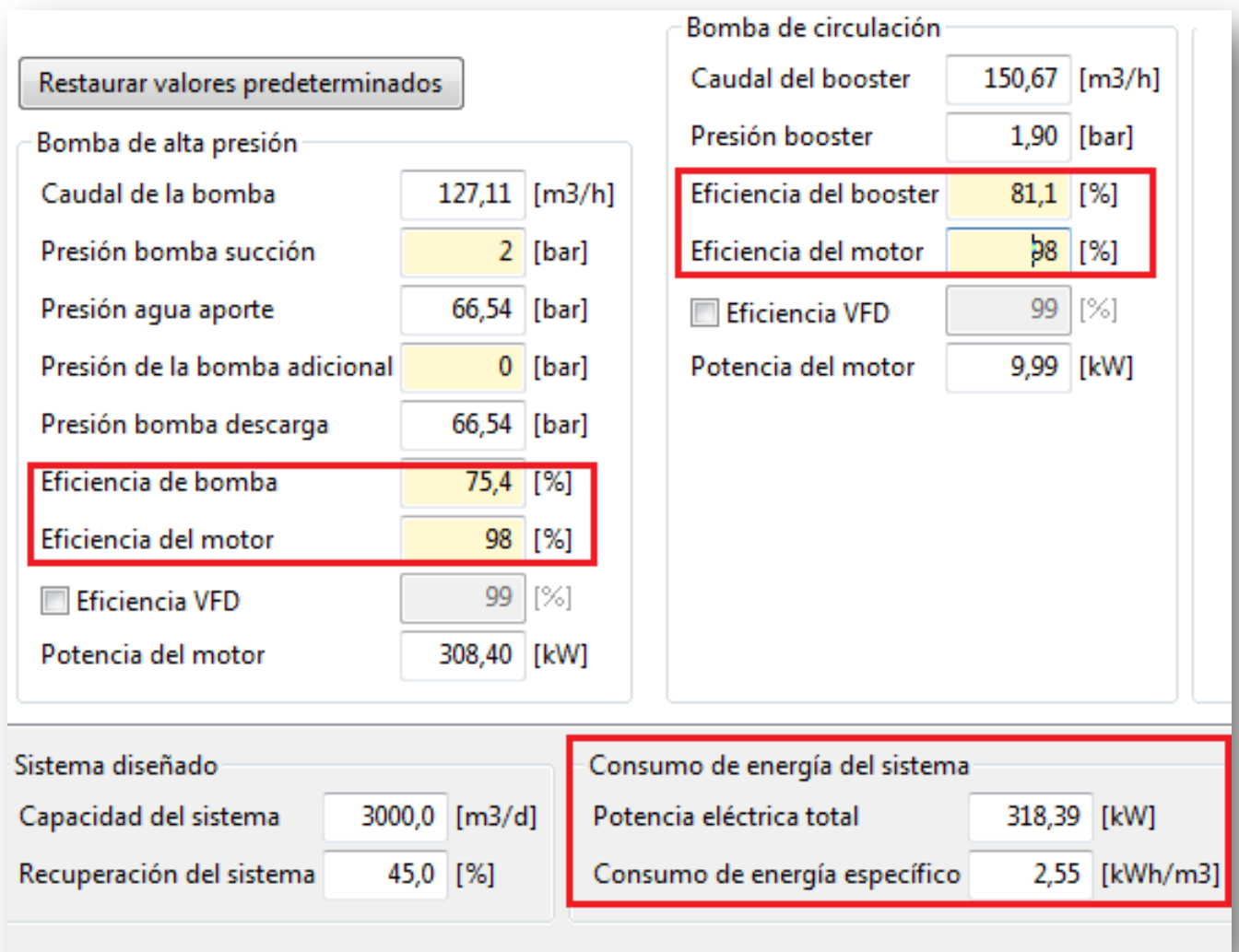


Figura 2.1: Resumen del consumo del sistema OI. Fuente: LewaPlus

3. Estudio del recurso eólico

3.1 Distribución de Weibull

En primer lugar, ubicamos de manera exacta al aerogenerador mediante las coordenadas UTM (fig. 3.1). De este punto también obtenemos el valor promedio del factor de escala 'C' y el factor de forma 'K', extraídos directamente del Instituto Tecnológico de Canarias a partir del visor Grafcan. Así, se tiene que:

$$K = 2,254 \quad C = 9.09$$

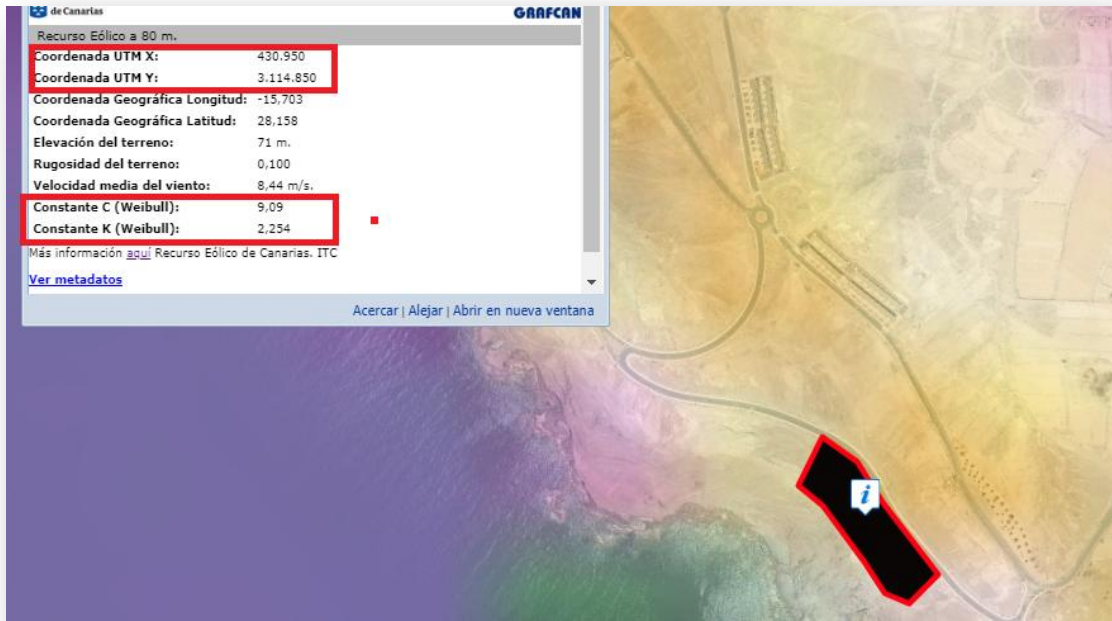


Figura 3.1: Coordenadas y constantes de Weibull del parque eólico. Fuente: Grafcan

Introduciendo estos valores en la ecuación de la distribución de Weibull, podemos conocer la probabilidad de la velocidad del viento para el rango deseado:

$$f(v) = \frac{K}{C} * \left(\frac{v}{C}\right)^{K-1} * e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^K} = \frac{2.254}{9.09} * \left(\frac{v}{9.09}\right)^{1.254} * e^{-\left(\frac{v}{9.09}\right)^{2.254}} \quad (3.1)$$

Así, por ejemplo, para las velocidades entre 1 y 20m/s, tomando incrementos de 1m/s y expresando la probabilidad en tanto por ciento, se tienen los resultados de la tabla 3.1. De esta manera, podemos comprobar que la mayor probabilidad, en torno a 10%, se da para velocidades del viento entre 6 y 8 m/s

v [m/s]	f(v) [%]	v [m/s]	f(v) [%]
1	1,55	11	6,77
2	3,59	12	5,41
3	5,69	13	4,13
4	7,57	14	3,02
5	9,04	15	2,11
6	9,95	16	1,41
7	10,26	17	0,9
8	9,98	18	0,55
9	9,21	19	0,32
10	8,09	20	0,18

Tabla 3.1: Relación entre velocidad del viento y su probabilidad según Weibull. Fuente: Elaboración propia

Estas conclusiones también se pueden observar al expresar los datos gráficamente (fig. 3.2):

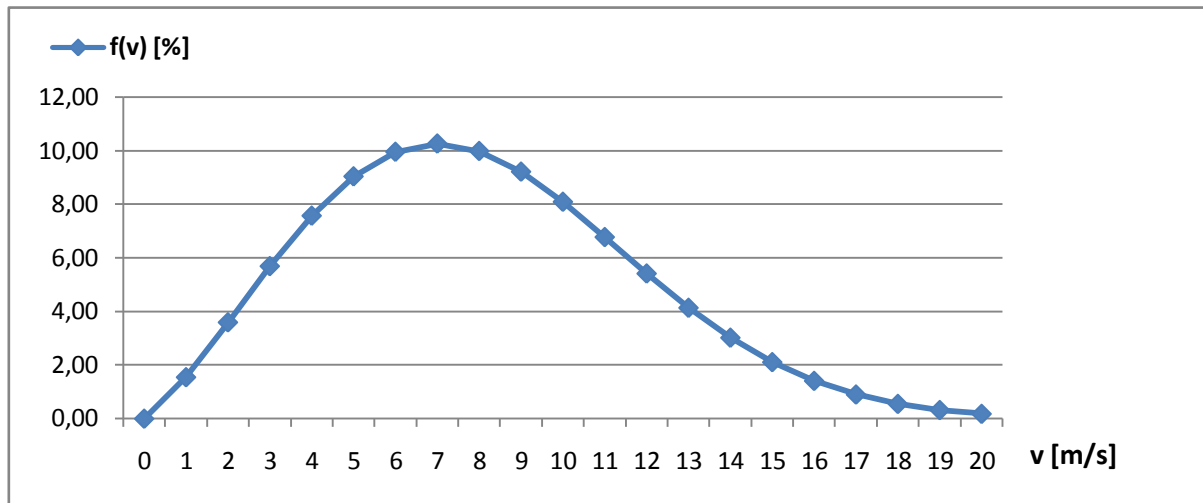


Figura 3.2: Relación entre velocidad del viento y su probabilidad según Weibull. Elaboración propia

3.2 Orientación del aerogenerador

En cuanto a la dirección predominante del viento, se requiere información sobre la frecuencia del viento para cada dirección (norte, sur, este y oeste), con la cual construir un gráfico de coordenadas polares, en el que se puede observar fácilmente cuál es la dirección predominante.

Hasta hace pocos años, esta información se encontraba disponible a través de la web del Instituto de Ahorro de Diversificación y Ahorro Energético (IDAE), que facilitaba una herramienta online (atlas eólico) que contenía una base de datos con toda esta información. Sin embargo, actualmente no se encuentra disponible.

Alternativamente, la dirección predominante del viento se puede obtener también a partir de la herramienta online 'Estimación de la Energía producida por un Aerogenerador' del ITC (fig. 3.3), introduciendo las coordenadas UTM del aerogenerador y la altura a la que queremos obtener los datos. Así, para 80 m y seleccionando un modelo de aerogenerador cualquiera:

Coord X (UTM):	430950	
Coord Y (UTM):	3114850	
Tomo detalle numérico:	GranCanaria4.pdf	
Aerogenerador:	GAMESA G90	?
Altura:	80 m	
Cte K de Weibull (80 m):	2.254	?
Velocidad viento (80 m):	8.4 m/s	
Dirección predominante del viento:	NE	
Energía anual estimada:	8862692.6 kWh	?
Potencia anual:	1011.723 kW	?
Horas anuales equivalentes:	4431.3 h	?

Figura 3.3: Dirección predominante del viento. Fuente: ITC

Este dato se extrae a partir del documento 'tomo 4' para la isla de Gran Canaria, que recopila los valores de K, velocidad promedio y dirección predominante para cada una de las coordenadas UTM en la isla de Gran Canaria (fig. 3.4)

Así, se puede comprobar que la dirección predominante es NE (noroeste) independientemente de la altura a la que se ubique. Esta será la dirección a la que debe orientarse el aerogenerador, con el fin de conseguir el máximo aprovechamiento posible del recurso eólico.

itc		Gobierno de Canarias		Gran Canaria. TOMO 4 de 9. Recurso Eólico de Canarias.				
X	Y	V. Viento 40	Weibk 40	V. Viento 60	Weibk 60	V. Viento 80	Weibk 80	¹ Dirección Predominante
430950	3116850	7,170	2,173	7,390	2,230	7,540	2,241	NE
430950	3116750	7,180	2,173	7,410	2,230	7,560	2,242	NE
430950	3116650	7,210	2,172	7,440	2,231	7,600	2,242	NE
430950	3116550	7,180	2,172	7,430	2,231	7,600	2,243	NE
430950	3116450	7,190	2,172	7,440	2,231	7,610	2,243	NE
430950	3116350	7,190	2,172	7,440	2,232	7,620	2,244	NE
430950	3116250	7,190	2,173	7,460	2,232	7,640	2,244	NE
430950	3116150	7,200	2,173	7,460	2,232	7,650	2,245	NE
430950	3116050	7,200	2,173	7,480	2,232	7,670	2,245	NE
430950	3115950	7,130	2,173	7,440	2,233	7,650	2,246	NE
430950	3115850	6,980	2,173	7,330	2,233	7,580	2,246	NE
430950	3115750	6,910	2,173	7,300	2,233	7,570	2,246	NE
430950	3115650	7,070	2,173	7,440	2,233	7,710	2,246	NE
430950	3115550	7,360	2,173	7,710	2,233	7,940	2,247	NE
430950	3115450	7,560	2,173	7,910	2,233	8,140	2,247	NE
430950	3115350	7,660	2,173	8,030	2,233	8,260	2,247	NE
430950	3115250	7,710	2,173	8,100	2,233	8,340	2,247	NE
430950	3115150	7,800	2,172	8,170	2,233	8,410	2,247	NE
430950	3115050	8,000	2,184	8,320	2,241	8,510	2,254	NE
430950	3114950	8,250	2,184	8,460	2,241	8,570	2,254	NE
430950	3114850	8,140	2,184	8,330	2,242	8,440	2,254	NE
430950	3114750	7,430	2,184	7,800	2,242	8,030	2,254	NE
430950	3114650	6,480	2,185	7,030	2,242	7,420	2,254	NE
430950	3114550	5,900	2,185	6,500	2,242	6,940	2,254	NE
430950	3114450	5,910	2,186	6,440	2,242	6,850	2,254	NE
430950	3114350	6,140	2,186	6,590	2,242	6,930	2,254	NE
430950	3114250	6,350	2,187	6,740	2,242	7,040	2,254	NE
430950	3114150	6,450	2,187	6,820	2,243	7,100	2,254	NE
430950	3114050	6,440	2,188	6,840	2,243	7,140	2,254	NE
430950	3113950	6,490	2,189	6,890	2,243	7,180	2,254	NE

Figura 3.4: Dirección predominante del viento tabulado. Fuente: ITC

Además, se puede corroborar esta información a través de otra fuente, 'Global Wind Atlas' (fig. 3.5), que facilita automáticamente una rosa de los vientos para la ubicación seleccionada. Así, se puede confirmar que en la zona donde se ubicará el aerogenerador, la dirección predominante es el noroeste, tanto para las frecuencias como para las velocidades. Esta información se facilita tanto para 50 m como para 100 m, si bien se obtiene el mismo resultado en ambos casos:

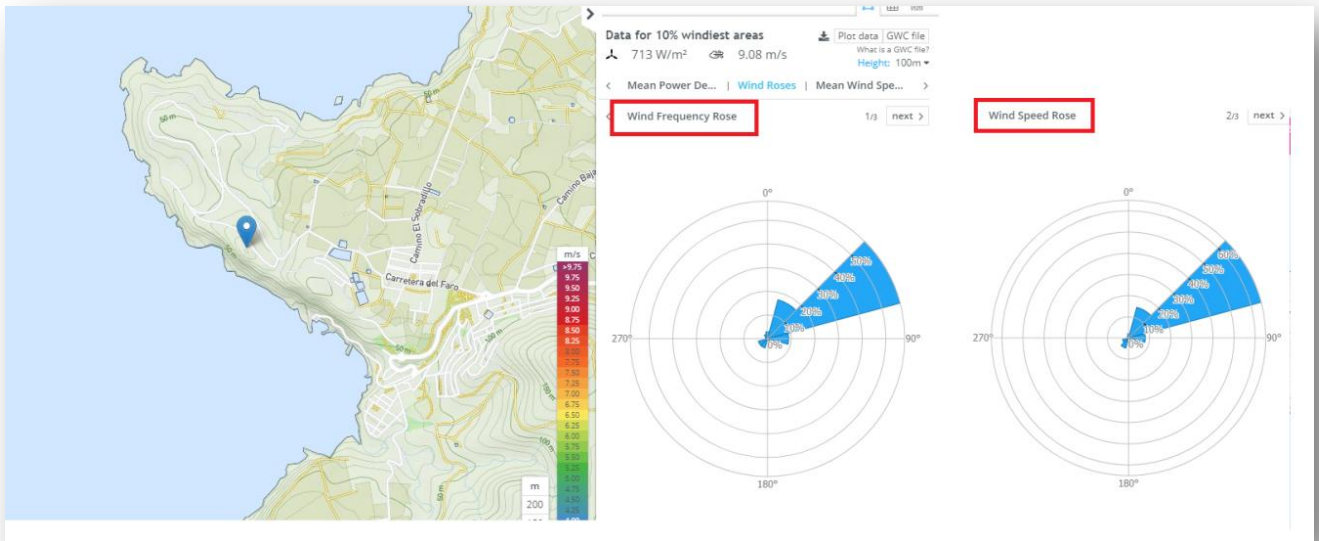


Figura 3.5: Dirección predominante del viento. Fuente: Global Wind Atlas

2.3 Curva de potencia

La herramienta online del ITC (fig.3.6), utiliza la ecuación 3.1 y la introduce en la ecuación 3.2 para hallar automáticamente la potencia promedio (P) que produce un aerogenerador:

$$P = \int_{v_{arranque}}^{v_{parada}} f(v) * P_{AG}(v) dv \tag{3.2}$$

Donde $P_{AG}(v)$ es la curva de potencia del aerogenerador y por tanto depende del modelo seleccionado. Obsérvese que se evalúa entre la velocidad de arranque del aerogenerador (velocidad mínima para que las aspas comiencen a moverse) y la velocidad de parada (a la cual se para el rotor automáticamente para evitar daños, sirviendo como seguridad ante velocidades del viento demasiado grandes)

Figura 3.6: Interfaz de la herramienta para la estimación de energía de un aerogenerador. Fuente: ITC

El parámetro de la altura, como se comprueba en la figura 3.4, contribuye a determinar las constantes de Weibull y su dirección predominante.

A continuación se elaborará una lista de todos los fabricantes considerados por ITC, y se resaltarán aquellos que prestan servicio en la actualidad. La base de datos no se encuentra actualizada, con lo cual la mayoría de modelos mostrados ya no existen (fig. 3.7)

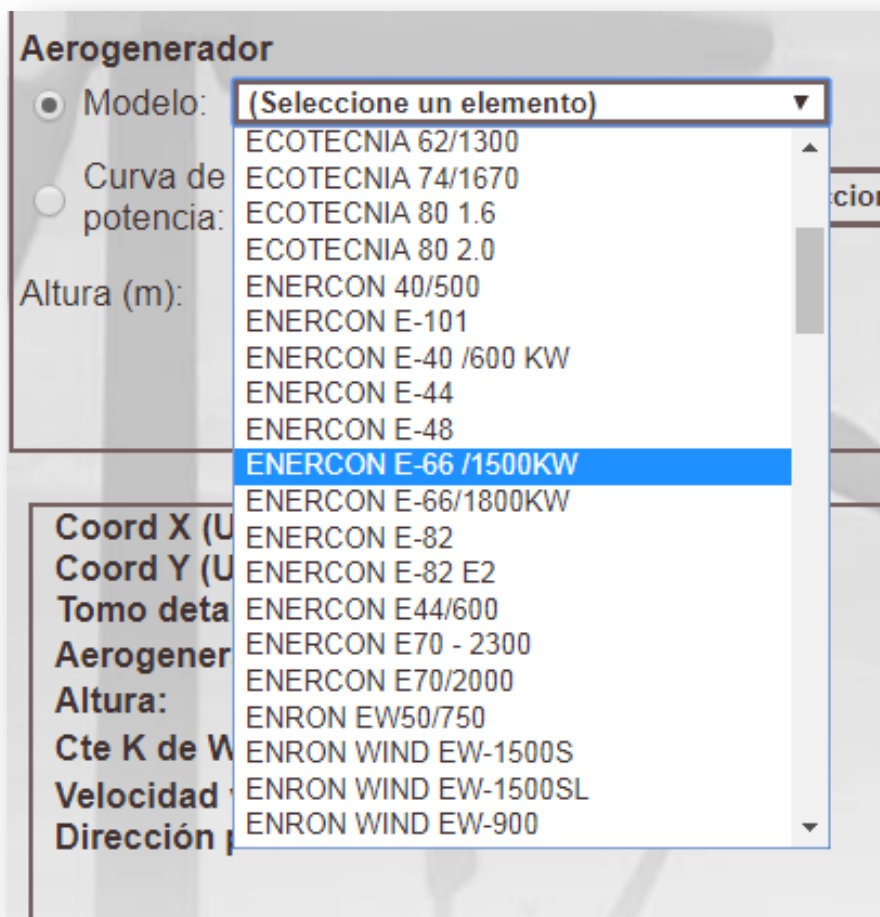


Figura 3.7: Ejemplo de los modelos disponibles para seleccionar. Fuente: ITC

4. Selección de aerogeneradores actualmente disponibles en el mercado

4.1 Lista completa de los modelos disponibles según ITC

Se muestra en la tabla 4.1 la lista completa de los 119 modelos que se pueden seleccionar a través de la herramienta online del ITC. Se ha resaltado en color amarillo los únicos 5 modelos actualmente disponibles (según thewindpower.net)

En la figura 4.1 se indica un ejemplo de cómo se ha podido conocer la disponibilidad de los modelos para el fabricante Enercon: aquellos con la etiqueta 'old model' se han dejado de fabricar y por tanto se han descartado; mientras aquellos etiquetados como 'under production' mantienen su producción actualmente.

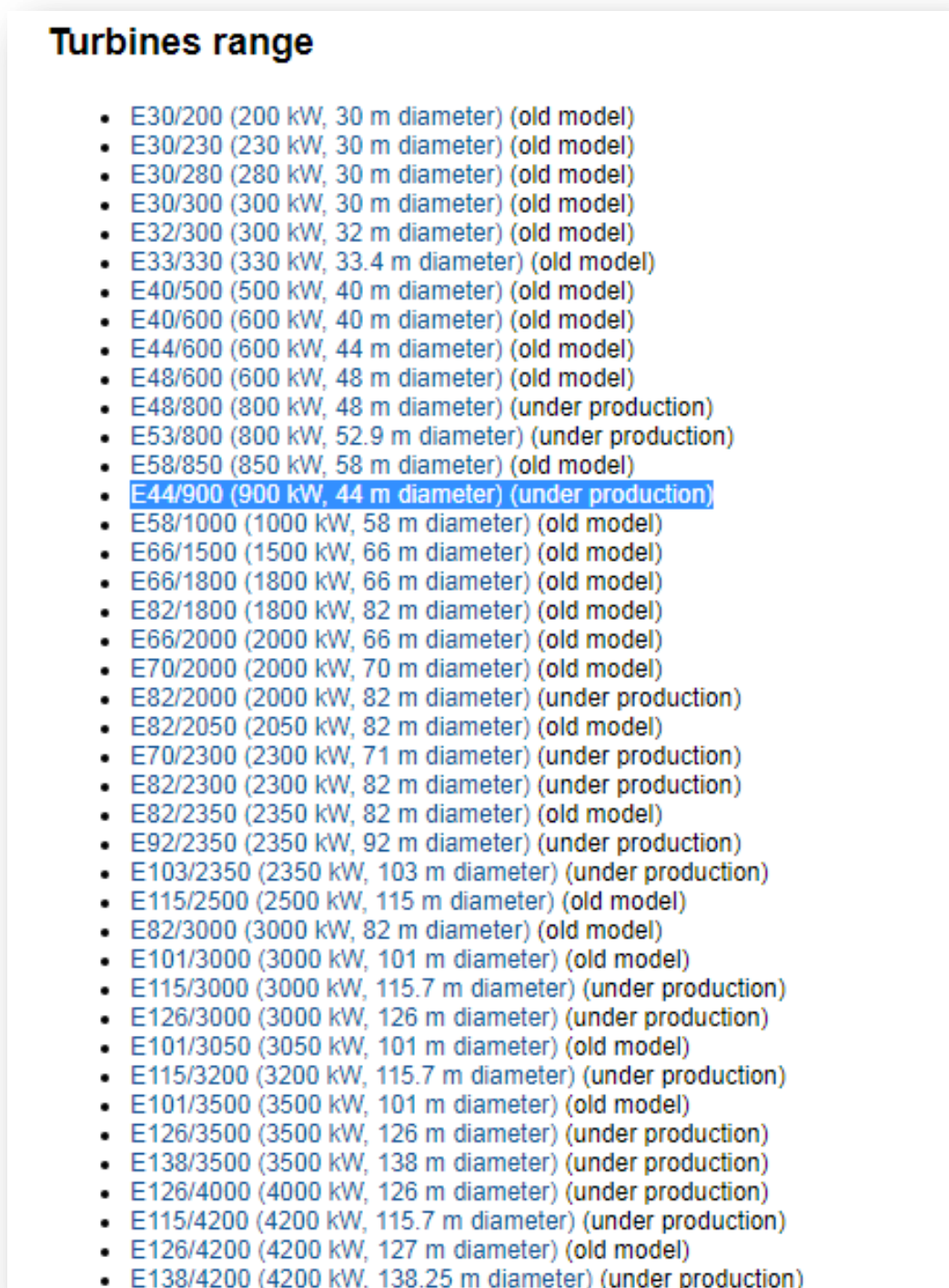


Figura 4.1: Información sobre la disponibilidad de los modelos. Fuente: TheWindPower.net

1	CLIPPERWIND C89 clase la	41	FUHLÄNDER FL MD 77	81	NORDEX N60
2	CLIPPERWIND C93 clase lia	42	FUHLÄNDER FL 1250	82	NORDEX N80
3	CLIPPERWIND C96 clase lib	43	FUHLÄNDER FL 1500 - 70m ROTOR	83	NORDEX N90
4	CLIPPERWIND C99 clase IIIb	44	FUHLÄNDER FL600	84	NORDEX N90/2500 LS
5	DEWIND D4 46/600kW	45	GAMESA EOLICA G66/1620kW	85	NORDEX S70
6	DEWIND D6 60/1250kW	46	GAMESA EOLICA G80- 2000kW	86	NORDEX S77
7	DEWIND D6 62/1250kW	47	GAMESA G52-850kW	87	NORDTANK 500/37
8	DEWIND D8 - 80m	48	GAMESA G58/850	88	NORDTANK NTK 1500/60
9	ECOTECNIA 100	49	GAMESA G87/2000 Kw	89	NORDTANK NTK 600/43
10	ECOTECNIA 44/630	50	GAMESA G90	90	REPOWER 5M
11	ECOTECNIA 48/750	51	GE ENERGY GE 1.5 s	91	REPOWER MD-77
12	ECOTECNIA 62/1300	52	GE ENERGY GE 1.5 se	92	REPOWER MM-70
13	ECOTECNIA 74/1670	53	GE ENERGY GE 1.5 sl	93	REPOWER MM-82
14	ECOTECNIA 80 1.6	54	GE ENERGY GE 1.5 sle	94	REPOWER MM-92
15	ECOTECNIA 80 2.0	55	GE ENERGY GE 1.5 xle	95	SEEWIND 52/750 KW
16	ENERCON 40/500	56	GE ENERGY GE 2.5xl	96	SIEMENS SWT-3.6- 107
17	ENERCON E-101	57	GE ENERGY GE 3.6sl	97	SIEMENS SWT-2.3- 93
18	ENERCON E-40 /600kW	58	GENESIS GENESIS600	98	SIEMENS SWT-3.0- 101
19	ENERCON E-44	59	GET 41	99	SÜDWIND S.46/600
20	ENERCON E-48	60	HANSEATISCHE ET 550/41	100	SÜDWIND S.46/750

21	ENERCON E-66 /1500kW	61	IZAR BONUS 1.3MW	101	TACKE TW 600
22	ENERCON E-66 / 1800kW	62	IZAR BONUS 600KW	102	TACKE TW1.5
23	ENERCON E-82	63	MADE AE-46	103	TORRES TWT-1500
24	ENERCON E-82 E2	64	MADE AE-46/I	104	TORRES TWT/1650
25	ENERCON E44/600	65	MADE AE-61	105	TURBOWIND T600-48
26	ENERCON E70 - 2300	66	MADE AE-61/1300	106	VENTIS V12
27	ENERCON E70/2000	67	MADE AE-90	107	VESTAS V27/225
28	ENRON EW50/750	68	MADE AE-90/2 MW	108	VESTAS V42/600 KW
29	ENRON WIND EW-1500S	69	MADE AE52/800	109	VESTAS V44/600 KW
30	ENRON WIND EW-1500SL	70	mitsubishi MWT500	110	VESTAS V52/850
31	ENRON WIND EW-900	71	mitsubishi MWT1000	111	VESTAS V66/1,65MW
32	ENRON WIND EW-900S	72	mitsubishi MWT600	112	VESTAS V80
33	ENRON WIND EW-900SL	73	NEG MICON NM 1500/64	113	VESTAS V90/1800
34	Eozen Vensys VENSYS 70	74	NEG MICON NM1000/60	114	VESTAS V90/2000
35	Eozen Vensys VENSYS 77	75	NEG MICON NM1500/72	115	VESTAS V90/3000
36	FUHLÄNDER FL 1500 - 77m ROTOR	76	NEG MICON NM600/43	116	VILLAS FLODA 500/600
37	FUHLÄNDER FL 2500 - 100m ROTOR	77	NEG MICON NM600/48	117	WIND WORLD W-4200/600
38	FUHLÄNDER FL 2500 - 80m ROTOR	78	NEG MICON NM750/44	118	WIND WORLD W-4800/750
39	FUHLÄNDER FL 2500 - 90m ROTOR	79	NEG MICON NM900/52	119	ZOND Z-46
40	FUHLÄNDER FL MD 70	80	NORDEX N43/600		

Tabla 4.1: Modelos disponibles (amarillo) y no disponibles (blanco) del ITC. Fuente: TheWindPower.net

4.2 Análisis de los modelos actualmente disponibles en el mercado

4.2.1 Potencia nominal

Se muestra a continuación (tabla 4.2) la potencia nominal y el rango de altura en el que se puede colocar la góndola para los modelos disponibles:

Modelo	Altura mín [m] – máx [m]	Potencia nominal [kW]
ENERCON E-44	45-55	900
ENERCON E-48	50-76	800
ENERCON E-82	78-138	2000
ENERCON E70 – 2300	57-113	2300
VESTAS V90/2000	95-125	2000

Tabla 4.2: Información sobre la potencia nominal y altura de la góndola. Fuente: TheWindPower.net

4.2.2 Energía generada anual

A continuación se comprueba la energía anual que es capaz de generar cada modelo para la mínima y máxima altura a la que puede llegar la góndola. Se muestra un ejemplo para el modelo Enercon E-44 en las figuras 4.2 y 4.3.

Los datos existentes en la base de datos del ITC corresponden a las alturas de 40, 60 y 80m; por lo que el resto de los valores se obtienen mediante interpolación. Así, se repite el proceso para cada modelo disponible y se recogen los resultados en la tabla 4.3:

Modelo	Energía anual generada [MWh/año]	
	Altura mínima	Altura máxima
ENERCON E-44	2843.5	2903.1
ENERCON E-48	3089.9	3203.3
ENERCON E-82	8728.5	9086.2
ENERCON E70 – 2300	7615.4	8088.1
VESTAS V90/2000	8929.8	9091.5

Tabla 4.3: Energía anual estimada para cada modelo de aerogenerador. Fuente: ITC

Se recuerda que la EDAM requiere un total de **4675.2 MWh/año** (tabla 1.1).

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

Posición (UTM)		Límites R.E.C
X =	430950	[170550, 677550]
Y =	3114850	[3040750, 3274850]

Aerogenerador

Modelo: **ENERCON E-44** ?
 Curva de potencia: Seleccionar archivo Ningún archivo seleccionado ?
 Altura (m): ?

Calcular

Coord X (UTM):	430950	
Coord Y (UTM):	3114850	
Tomo detalle numérico:	GranCanaria4.pdf	
Aerogenerador:	ENERCON E-44	?
Altura:	45 m	
Cte K de Weibull (45 m):	2.1985	?
Velocidad viento (45 m):	8.2 m/s	
Dirección predominante del viento:	NE	
Energía anual estimada:	2843510 kWh	?
Potencia anual:	324.602 kW	?
Horas anuales equivalentes:	3159.5 h	?

Figura 4.2: Energía anual estimada para la mínima altura de la góndola, Enercon E-44. Fuente: ITC

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

Posición (UTM)		Límites R.E.C
X =	430950	[170550, 677550]
Y =	3114850	[3040750, 3274850]

Aerogenerador

Modelo: **ENERCON E-44** ?
 Curva de potencia: Seleccionar archivo Ningún archivo seleccionado ?
 Altura (m): ?

Calcular

Coord X (UTM):	430950	
Coord Y (UTM):	3114850	
Tomo detalle numérico:	GranCanaria4.pdf	
Aerogenerador:	ENERCON E-44	?
Altura:	55 m	
Cte K de Weibull (55 m):	2.2275	?
Velocidad viento (55 m):	8.3 m/s	
Dirección predominante del viento:	NE	
Energía anual estimada:	2903142.2 kWh	?
Potencia anual:	331.409 kW	?
Horas anuales equivalentes:	3225.7 h	?

Figura 4.3: Energía anual estimada para la máxima altura de la góndola, Enercon E-44. Fuente: ITC

El porcentaje que representa lo que genera cada aerogenerador respecto a lo que necesita la EDAM se muestra en la tabla 4.4:

Modelo	Energía generada respecto necesaria [%]	
	Altura mínima	Altura máxima
ENERCON E-44	61%	62%
ENERCON E-48	66%	69%
ENERCON E-82	187%	194%
ENERCON E70 – 2300	163%	173%
VESTAS V90/2000	191%	194%

Tabla 4.4: Energía generada por el aerogenerador respecto lo que necesita la EDAM. Elaboración propia

Como se puede comprobar, los modelos ENERCON E-48 y ENERCON E-44 por sí solos no serían capaces de abastecer toda la instalación. Se ajusta el número de unidades para que se abastezca, al menos, el 100% de la EDAM (tabla 4.5):

Modelo	Unidades	Energía generada respecto necesaria [%]	
		Altura mínima	Altura máxima
ENERCON E-44	2	122%	124%
ENERCON E-48	2	132%	138%
ENERCON E-82	1	187%	194%
ENERCON E70 – 2300	1	163%	173%
VESTAS V90/2000	1	191%	194%

Tabla 4.5: Ajuste de unidades para garantizar exceso energético. Elaboración propia

Expresando los valores de la tabla 3.5 en MWh/año, se tiene la tabla 4.6.

		Energía anual generada total [MWh/año]	
Modelo	Unidades	Altura mínima	Altura máxima
ENERCON E-44	2	5687	5806.3
ENERCON E-48	2	6179.7	6406.5
ENERCON E-82	1	8728.5	9086.2
ENERCON E70 – 2300	1	7615.4	8088.1
VESTAS V90/2000	1	8929.8	9091.5

Tabla 4.6: Ajuste de unidades para garantizar exceso energético. Elaboración propia

4.2.3 Comparación por exceso energético respecto a EDAM

Hallando la diferencia entre lo que produce cada aerogenerador (tabla 4.6) respecto a lo que necesita la EDAM (tabla 4.1) se obtiene el exceso de energía anual generado (tabla 4.7):

		Exceso de energía anual generado [MWh/año]	
Modelo	Unidades	Altura mínima	Altura máxima
ENERCON E-44	2	1011.8	1131.1
ENERCON E-48	2	1504.5	173.1
ENERCON E-82	1	4053.3	4411
ENERCON E70 – 2300	1	2940.2	3412.8
VESTAS V90/2000	1	4254.6	4416.3

Tabla 4.7: Exceso energético respecto EDAM. Elaboración propia

En principio, nos interesa el modelo que produce el menor exceso energético (más cercano a abastecer exactamente el 100% de la EDAM). Se comprueba que esto ocurre utilizando dos modelos ENERCON E-44, colocando la góndola a la mínima

altura (45 m), lo que supondrá un 22% de exceso energético (aproximadamente 1GWh/año). Pero también debemos tener en cuenta otro criterio: el factor de carga.

4.3.4 Comparación por factor de carga

El factor de carga es la relación que existe entre la energía que genera el aerogenerador y la energía que generaría si operase a plena carga (máxima potencia) durante el mismo período de tiempo.

$$\text{Factor de carga (FC)} = \frac{\text{Energía generada}}{\text{Energía que generaría a plena carga}} \quad (4.1)$$

Donde,

$$\text{Energía que generaría a plena carga} = \text{Potencia nominal} * \text{Tiempo usado} \quad (4.2)$$

Si se supone un funcionamiento continuo, el tiempo usado será los 365 días de un año y las 24 horas de un día. Así, un FC del 100% implicaría que el aerogenerador ha estado actuando a plena carga (en su potencia nominal) todo el tiempo. Esta situación ideal prácticamente no se cumple nunca, ya que la variabilidad de las condiciones eólicas impide que el aerogenerador se mantenga a plena carga (en su potencia nominal). Es decir, la energía generada siempre será menor que la energía que generaría a plena carga, y por tanto FC será necesariamente < 100%.

Existe un criterio común para clasificar la idoneidad de utilizar un cierto aerogenerador respecto a otro en función del FC (tabla 4.8)

FC	Valoración
< 20%	Insuficiente
20% a 25%	Aceptable
25% a 30%	Bueno
30% a 40%	Muy bueno
40% a 50%	Excelente
> 50%	Extraordinario

Tabla 4.8: Factor de carga y valoración. Fuente: Ingeniería de la energía eólica, Miguel Villarrubia López

Se obtiene a continuación el FC de cada modelo con su correspondiente valoración, suponiendo un funcionamiento continuo, para las alturas mínima (tabla 4.9) y máxima (tabla 4.10) de góndola.

Modelo de aerogenerador	Energía anual a plena carga [MWh/año]	Energía anual a altura mínima [MWh/año]	FC [%]	Clasificación
ENERCON E-44	7884	2844	36%	Muy bueno
ENERCON E-48	7008	3090	44%	Excelente
ENERCON E-82	17520	8728	50%	Excelente
ENERCON E70 – 2300	20148	7615	38%	Muy bueno
VESTAS V90/2000	17520	8930	51%	Extraordinario

Tabla 4.9: Factor de carga para la altura mínima de góndola. Elaboración propia

Modelo de aerogenerador	Energía anual a plena carga [MWh]	Energía anual generada a altura máxima [MWh/año]	FC [%]	Clasificación
ENERCON E-44	7884	2903	37%	Muy bueno
ENERCON E-48	7008	3203	46%	Excelente
ENERCON E-82	17520	9086	52%	Extraordinario
ENERCON E70 – 2300	20148	8088	40%	Excelente
VESTAS V90/2000	17520	9091	52%	Extraordinario

Tabla 4.10: Factor de carga para la altura mínima de góndola. Elaboración propia

4.3.5 Discusión de resultados y selección final

Desde el punto de vista del factor de carga, los mejores modelos son ENERCON E-82 y VESTAS V90/2000. Sin embargo, aunque se aproveche mejor el aerogenerador, esto no serviría de nada si el exceso energético que se obtiene, que es casi el doble de lo se requiere (un 188-195% de la energía necesaria), no se aprovecha eficazmente.

Cabe recordar que el uso concreto del exceso energético es una ramificación del presente estudio y por su extensión podría requerir un proyecto adicional por sí mismo. Por lo tanto, tal y como se ha como se ha establecido en el alcance del proyecto, se omitirán los detalles específicos en relación a cómo invertir la energía excedente. Únicamente se indicarán una serie de posibles vías de utilización, sin entrar en profundidad, en el apartado 5 del presente anexo.

Se asumirá, en principio y ante la falta de datos más concretos, que un mayor exceso energético no resulta ventajoso de manera global, y por tanto se pondrá mayor importancia al criterio de la minimización del mismo.

Así, la alternativa finalmente escogida consiste en utilizar dos unidades ENERCON E-44, colocando ambas a la menor altura de góndola.

4.3.6 Comprobación de cumplimiento de normativa

Dado que se utilizarán 2 aerogeneradores, se deben cumplir las siguientes indicaciones del 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, que establece lo siguiente:

- Como norma general, la distancia mínima entre dos aerogeneradores de una misma línea no será inferior a dos (2) diámetros de rotor y la distancia entre dos líneas de un mismo parque ha de ser como mínimo de cinco (5) diámetros de rotor.

El rotor del modelo escogido mide 44 m; por tanto, la distancia mínima entre ambos generadores debe ser 88 m. Comprobamos que dicho requisito se cumple al colocar los aerogeneradores en la ubicación escogida, al existir una distancia de aproximadamente 100 metros entre ambos (fig. 4.4):



Figura 4.4: Distancia de los aerogeneradores entre sí, Fuente: Grafcan

Por otra parte, también se indica que:

- *Cuando el planeamiento aplicable no imponga separaciones mayores, 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.*
 - *Núcleo habitado: en defecto de su determinación en el planeamiento, se entiende como el conjunto de al menos diez edificaciones destinadas a vivienda que estén formando calles, plazas u otras vías urbanas.*

Respecto al núcleo urbano más cercano (según el mapa de ocupación del suelo del visor Grafcan), la distancia es de 300 m (fig. 4.5).



Figura 4.5: Distancia de los aerogeneradores respecto al núcleo habitado más cercano, Fuente: Grafcan

Es necesario indicar que la normativa no especifica explícitamente qué hacer cuando el aerogenerador tiene exactamente 900 kW de potencia nominal (según el fabricante), ya que este valor se encuentra fuera de los límites indicados.

En un primer momento se ha considerado ubicar los aerogeneradores en un lugar un poco más alejado de este núcleo habitado. Pero se encuentra el inconveniente de que la zona está limitada en sus alrededores por múltiples núcleos poblacionales de pequeño tamaño, impidiendo una separación mayor a 400 m (que asegure el cumplimiento para ambas formas de interpretar la normativa).

Entonces, se considerará que la potencia nominal del aerogenerador 900 kW entra en el primer rango que establece la ley (es decir, se interpretará que *la distancia entre un aerogenerador y un núcleo habitado no será inferior a 250 metros para aerogeneradores de potencia nominal inferior o igual a 900kW, y a 400m para el resto de casos*), y por tanto se tomará 250 m como la distancia mínima respecto a un núcleo habitado. Así, en este caso también se cumple.

Se da por válida, de esta manera, la ubicación escogida para el aerogenerador.

4.3.7 Características del modelo de aerogenerador seleccionado

Se muestra un resumen de las características del modelo finalmente escogido en la siguiente tabla 4.11:

Fabricante	Enercon (Alemania)
Modelo	E44/900
Potencia nominal [kW]	900
Diámetro de rotor [m]	44
Clase de viento	IEC IA(S) - IEC IA
Compatibilidad offshore	No
Área barrida [m²]	1,521
Densidad de potencia [m²/kW]	1,69
Número de palas	3
Caja de cambios	No
Minima velocidad de rotor [rpm]	16
Máxima velocidad de rotor [rpm]	34,5
Velocidad de arranque del viento [m/s]	3
Velocidad nominal del viento [m/s]	17
Velocidad de parada de seguridad [m/s]	25
Tipo de generador	SYNC Wounde
Máxima velocidad del generador [rpm]	34
Voltaje [V]	400 - 690
Mínima altura de la góndola [m]	45
Máxima altura de la góndola [m]	55

Tabla 4.11: Características técnicas de Enercon E44/900. Fuente: TheWindPower.net

La ficha técnica del mismo, que detalla al completo todas sus características, puede encontrarse en el anexo VIII.

Por otra parte, en cuanto a su curva de potencia (figs. 4.6 y 4.7):

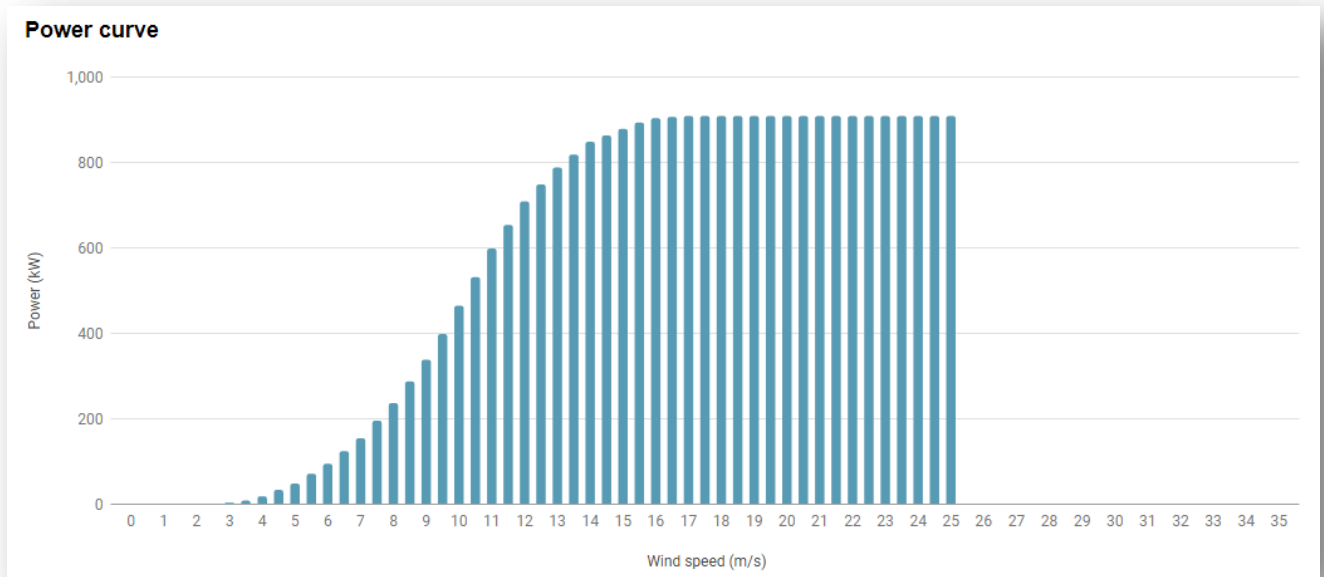


Figura 4.6: Curva de potencia de Enercon E44/900 Fuente: TheWindPower.net

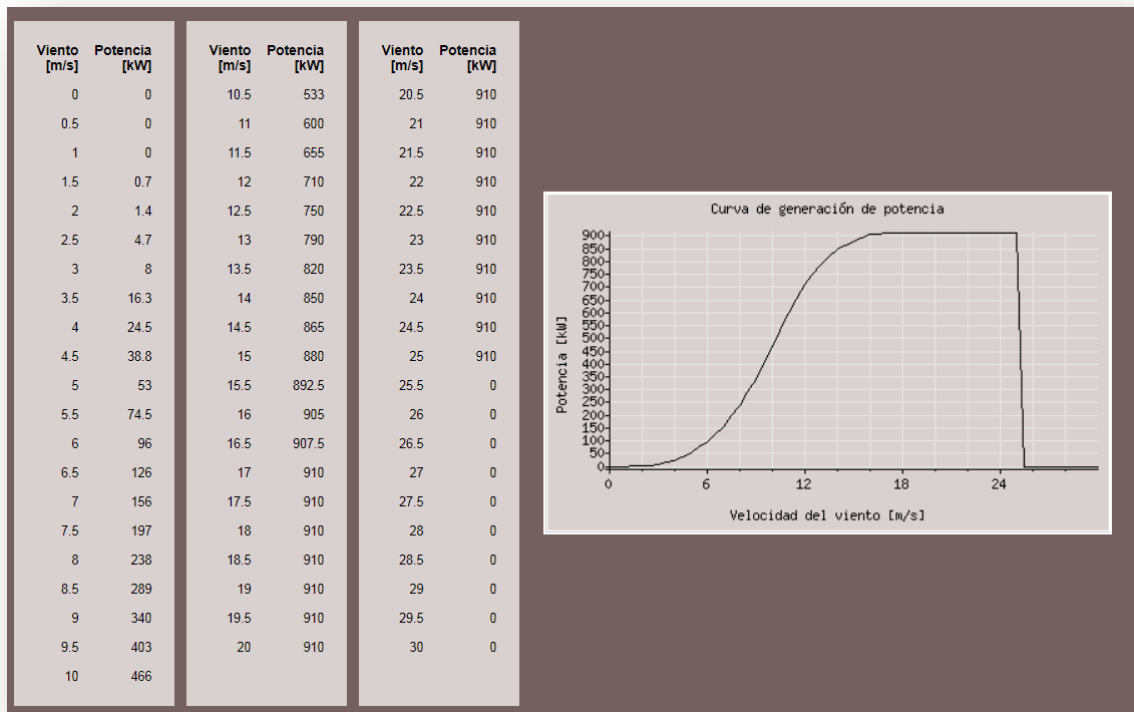


Figura 4.7: Curva de potencia de Enercon E44/900 Fuente: TheWindPower.net

Nótese (fig. 4.7) que la potencia real máxima que alcanza el mismo es 910 kW. Sin embargo, la potencia nominal que indica el fabricante (tabla 4.10) es 900 kW, y es por ello que ha sido esta última la que se ha tenido en cuenta de cara al cumplimiento de la normativa (véase apartado 4.3.6)

Se muestran algunas imágenes reales del mismo (figs. 4.8 a 4.11):



Figuras 4.8 (izq) y 4.9 (dcha): Fotografías del modelo Enercon E44/900 Fuente: TheWindPower.net



Figuras 4.10 (izq) y 4.11 (dcha): Fotografías del modelo Enercon E44/900 Fuente: TheWindPower.net

5. Posibles vías de aprovechamiento del exceso energético

En cuanto al exceso energético que produce, concretamente de +22% respecto a lo que necesita la EDAM (aproximadamente 1 GWh en términos absolutos), cabe mencionar que en la práctica, es posible que sea algo menor. Esto es así ya que, dado el limitado alcance del presente proyecto, únicamente se ha tenido en cuenta el consumo energético que supone el sistema de bombeo, dejando de lado las instalaciones de alumbrado, de control, de seguridad, entre otras. Esto implica que, al menos parte de dicho exceso energético, podría ser empleado en cubrir tales instalaciones.

Dicho esto, se proponen las siguientes vías de utilización para el mismo, debiendo optarse por aquélla que, tras el pertinente estudio de viabilidad (que queda fuera del alcance del presente proyecto), resultara más conveniente.

5.1 Vender exceso energético a la red

La primera alternativa consiste en verter el exceso energético a la red eléctrica. Esto no siempre será posible, ya que según la *Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico*, aunque en el acceso a las redes de distribución y transporte de electricidad tienen prioridad todos los vertidos provenientes de fuentes de energías renovables, esto dependerá de la demanda que tenga la red en el momento en el que se quiera verter la energía. Si la demanda es baja, el vertido de electricidad desde el sistema eólico será restringido por el operador de la red. Es necesario, en este caso, buscar otras vías.

5.2 Generación de hidrógeno

Mediante un electrolizador, utilizando básicamente energía eléctrica y agua, es posible generar hidrógeno mediante electrolisis. Luego, mediante una pila de combustible, a partir del hidrógeno generado y oxígeno, es posible obtener de nuevo agua y electricidad.

De esta manera, sería posible acumular el exceso de energía eléctrica producida por el parque eólico, para ser consumida a posteriori por la EDAM.

Sin embargo, en la actualidad el coste económico de las pilas de combustible suele ser muy alto, y por tanto desde un punto de vista más global (considerando los posibles costes) podría no ser rentable. Entonces, el uso o no de esta segunda alternativa vendrá condicionado por su rentabilidad a largo plazo, lo que requerirá un estudio económico que queda fuera del alcance del presente proyecto.

5.3 Bombeo hidráulico

Como tercera alternativa, se podría transformar la energía eléctrica en energía potencial, que sí puede ser almacenada. Para ello, se bombeará un cierto caudal

desde un embalse o depósito de agua, hasta otro depósito situado a una cota superior. Luego se volvería a transformar la energía potencial acumulada en energía eléctrica, y para ello se hará de nuevo el trasvase de agua desde el depósito de mayor cota al depósito inicial mediante gravedad y se pasará a través de turbinas que transformen la energía mecánica en eléctrica.

El empleo o no de este método estará condicionado por la orografía del terreno y la viabilidad para la construcción de depósitos o embalses a una diferencia de cota suficiente.

5.4 Aire comprimido

La cuarta alternativa consiste en utilizar la energía eléctrica para alimentar compresores de aire. Dicho aire comprimido se puede utilizar como forma para acumular la energía, y a posteriori, cuando sea necesario, ser convertida de nuevo en energía eléctrica haciendo pasar el aire por una serie de turbinas. De nuevo, la utilización o no de esta vía dependerá de su rentabilidad respecto a las anteriores.

5.5 Disipación de energía

Como última prioridad (y menos deseable), se producirá la disipación de energía, por ejemplo mediante la desalineación de la góndola respecto a la orientación más favorable del viento, o simplemente frenando el rotor.

Esto supondría la pérdida de aproximadamente 1 GWh/año, lo cual se intentará evitar a toda costa, recurriendo a esta medida únicamente en el caso de que sea imprescindible.



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

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANEXO VIII:
FICHAS TÉCNICAS

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

**DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA
ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES**

Autor: Alexander Hernández García

Tutor: Vicente José Romero Ternero

Índice de contenido

A continuación se incluye toda la documentación en relación a las especificaciones técnicas de los equipos seleccionados anteriormente.

Según su orden de visualización, los documentos incluidos son:

- 1. Informe final del software de dimensionamiento del bastidor de membranas (LewaPlus)**
- 2. Ficha técnica compacta del modelo de membrana seleccionado**
- 3. Ficha técnica compacta de la bomba de alimentación seleccionada**
- 4. Ficha técnica compacta de la bomba de alta presión seleccionada**
- 5. Ficha técnica compacta de la bomba de distribución seleccionada**
- 6. Ficha técnica compacta de la bomba Booster seleccionada**
- 7. Ficha técnica compacta de la bomba de postratamiento seleccionada**
- 8. Ficha técnica del modelo del dispositivo de recuperación de energía seleccionado**
- 9. Ficha técnica del modelo de aerogenerador seleccionado**
- 10. Informe de estimación de costes según LewaPlus**

2020-04-15 12:24:39

Dimensionado de una instalación de ósmosis inversa alimentada por energías renovables

1/12

Especificación general**Descripción del proyecto**

Proyecto Nº: 1

Fecha: 2020-02-03

Título del proyecto: Trabajo de Fin de Grado

Subtítulo del proyecto: Dimensionado de una instalación de ósmosis inversa alimentada por energías renovables

Comentarios: Se adjunta el informe final del dimensionado del bastidor de membranas.

Los avisos que muestra LewaPlus en relación a la necesidad de añadir un antiincrustante (pág. 3/12) pueden ignorarse, en tanto que no se puede añadir desde el propio software., y ya se ha considerado en el dimensionado de los tratamientos del agua (véase anexo III)

Cliente

Nombre: ULL

Teléfono:

Ubicación:

Fax:

Contacto:

Correo electrónico:

Diseñador

Nombre: Alexander Hernandez García

Teléfono:

Ubicación:

Fax:

Contacto:

Correo electrónico: alu0100901283@ull.edu.es

2020-04-15 12:24:39

Ósmosis Inversa

Dimensionado de una instalación de ósmosis inversa alimentada por energías renovables

2/12

Análisis del agua de alimentación

Fecha de la toma de muestras: 2020-02-03

Origen del agua:	Agua de mar, pozo de playa (Gáldar, Gran Canaria)		
Tipo de agua:	Agua de mar, pozo de playa	País: España	
Caudal de aporte:	277,78 [m³/h]		

Cationes	Original	Unidad	[mg/l]	[meq/l]	Aniones	Original	Unidad	[mg/l]	[meq/l]
Na	11870,00000	[mg/l]	11870,00000	516,31144	Cl	21280,00000	[mg/l]	21280,00000	600,28209
Ca	431,00000	[mg/l]	431,00000	21,50699	SO ₄	3148,00000	[mg/l]	3148,00000	65,54237
Mg	1470,00000	[mg/l]	1470,00000	120,88816	CO ₃	3,69535	[mg/l]	3,69535	0,12318
K	451,00000	[mg/l]	451,00000	11,53453	HCO ₃	141,50000	[mg/l]	141,50000	2,31891
Sr	10,00000	[mg/l]	10,00000	0,22826	NO ₃	0,70000	[mg/l]	0,70000	0,01129
Ba	0,01700	[mg/l]	0,01700	0,00025	F	0,86200	[mg/l]	0,86200	0,04537
NH ₄	0,00000	[mg/l]	0,00000	0,00000	SiO ₂	1,10000	[mg/l]	1,10000	0,01831
Fe(II)	0,02500	[mg/l]	0,02500	0,00090	B	5,23000	[mg/l]	5,23000	0,48381
Mn	0,00300	[mg/l]	0,00300	0,00011	PO ₄	0,00000	[mg/l]	0,00000	0,00000
Al	0,00000	[mg/l]	0,00000	0,00000	Br	0,50000	[mg/l]	0,50000	0,00626
					As(III)	0,00000	[mg/l]	0,00000	0,00000
					As(V)	0,00000	[mg/l]	0,00000	0,00000
H+			0,00001	0,00001	OH-			0,07630	0,00449
Suma C				670,47062	Suma A				668,32946
+ Na			0,00000	0,00000	+ Cl			75,74558	2,13669

Otros

Temperatura	21,00 [°C]	Turbidez	0,00 [NTU]	Fe (total)	0,00 [ppm]
pH	8,00	SDI	0,00	Cloro libre	0,00 [ppm]
CO ₂	1,54 [mg/l]	TSS	0,00 [ppm]	H ₂ S	0,00 [ppm]
		TOC	0,00 [ppm]		

Resumen

TDS	38889,38 [ppm]
Conductividad	56035,22 [µS/cm]
Presión osmótica	27,03 [bar]
Fuerza iónica	0,774

Comentarios

Notas y mensajes de advertencia

- Diseño: Valores saturación excedidos. Ajuste el pH del agua de aporte o utilice un antiincrustante.

Parámetros del sistema

Tipo de agua	Agua de mar, pozo de playa
Temperatura	21,00 [°C]
Recuperación	45,00 [%]
Recuperación hidráulica	45,00 [%]
Presión bomba descarga	66,54 [bar]
Caudal del agua de aporte	277,78 [m³/h]
Caudal de aporte, etapa 1	277,78 [m³/h]
Caudal del permeado	125,00 [m³/h]
Caudal del permeado en el sistema	125,00 [m³/h]

Configuración del sistema

Paso	1 / 1
Número de etapas / elementos de membrana	1 / 196
Permeado, mezcla	No
Permeado, recirculación	No
Rechazo, recirculación	No
Dispositivo recuperación energía	Isobárico
Dimensionado de la unidad por defecto	50,90 [m³/h]
Fuga / Cudal en exceso	1,00 / 0,00 [%]

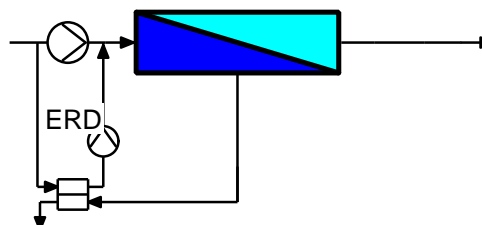
Etapas

		1
Tipo de elemento		RO S400 HR
Tubos / Elementos por tubo		28 / 7
Presión de la agua de aprte	[bar]	66,54
Presión del concentrado	[bar]	65,25
Presión del permeado	[bar]	0.00
Permeado, flujo	[l/m²/h]	17,14
Caudal del agua de aporte por tubo	[m³/h]	9,92
Caudal del concentrado por tubo	[m³/h]	5,46

Ajuste del pH

pH	6,50
Producto químico	H2SO4
Dosificación (100%)	39,68 [mg/l]

Diseño del paso 1



Parámetros de la membrana

Edad de membrana promedia	3,00 [a]
Edad de la membrana promedia	3,00 [a]
Tasa disminución, caudal	6,00 [%]
Aumento de paso de sal	11,00 [%/a]
Flujo medio del permeado	17,14 [l/m²/h]
Salinidad del permeado	176,91 [mg/l]
Conductividad del permeado	324,92 [µS/cm]

Composición e incrustaciones del 1º paso

2020-04-15 12:24:39

Ósmosis Inversa

Dimensionado de una instalación de ósmosis inversa alimentada por energías renovables

6/12

Composición	Agua de aporte Agua cruda	Agua de aporte Tratado	Agua de aporte Mezclada	Concentrado	Permeado	Permeado Final	Incrustación	Agua de aporte
Iones				[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	CaSO ₄ [% Sat.]	24,64
Na	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	21628,895	61,239	61,239	BaSO ₄ [% Sat.]	83,60
Ca	11870,000	11870,000	11922,679	786,494	0,779	0,779	SrSO ₄ [% Sat.]	36,27
Mg	431,000	431,000	432,913	2682,475	2,656	2,656	SiO ₂ [% Sat.]	0,98
K	1470,000	1470,000	1476,524	820,865	3,489	3,489	CaF ₂ [% Sat.]	71,43
Sr	451,000	451,000	453,002	18,248	0,018	0,018	Ca ₃ (PO ₄) ₂	0,00
Ba	10,000	10,000	10,044	0,031	0,000	0,000	LSI	-0,74
NH ₄	0,017	0,017	0,017	0,000	0,000	0,000	SDSI	-1,70
Fe(II)	0,000	0,000	0,000	0,046	0,000	0,000	Incrustación	Concentrado
Mn	0,025	0,025	0,025	0,005	0,000	0,000	CaSO ₄ [% Sat.]	52,32
Al	0,003	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000	BaSO ₄ [% Sat.]	173,31
Cl	0,000	0,000	0,000	38913,327	104,124	104,124	SrSO ₄ [% Sat.]	76,55
SO ₄	21355,746	21355,746	21450,523	5817,398	3,110	3,110	SiO ₂ [% Sat.]	1,83
CO ₃	3148,000	3186,867	3201,010	0,327	0,000	0,000	CaF ₂ [% Sat.]	490,25
HCO ₃	3,695	0,082	0,083	181,599	0,486	0,486	Ca ₃ (PO ₄) ₂	0,00
NO ₃	141,500	99,754	100,197	1,256	0,027	0,027	LSI	-0,00
F	0,700	0,700	0,703	1,570	0,005	0,005	SDSI	-1,01
SiO ₂	0,862	0,862	0,866	2,005	0,005	0,005	Incrustación	Permeado
B	1,100	1,100	1,105	8,756	0,972	0,972	LSI	-7,22
PO ₄	5,230	5,230	5,253	0,000	0,000	0,000	RI	18,81
Br	0,000	0,000	0,000	0,911	0,002	0,002	CCPP	-286,46
As(III)	0,500	0,500	0,502	0,000	0,000	0,000		
As(V)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
CO ₂	0,000	0,000	0,000	34,298	34,298	34,298		
TDS [mg/l]	1,538	34,298	34,298	70864,208	176,912	176,912		
pH	38889,378	38882,886	39055,449	6,734	4,359	4,359		
Conductividad [µS/cm]	8,000	6,500	6,500	99347,842	324,925	324,925		
Presión osmótica [bar]	56035,222	56050,933	56288,267	50,812	0,153	0,153		
LSI	27,034	27,025	27,147	-0,000	-7,224	-7,224		
	0,915	-0,743	-0,739					

Detalles de etapa para 1º paso

Etapa 1

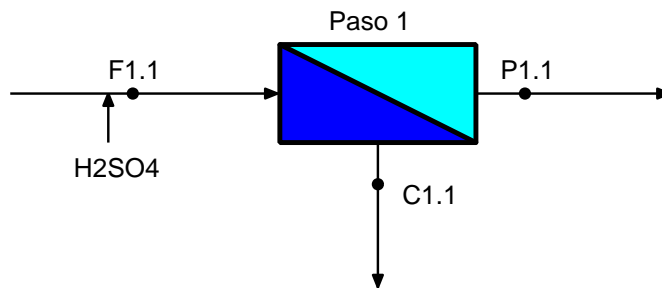
Composición	Concentrado	Permeado
Iones	[mg/l]	[mg/l]
Na	21628,895	61,239
Ca	786,494	0,779
Mg	2682,475	2,656
K	820,865	3,489
Sr	18,248	0,018
Ba	0,031	0,000
NH ₄	0,000	0,000
Fe(II)	0,046	0,000
Mn	0,005	0,000
Al	0,000	0,000
Cl	38913,327	104,124
SO ₄	5817,398	3,110
CO ₃	0,327	0,000
HCO ₃	181,599	0,486
NO ₃	1,256	0,027
F	1,570	0,005
SiO ₂	2,005	0,005
B	8,756	0,972
PO ₄	0,000	0,000
Br	0,911	0,002
As(III)	0,000	0,000
As(V)	0,000	0,000
CO ₂	34,298	34,298
TDS	[mg/l] 70864,208	176,912
pH	6,734	4,359
Conductividad	[µS/cm] 99347,842	324,925
Presión osmótica	[bar] 50,812	0,153
LSI	-0,000	-7,224

Detalles del elemento para paso 1 (10)

Etapa 1	Edad	Recuperación	Beta	Permeado Caudal	Permeado Caudal	Permeado TDS	Concentrado Caudal	Concentrado TDS	Agua de aporte Caudal	Agua de aporte TDS
# Elemento	[a]	[%]		[l/m ² /h]	[m ³ /h]	[mg/l]	[m ³ /h]	[mg/l]	[m ³ /h]	[mg/l]
1 RO S400 HR	3,0	10,13	1,08	27,02	1,01	86,69	8,92	43448,85	9,92	39055,45
2 RO S400 HR	3,0	9,81	1,08	23,50	0,87	109,73	8,04	48160,88	8,92	43448,85
3 RO S400 HR	3,0	9,25	1,08	19,99	0,74	141,10	7,30	53055,10	8,04	48160,88
4 RO S400 HR	3,0	8,48	1,07	16,63	0,62	183,93	6,68	57952,14	7,30	53055,10
5 RO S400 HR	3,0	7,54	1,06	13,54	0,50	242,47	6,18	62658,51	6,68	57952,14
6 RO S400 HR	3,0	6,52	1,05	10,82	0,40	322,25	5,77	67002,75	6,18	62658,51
7 RO S400 HR	3,0	5,48	1,04	8,51	0,32	430,41	5,46	70864,21	5,77	67002,75

Panorámica de un diseño de sistema

Tasas de recuperación		[%]
Paso 1	Recuperación	45,00
	Recuperación hidráulica	45,00
Sistema	Recuperación	45,00



Lista de los tipos de elementos

Tipo	Conteo
RO S400 HR	196

Paso 1

Presión de la agua de aporte	66,54 [bar]
Presión del concentrado	65,25 [bar]

	Posición	Caudal [m ³ /h]	TDS [mg/l]	Conductividad [μS/cm]	pH [-]
Agua de aporte	F1.1	277,78	38882,89	56050,93	6,50
Permeado	P1.1	125,00	176,91	324,92	4,36
Concentrado	C1.1	152,78	70864,21	99347,84	6,73

Incrustación Paso 1 [% Sat.]

Concentrado	CaSO ₄	52,32
Ca ₃ (PO ₄) ₂	0,00	BaSO ₄ 173,31
LSI	-0,00	SrSO ₄ 76,55
SDSI	-1,01	SiO ₂ 1,83
	CaF ₂	490,25

Consumo de energía del sistema

Capacidad del sistema	3000,0 [m ³ /d]	Potencia eléctrica total	318,39 [kW]
Recuperación del sistema	45,0 [%]	Consumo de energía específico	2,55 [kWh/m ³]

Consumo de energía en 1º paso

Bomba de alta presión		Bomba de circulación		ERD isobárico	
Caudal de la bomba	127,11 [m ³ /h]	Caudal de la bomba	150,67 [m ³ /h]	Caudal del concentrado	152,78 [m ³ /h]
Presión bomba succión	2,00 [bar]	Presión booster	1,90 [bar]	Número de unidades ERD	4
Presión agua aporte	66,54 [bar]	Eficiencia del booster	81,10 [%]	Caudal por unidad	38,19 [m ³ /h]
Presión de la bomba adicional	0,00 [bar]	Eficiencia del motor	98,00 [%]	Lubricación por unidad	0,53 [m ³ /h]
Presión bomba descarga	66,54 [bar]	Potencia del motor	9,99 [kW]	Presión de la agua de aporte ERD	6,48 [bar]
Eficiencia de bomba	75,40 [%]			Presión de entrada	65,25 [bar]
Eficiencia del motor	98,00 [%]			Presión de descarga (alta)	64,64 [bar]
Potencia del motor	308,40 [kW]			Presión de descarga (baja)	6,09 [bar]
				Fuga / Cuadal en exceso	1,00 / 0,00 [%]
				Eficiencia ERD	97,49 [%]

Post-tratamiento

Post-tratamiento				Composición	Etapas 0	Etapas 1	Etapas 2	Etapas 3
Etapas	Descripción	Producto químico	Cantidad	Iones	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
0	Permeado			Na	61,239	61,239	61,239	64,171
1	Eliminación de CO ₂ (Concentración tras el desgasificador)		27,5 [mg/l]	Ca	0,779	0,779	20,801	20,801
2	Añadir producto químico	CaCO ₃	50,0 [mg/l]	Mg	2,656	2,656	2,656	2,656
3	Añadir producto químico	NaOH	5,1 [mg/l]	K	3,489	3,489	3,489	3,489
				Sr	0,018	0,018	0,018	0,018
				Ba	0,000	0,000	0,000	0,000
				NH ₄	0,000	0,000	0,000	0,000
				Fe(II)	0,000	0,000	0,000	0,000
				Mn	0,000	0,000	0,000	0,000
				Al	0,000	0,000	0,000	0,000
				Cl	104,124	104,124	104,124	104,124
				SO ₄	3,110	3,110	3,110	3,110
				CO ₃	0,000	0,000	0,102	0,483
				HCO ₃	0,486	0,486	89,689	96,654
				NO ₃	0,027	0,027	0,027	0,027
				F	0,005	0,005	0,005	0,005
				SiO ₂	0,005	0,005	0,005	0,005
				B	0,972	0,972	0,972	0,972
				PO ₄	0,000	0,000	0,000	0,000
				Br	0,002	0,002	0,002	0,002
				As(III)	0,000	0,000	0,000	0,000
				As(V)	0,000	0,000	0,000	0,000
				CO ₂	34,298	27,500	7,059	1,756
				TDS [mg/l]	176,912	176,912	286,239	296,516
				pH	4,359	4,455	7,308	7,942
				Conductividad [µS/cm]	324,925	322,544	410,381	420,056
				LSI	-7,224	-7,128	-0,552	0,120
				RI	18,807	18,711	8,412	7,702
				CCPP	-286,458	-225,936	-12,198	-1,528

Exención de responsabilidades

Este programa de software LewaPlus se utiliza para el dimensionamiento y el cálculo de sistemas de resinas de intercambio iónico y de sistemas de membranas de ósmosis inversa (en adelante OI) aplicados en el tratamiento de agua.

Dentro de este programa, Lanxess pone a disposición al diseñador del sistema ciertos conocimientos con respecto al diseño y a la operación de productos Lanxess específicamente diseñados para intercambio de iones (en configuraciones únicas: como lecho fluidificado, Lift bed, Multistep y Rinse Bed), así como otras tecnologías de intercambio de iones existentes. Además, Lanxess pone a disposición al diseñador de instalaciones ciertas informaciones sobre el diseño y la operación de sistemas de membranas de ósmosis inversa, incluyendo cálculos de incrustaciones, químicos y proyecciones de costes de energía y de capital, y proyecciones de costes operativos basadas en el pretratamiento del agua de alimentación, y las decisiones de diseño hecho por el diseñador.

Este conocimiento se da de buena fé pero sin garantía ninguna. Nuestro consejo no le exime de su obligación de comprobar la información recibida recientemente - especialmente élla encontrándose en nuestras hojas de datos de seguridad y en las hojas de información técnica - y probar nuestros productos en cuanto a su idoneidad para los procedimientos y fines previstos. La aplicación, la utilización y la transformación de nuestros productos y de los productos fabricados por ustedes sobre la base de nuestro asesoramiento técnico están fuera de nuestro control y, por lo tanto, exclusivamente bajo su propia responsabilidad.

Nuestros productos se venden en conformidad con la versión actual de nuestras Condiciones Generales de Venta y Suministro.

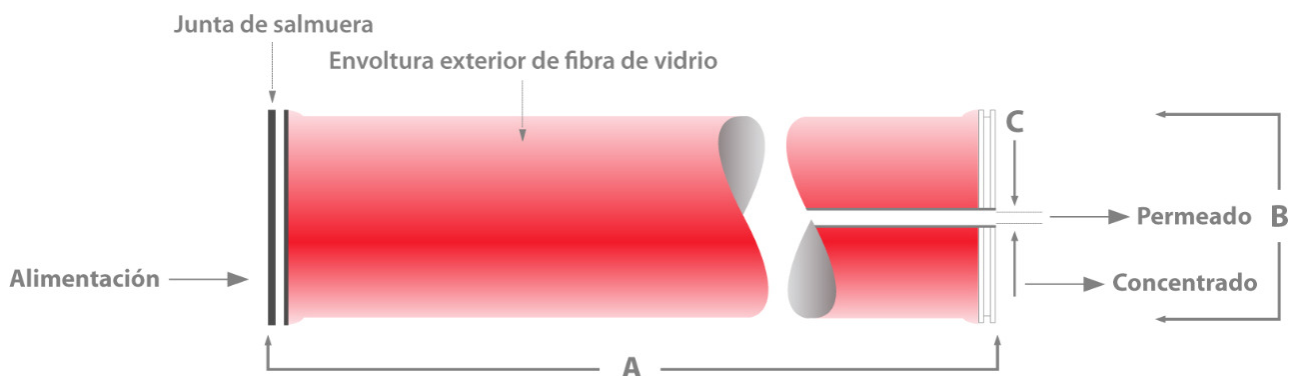
Lewabrane® RO S400 HR es un elemento de membrana composite de poliamida diseñado para la desalación de agua de mar. La membrana S400 HR se caracteriza por una duración extrema, polímero altamente reticulado y un separador apropiado para aplicaciones de alta salinidad y alta presión. Lewabrane® RO S400 HR se recomienda para aplicaciones de paso único donde un rechazo salino estable, durante el tiempo de vida útil esperado, es un punto de consideración importante.

Información general

	Sistema métrico	Unidades americanas
Espesor del espaciador de alimentación	0,8 mm	31 mil
Área de la membrana	37,2 m ²	400 ft ²
Rechazo de sal, promedio	99,8 %	99,8 %
Rechazo de sal, min.	99,5 %	99,5 %
Rechado de Boro, típico	93,0 %	93,0 %
Flujo del permeado, promedio	24,6 m ³ /d	6500 gpd
Flujo del permeado, min.	19,7 m ³ /d	5200 gpd

El elemento es testado según las siguientes condiciones: presión 55,2 bar (800 psi), concentración NaCl 32.000 mg/l (o cuando es testado en una solución mezcla de 32.000 mg/l NaCl y 5 mg/l Boro), temperatura 25°C (77 °F), pH 8 y tasa de recuperación del 8%

Dimensiones del elemento



	A (Longitud)	B (Diámetro)	C (ID)
Sistema métrico	1016 mm	201 mm	29 mm
Unidades americanas	40 inch	7.9 inch	1.125 inch

Datos de aplicación

	Sistema métrico	Unidades americanas
Presión de operación, máx.	83 bar	1200 psi
Temperatura de operación, máx.	45°C	113°F
SDI del agua de alimentación, máx	5	5
Caudal de alimentación, máx.	18,0 m³/h	80 gpm
Flujo del concentrado, min.	2,7 m³/h	12 gpm
Rango de pH durante en operación	2 - 11	2 - 11
Rango de pH durante la limpieza	1 - 12	1 - 12
Pérdida de carga por elemento, máx.	1,0 bar	15 psi
Pérdida de carga por tubo de presión, máx.	3,5 bar	50 psi
Concentración de cloro, máx.	0,1 ppm	0,1 ppm

Información adicional

- Tratar los elementos con cuidado, no dejarlos caer.
- Cada elemento es testado en húmedo, conservado en una solución de bisulfito sódico al 1% en peso, y empaquetado al vacío en un embalaje impermeable al oxígeno.
- Durante el almacenaje evitar las heladas y la exposición directa a los rayos solares. La temperatura debe ser inferior a los 35 °C (95 °F).

Tras el montaje

- Guardar los elementos de ósmosis inversa en estado húmedo, y utilizar una solución conservante compatible para almacenajes superiores a los 7 días.
- En la puesta en marcha inicial verter el permeado durante los primeros 30 min..
- La contrapresión del permeado no debe sobrepasar jamás la presión de alimentación.
- Tomar en consideración la limpieza de la membrana, si la pérdida de carga se incrementa en un 20%, o la permeabilidad decrece en un 10%.
- Utilizar sólo productos químicos compatibles con la membrana.
- Para información detallada consultar el Lewabrane® manual de nuestra website www.lpt.lanxess.com.

La información precedente, así como nuestro asesoramiento técnico –ya sea de palabra, por escrito o mediante ensayos se proporcionan según nuestro leal saber y entender, pero a pesar de ello se consideran como meras advertencias e indicaciones no vinculantes, también por lo que respecta a los posibles derechos de propiedad industrial de terceros. El asesoramiento no les exime a ustedes de verificar los datos suministrados –especialmente los contenidos en nuestras fichas de seguridad y en las fichas técnicas de nuestros productos – ni de comprobar si los productos son adecuados para los procedimientos o los fines previstos. La aplicación, el empleo y la transformación de nuestros productos y de los productos fabricados por ustedes sobre la base de nuestro asesoramiento técnico se efectúan fuera de nuestras posibilidades de control y radican exclusivamente en la esfera de responsabilidad de ustedes. La venta de nuestros productos se realiza según nuestras Condiciones Generales de Venta y Suministro en su versión actual.

Este documento contiene información importante y debe ser leído por completo.

Edición: 2014-07-24
Edición previa: 2014-05-23

Compact data sheet



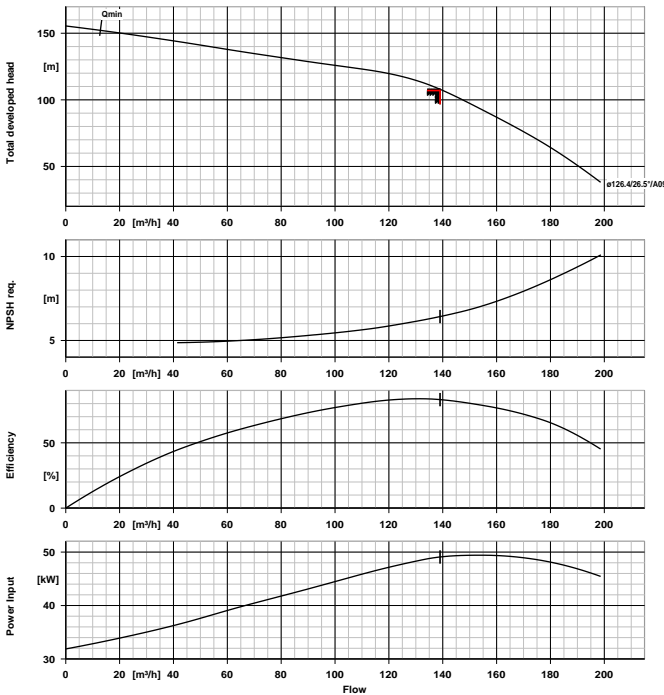
Customer item no.:
 Communication dated:
 Doc. no.: Cotización rápida
 Quantity: 1

Number: ES 5736981
 Item no.:100
 Date:
 Page: 1 / 1

UPAS 200-135/07EE+UMA-S200D 55/22

Version no.:

UPAS 200-135/07EE+UMA-S200D 55/22



Pumped medium	Water
	Clean water
	Not containing chemical and mechanical substances which affect the materials
Ambient air temperature	20.0 °C
Fluid temperature	21.0 °C
Actual flow rate	139.00 m³/h
Dev. head without non-return valve	107.50 m
Efficiency without non-return valve	82.8 %
Power absorbed	49.04 kW
Operating pressure (for indicated duty conditions)	15.21 bar.g
Design	Single system 1 x 100 %

Driver, accessories

Motor speed	3000 rpm
Frequency	100 Hz
Designed for operation with frequency inverter	Yes
Rated voltage	400 V
Rated power P2	55.00 kW
Available reserve	11.24 %
Rated current	91.0 A
Motor enclosure	IP68
Starting mode	Starting via frequency inverter / parallel
Drinking water filling	No
J2 Winding	Yes
Short cable	F3+F4 parallel
Short cable cross section	16.00 mm²
Length of short cable	6.00 m
Extension cables designed for installation in open air, laid along a surface.	
Cable shielding	Without
Shroud type	Without

Design

Pump standard	Submersible bore hole pumps
Design	Close-coupled
Orientation	Vertical
Design according to standard	Drinking water acc. to ACS
Discharge nominal dia.	G 5
Discharge nominal pressure	PN 40
Discharge flange drilled according to standard	EN ISO 228-1
Impeller diameter	127.0 mm
Min. fluid level above pump	0.50 m
Non return valve	With
Suction Strainer	With
Valve plate drilled	No
Suction hood	Without
Bearing pedestal	Without
Max. outside diameter	189.0 mm
Total length of unit	2532.0 mm

Materials C2

Suction casing (106)	Stainless steel 1.4408
Stage casing (108)	Stainless steel 1.4408
Pump shaft (211)	Duplex stainless steel 1.4462
Clockwise impeller (232)	Stainless steel 1.4408

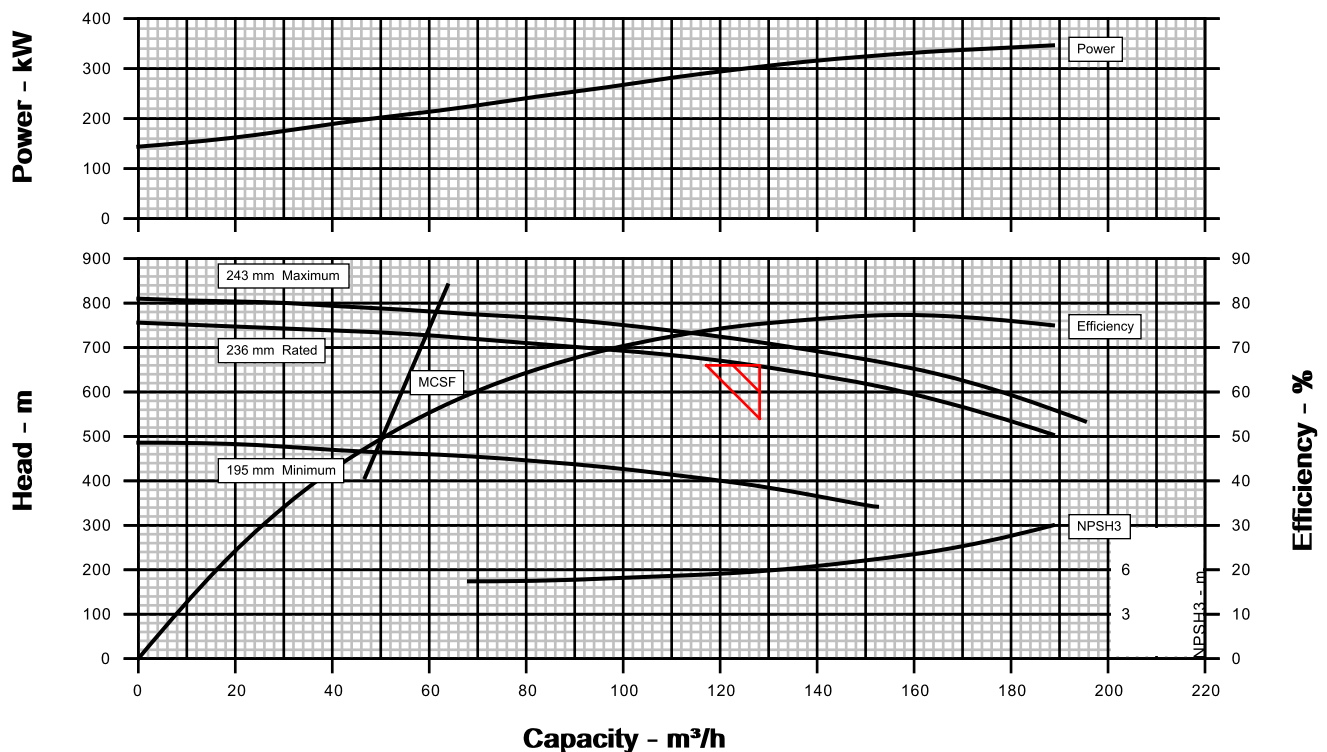
Operating data

Customer	: Alex Hernandez	Pump / Stages	: 3X10DMX -A / 7
Customer reference	: -	Based on curve no.	: 3X10DMX-1-5
Item number	: 1	Flowserve reference	: 2480429618
Service	: -	Date	: April 12, 2020

Operating Conditions		Materials / Specification	
Capacity (rated/normal)	: 128.0 m³/h / -	Material column code	: S6
Water capacity (CQ=1.00)	: -	Pump specification	: -
Total developed head	: 658.00 m	Other Requirements	
Water head (CH=1.00)	: -	Hydraulic selection	: No specification
NPSHa/NPSHa less margin	: 10.4 m / -	Construction	: No specification
Maximum suction pressure	: 0.0 kPa.g	Test tolerance	: ANSI/HI 14.6 Grade 1B
Liquid		Driver Sizing	: Max Power(MCSF to EOC) using SF
Liquid type	: Other	Seal configuration	: Single seal
Liquid description	: -		
Temperature	: 16 °C		
Density / Specific gravity	: - / 1.000		
Solid Size - Actual / Limit	: - / -		
Viscosity / Vapor pressure	: 1.00 cP / -		

Performance			
Hydraulic power	: 229 kW	Impeller diameter	
Pump speed	: 3560 rpm	Rated	: 236 mm
Pump overall efficiency (CE=1.00)	: 75.4 %	Maximum	: 243 mm
NPSH required (NPSH3)	: 5.9 m	Minimum	: 195 mm
Rated brake power	: 304 kW	Ns / Nss	: 1541 / 10305 (Metric units)
Maximum brake power	: 344 kW	Minimum continuous flow	: 59.5 m³/h
Driver power rating	: 500 hp / 373 kW	Maximum head at rated diameter	: 753.71 m
Casing working pressure	: 7927.9 kPa.g	Flow at BEP	: 158.7 m³/h
(based on shut off @ max dia/rated SG)		Flow as % of BEP	: 80.7 %
Maximum allowable	: 8273.7 kPa.g	Efficiency at normal flow	: -
Hydrostatic test pressure	: 12410.6 kPa.g	Impeller diameter ratio (rated/max)	: 97.4 %
Estimated rated seal chamber pressure	: -	Head rise to shut off	: 14.5 %
		Total head ratio (rated / max) / (max / rated)	: 92.1 % / 108.6 %

CURVES ARE APPROXIMATE, PUMP IS GUARANTEED FOR ONE SET OF CONDITIONS; CAPACITY, HEAD, AND EFFICIENCY.



Installation and Input

Dimensioning flow: 125 m³/h
Total head: 262 m

Viscosity: 1 mm²/s
Density: 998.2 kg/m³
Min. liquid temperature: 10 °C



Sizing Results

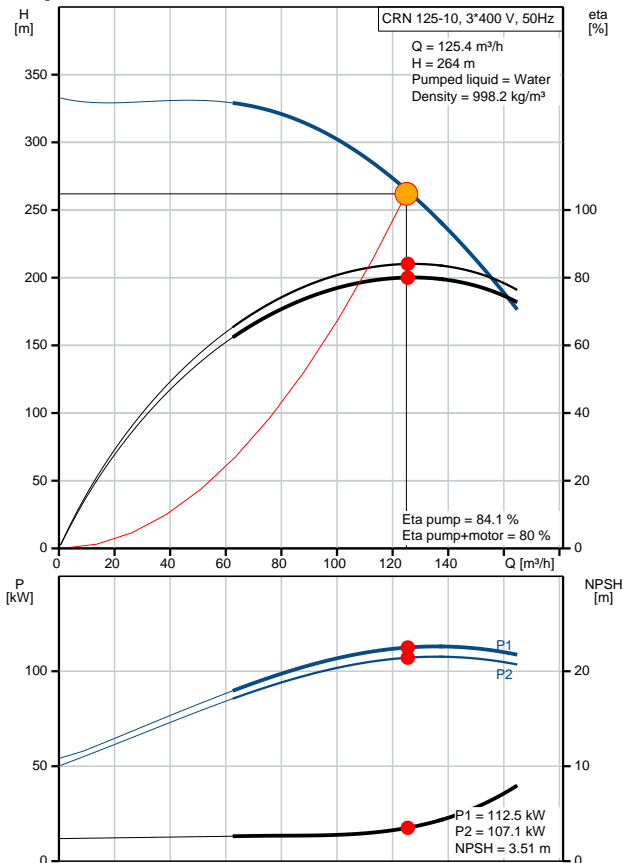
Type CRN 125-10
Quantity * Motor 1 * 110 kW

Flow	125.4 m ³ /h (+0%)
H total	264 m (+1%)
Power P1	112.5 kW
Power P2 required in the duty point	107.1 kW
Eta pump	84.1 %
Eta motor	95.2 %
Eta pump+motor	80.0 % =Eta pump * Eta motor
Flow total	139651 m ³ /year
Energy consumption	125260 kWh/Year
Price	On request
Life cycle cost	218069 EUR /5Years

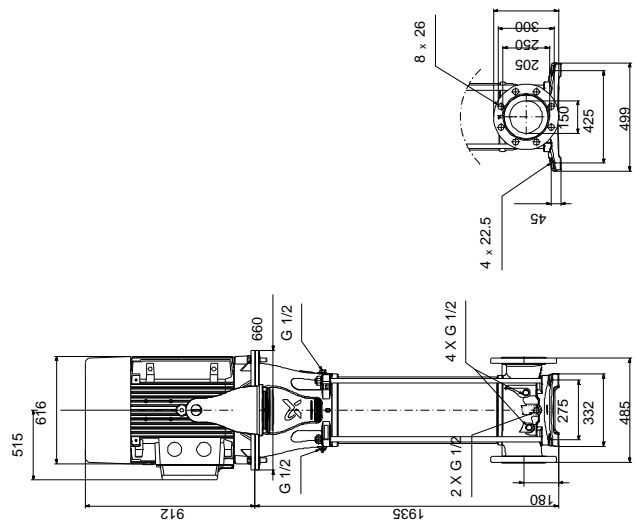
Load profile

	1	
Flow	100 %	
Head	101 %	
P1	112.5 kW	
Eta total	80.0 %	
Time	1113 h/a	
Energy consumption	125260 kWh/Year	
Quantity	1	

Pump Curve



Dimensional Drawing

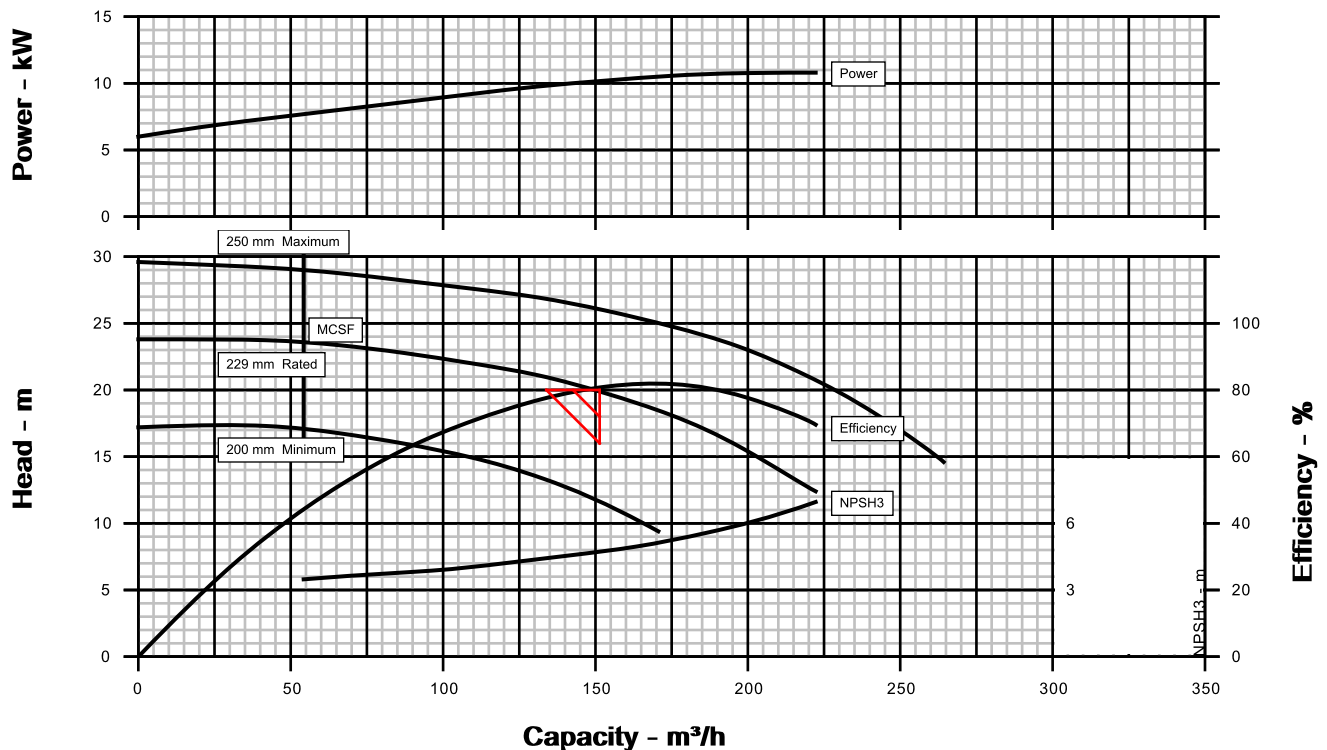


Customer	: Alex Hernandez	Pump / Stages	: VMB 25-15 / 1
Customer reference	: -	Based on curve no.	: -70
Item number	: -	Flowserve reference	: 2480429618
Service	: -	Date	: April 12, 2020

Operating Conditions		Materials / Specification	
Capacity (rated/normal)	: 151.0 m ³ /h / -	Material column code	: G-2
Water capacity (CQ=1.00)	: -	Pump specification	: -
Total developed head	: 20.00 m	Other Requirements	
Water head (CH=1.00)	: -	Hydraulic selection	: No specification
NPSHa/NPSHa less margin	: 10.4 m / -	Construction	: No specification
Maximum suction pressure	: 0.0 kPa.g	Test tolerance	: ANSI/HI 14.6 Grade 1B
Liquid		Driver Sizing	: Max Power(MCSF to EOC) using SF
Liquid type	: Other	Seal configuration	: Single Seal
Liquid description	: -		
Temperature	: 16 °C		
Density / Specific gravity	: - / 1.000		
Solid Size - Actual / Limit	: - / -		
Viscosity / Vapor pressure	: 1.00 cP / -		

Performance			
Hydraulic power	: 8.21 kW	Impeller diameter	
Pump speed	: 1740 rpm	Rated	: 229 mm
Pump overall efficiency (CE=1.00)	: 81.1 %	Maximum	: 250 mm
NPSH required (NPSH3)	: 4.7 m	Minimum	: 200 mm
Rated brake power	: 10.1 kW	Ns / Nss	: - / 8841 (Metric units)
Maximum brake power	: 10.8 kW	Minimum continuous flow	: 54.0 m ³ /h
Driver power rating	: 15.0 hp / 11.2 kW	Maximum head at rated diameter	: 23.75 m
Casing working pressure	: 232.6 kPa.g	Flow at BEP	: 169.6 m ³ /h
(based on shut off @ cut dia/rated SG)		Flow as % of BEP	: 89.0 %
Maximum allowable	: 1300.0 kPa.g	Efficiency at normal flow	: -
Hydrostatic test pressure	: 1300.0 kPa.g	Impeller diameter ratio (rated/max)	: 91.7 %
Estimated rated seal chamber pressure	: -	Head rise to shut off	: 18.8 %
		Total head ratio (rated / max) / (max / rated)	: 76.5 % / 130.7 %

CURVES ARE APPROXIMATE, PUMP IS GUARANTEED FOR ONE SET OF CONDITIONS; CAPACITY, HEAD, AND EFFICIENCY.

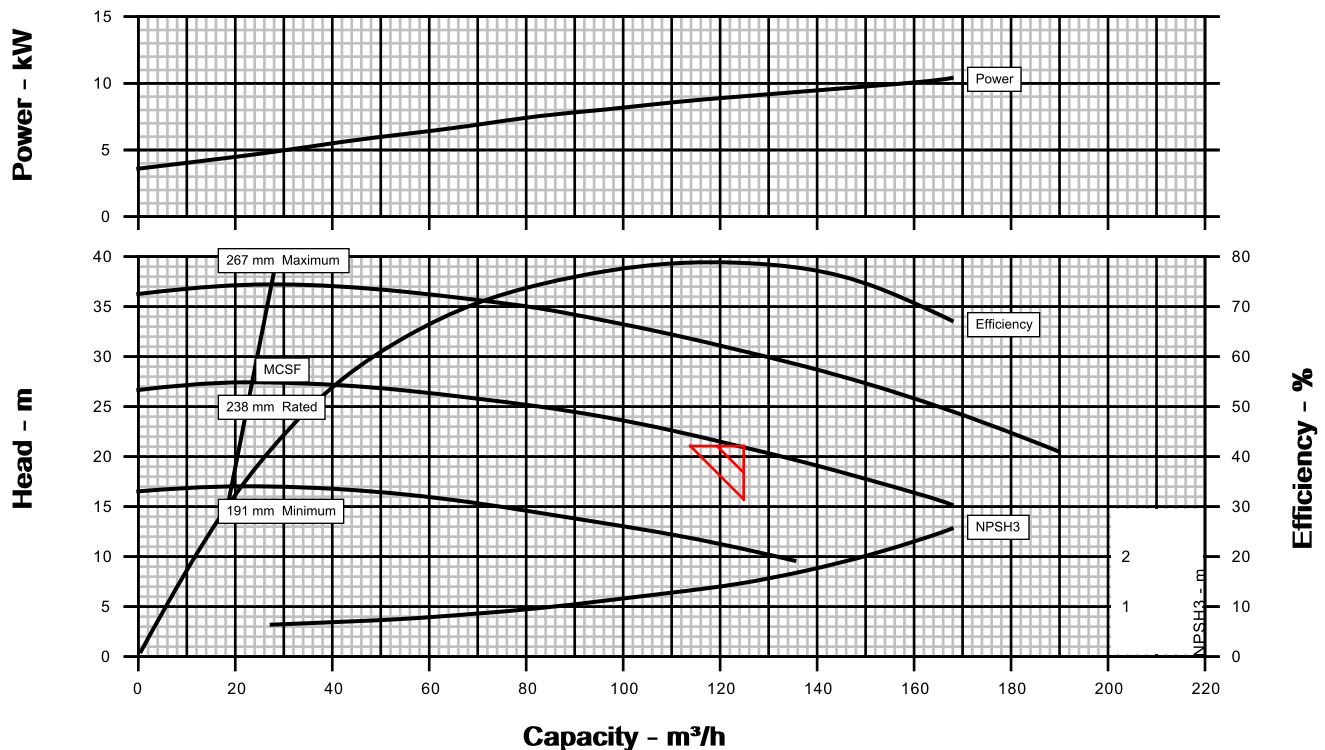



Customer	: Alex Hernandez	Pump / Stages	: 4LR-11A / 1
Customer reference	: -	Based on curve no.	: A-19107R1
Item number	: -	Flowserve reference	: 2480429618
Service	: -	Date	: April 12, 2020

Operating Conditions		Materials / Specification	
Capacity (rated/normal)	: 125.0 m³/h / -	Material column code	: SF
Water capacity (CQ=1.00)	: -	Pump specification	: -
Total developed head	: 21.00 m	Other Requirements	
Water head (CH=1.00)	: -	Hydraulic selection : No specification	
NPSHa/NPSHa less margin	: 10.4 m / -	Construction : No specification	
Maximum suction pressure	: 0.0 kPa.g	Test tolerance : ANSI/HI 14.6 Grade 1B	
Liquid		Driver Sizing : Max Power(MCSF to EOC) using SF	
Liquid type	: Other	Performance data based on standard impeller	
Liquid description	: -		
Temperature	: 16 °C		
Density / Specific gravity	: - / 1.000		
Solid Size - Actual / Limit	: - / 18.034 mm		
Viscosity / Vapor pressure	: 1.00 cP / -		

Performance			
Hydraulic power	: 7.14 kW	Impeller diameter	
Pump speed	: 1770 rpm	Rated	: 238 mm
Pump overall efficiency (CE=1.00)	: 79.1 %	Maximum	: 267 mm
NPSH required (NPSH3)	: 1.5 m	Minimum	: 191 mm
Rated brake power	: 9.02 kW	Ns / Nss	: 1624 / 9956 (Metric units)
Maximum brake power	: 10.4 kW	Minimum continuous flow	: 24.1 m³/h
Driver power rating	: 15.0 hp / 11.2 kW	Maximum head at rated diameter	: 26.80 m
Casing working pressure	: 262.4 kPa.g	Flow at BEP	: 119.6 m³/h
(based on shut off @ cut dia/rated SG)		Flow as % of BEP	: 104.5 %
Maximum allowable	: 1206.6 kPa.g	Efficiency at normal flow	: -
Hydrostatic test pressure	: 1827.1 kPa.g	Impeller diameter ratio (rated/max)	: 89.3 %
Estimated rated seal chamber pressure	: -	Head rise to shut off	: 27.6 %
		Total head ratio (rated / max) / (max / rated)	: 68.7 % / 145.5 %

CURVES ARE APPROXIMATE, PUMP IS GUARANTEED FOR ONE SET OF CONDITIONS; CAPACITY, HEAD, AND EFFICIENCY.



		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
		2	RBC			RAB	Corrected typo	3/13/2012		
DESCRIPTION: TECHNICAL DATA SHEET, POSITIVE DISPLACEMENT ENERGY RECOVERY DEVICE				Sheet Page 1 of 1		3	RAB	RBC	Updated logo & Material for LP ports	8/28/2014
						Document number: 80315-01		4	RAB	RBC
				5	RAB			DKH	Updated Performance Section	6/27/2019
1. Part number 40037				2. Service		3. Reference				
OPERATING CONDITIONS	4	Liquid	Seawater	46	TESTS	Performance	Standard			
	5	Operating Temperature	33°F-120°F (0.6-49°C)	47		Case Hydrotest	Standard			
	6	Max. Temperature	120°F (49°C)	48		Rotation Speed Test	Standard			
	7	Specific Gravity	1.03	49		Die Penetrant Test (ceramics)	Standard			
	8	Viscosity	1.060 cP @ 70°F (21.1°C)	50		Cavitation Test	Standard			
	9	Flow range	200 - 300 gpm (45 - 68m3/h)	51		Witnessed Test	Optional			
	10	Maximum High-Pressure Inlet Flow	300 gpm (68 m3/h)	52						
	11	Maximum Low-Pressure Outlet Flow	300 gpm (68 m3/h)	53						
	12	Maximum Inlet High Pressure	1200 psi (82.7 bar)	54						
	13	Maximum Inlet Low Pressure	145 psi (10 bar)	55						
	14	Minimum Discharge Pressure	12 psi (0.8 bar)	56						
	15	Filtration Requirement (Nominal)	20 µm	57						
	16			58		Outside Dimensions	Standard			
	17			59		Internal Components	Standard			
	18			60		Housing Dimensions	Standard			
	19			61		Ceramic Dimensions	Standard			
	PERFORMANCE	20	Peak Efficiency	98%		62	INSPECTION	Material Certificates	Standard	
		21	Maximum High Pressure Differential	14.5 psi (1 bar) @ 300 gpm		63		Visual	Standard	
		22	Maximum Low Pressure Differential	14.5 psi (1 bar) @ 300 gpm		64		Packing and Crating	Standard	
23		Maximum Lubrication Flow	4.4 gpm (1 m3/h) @ 300 gpm	65						
24		Maximum Rotational Speed	1280 rpm @ 300 gpm	66						
25		Salinity Increase at Membranes	Please see ERI Projections	67						
26		Noise Per ISO 3744	Less Than 85 dB(A)	68						
27		Warranted Efficiency***	97.2% at standard conditions	69						
MATERIALS	28	Housing**	GRP	70	SHIPPING WEIGHT AND DIMENSIONS	PX-Q300 unit Shipping Dimensions	47x17x17 inch 119x43x43 cm			
	29	Rotor, Sleeve, Endcover Assembly	Ceramic-alumina			PX-Q300 unit Shipping Weight	210 lbs. (95 kg)			
	30	Low Pressure Inlet Port Fitting	Superduplex (S32750 OR S32760)			Dry PX-Q300 unit weight	200 lbs. (91 kg)			
	31	Low Pressure Outlet Port Fitting	Superduplex (S32750 OR S32760)			Cartridge Shipping Dimensions	20x12x12 inch 51x31x31 cm			
	32	High Pressure Inlet Port Fitting	Superduplex (S32750 OR S32760)			Cartridge Weight	49 lbs. (22 kg)			
	33	High Pressure Outlet Port Fitting	Superduplex (S32750 OR S32760)			Shipping and Storage Temperature	33°F-120°F (0.6-49°C)			
	34	Internal Low Pressure Interconnector	Titanium							
	35	Fasteners/Hardware (non-wetted)	316SS							
	36	Tension Rod Assembly*	AL-6XN* / C-276							
	37	O-rings	EPDM							
PIPING CONNECTIONS	39	Low Pressure Inlet Port Fitting	4" (DN100) Grooved-end Flexible	78	MISCELLANEOUS	Internal Volume	830 in ³ (13,601 cm ³)			
	40	Low Pressure Outlet Port Fitting	Pipe Coupling			Wet Weight	230 lbs. (104 kg)			
	41	High Pressure Inlet Port Fitting	3" (DN80) Grooved-end Flexible							
	42	High Pressure Outlet Port Fitting	Pipe Coupling							
	43									
	44									
	45									
PRICE: sales@energyrecovery.com		MANUFACTURER: Energy Recovery Inc		MODEL: PX-Q300						

*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 standard factory test is conducted under conditions of balanced flow, 1000-psi pressure, and the mid-flow for the PX model under test. For on-site performance warranty values, please refer to the ERI project specific projections.

ERI RESERVES THE RIGHT TO MAKE SPECIFICATION CHANGES AT ANY TIME WITHOUT PRIOR NOTICE.



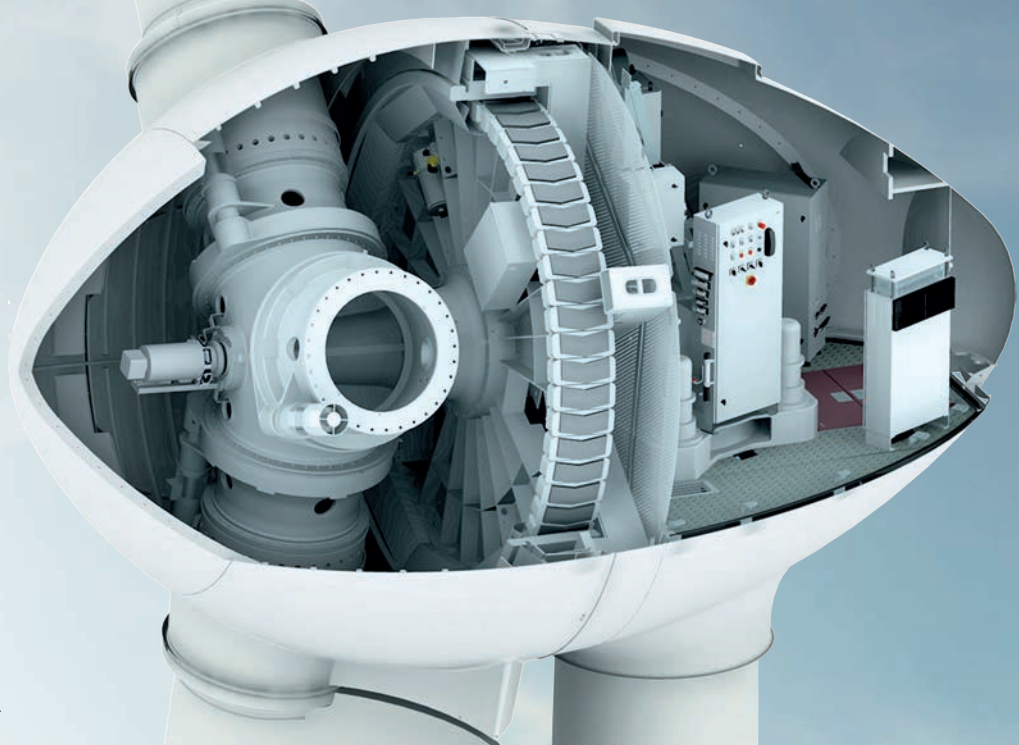
E-44

900 kW



www.enercon.de

 **ENERCON**
ENERGY FOR THE WORLD



TECHNICAL DATA

E-44

Last updated: 08/2019. Technical information subject to change.

GENERAL

Nominal power	900 kW
Wind class (IEC)	IEC IA
Wind zone (DIBt)	-
Turbine concept	gearless, variable speed, full power converter
Design service life	20 years
Cut in wind speed	2.5 m/s
Cut out wind speed	34 m/s
Extreme wind speed at hub height (3-second gust)	70 m/s
Rotational speed	14.0 - 33.1 rpm
Ambient temperature for normal operation	-10 °C to +40 °C
Extreme temperature range	-20 °C to +50 °C
Grid feed / control system	ENERCON inverter
Grid frequency	50 Hz / 60 Hz
Sound power level	100.7 - 103.0 dB(A)* Yield and noise-optimised operation. Further modes on request.

ROTOR

Rotor diameter	44 m
Swept area	1,521 m ²
Type	upwind rotor with active pitch control

TOWER

Hub height	IEC IA	IEC IIA	IEC IIIA
	45 m		
	55 m		

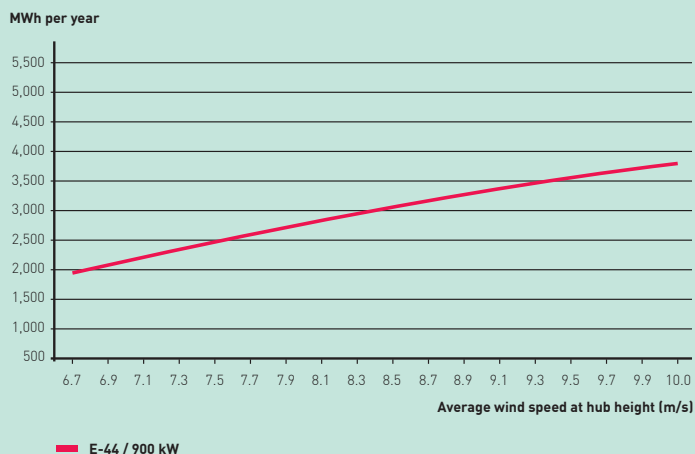
GENERATOR

Type	directly driven, separately excited annular generator
Cooling system	air cooling system

FEATURES

	STANDARD	OPTIONAL
FACTS and transmission	X	
ENERCON SCADA	X	
ENERCON storm control	X	
Ice detection system	X	
Power curve method		
Low radar reflectivity rotor blades		X
Additional ice detection system		X
Blade heating system		X
Hot-Climate		X
Shadow shutdown		X
ENERCON SCADA bat protection		X
STATCOM		X
Inertia Emulation		X
Sector management for wind farms		X
Beacon management for wind farms		X

ANNUAL ENERGY YIELD



* dependent on hub height

2020-07-10 19:03:22

Estimación de costes - Dimensionado de una instalación de ósmosis inversa alimentada por energías renovables

1/8

Especificación general**Descripción del proyecto**

Proyecto Nº: 1

Fecha: 2020-02-03

Título del proyecto: Trabajo de Fin de Grado

Subtítulo del proyecto: Estimación de costes - Dimensionado de una instalación de ósmosis inversa alimentada por energías renovables

Comentarios: Se adjunta el informe de estimación de costes según el software de dimensionamiento LewaPlus.

Cabe recordar que la información que contiene este informe es incompleta (no incluye la totalidad de las bombas necesarias para el sistema, entre otros equipos) y estimada por el propio software; pero se ha decidido incluir a modo de referencia general sobre la envergadura económica del proyecto.

Cliente

Nombre: ULL

Teléfono:

Ubicación:

Fax:

Contacto:

Correo electrónico:

Diseñador

Nombre: Alexander Hernandez García

Teléfono:

Ubicación:

Fax:

Contacto:

Correo electrónico: alu0100901283@ull.edu.es

Análisis del agua de alimentación

Fecha de la toma de muestras: 2020-02-03

Origen del agua:	Agua de mar, pozo de playa (Gáldar, Gran Canaria)		
Tipo de agua:	Agua de mar, pozo de playa	País: España	
Caudal de aporte:	277,78 [m³/h]		

Cationes	Original	Unidad	[mg/l]	[meq/l]	Aniones	Original	Unidad	[mg/l]	[meq/l]
Na	11870,00000	[mg/l]	11870,00000	516,31144	Cl	21280,00000	[mg/l]	21280,00000	600,28209
Ca	431,00000	[mg/l]	431,00000	21,50699	SO ₄	3148,00000	[mg/l]	3148,00000	65,54237
Mg	1470,00000	[mg/l]	1470,00000	120,88816	CO ₃	3,69535	[mg/l]	3,69535	0,12318
K	451,00000	[mg/l]	451,00000	11,53453	HCO ₃	141,50000	[mg/l]	141,50000	2,31891
Sr	10,00000	[mg/l]	10,00000	0,22826	NO ₃	0,70000	[mg/l]	0,70000	0,01129
Ba	0,01700	[mg/l]	0,01700	0,00025	F	0,86200	[mg/l]	0,86200	0,04537
NH ₄	0,00000	[mg/l]	0,00000	0,00000	SiO ₂	1,10000	[mg/l]	1,10000	0,01831
Fe(II)	0,02500	[mg/l]	0,02500	0,00090	B	5,23000	[mg/l]	5,23000	0,48381
Mn	0,00300	[mg/l]	0,00300	0,00011	PO ₄	0,00000	[mg/l]	0,00000	0,00000
Al	0,00000	[mg/l]	0,00000	0,00000	Br	0,50000	[mg/l]	0,50000	0,00626
					As(III)	0,00000	[mg/l]	0,00000	0,00000
					As(V)	0,00000	[mg/l]	0,00000	0,00000
H+			0,00001	0,00001	OH-			0,07630	0,00449
Suma C				670,47062	Suma A				668,32946
+ Na			0,00000	0,00000	+ Cl			75,74558	2,13669

Otros

Temperatura	21,00 [°C]	Turbidez	0,00 [NTU]	Fe (total)	0,00 [ppm]
pH	8,00	SDI	0,00	Cloro libre	0,00 [ppm]
CO ₂	1,54 [mg/l]	TSS	0,00 [ppm]	H ₂ S	0,00 [ppm]
		TOC	0,00 [ppm]		

Resumen

TDS	38889,38 [ppm]
Conductividad	56035,22 [µS/cm]
Presión osmótica	27,03 [bar]
Fuerza iónica	0,774

Comentarios

Notas y mensajes de advertencia

- Diseño: Valores saturación excedidos. Ajuste el pH del agua de aporte o utilice un antiincrustante.

Parámetros del sistema

Tipo de agua	Agua de mar, pozo de playa
Temperatura	21,00 [°C]
Recuperación	45,00 [%]
Recuperación hidráulica	45,00 [%]
Presión bomba descarga	66,54 [bar]
Caudal del agua de aporte	277,78 [m³/h]
Caudal de aporte, etapa 1	277,78 [m³/h]
Caudal del permeado	125,00 [m³/h]
Caudal del permeado en el sistema	125,00 [m³/h]

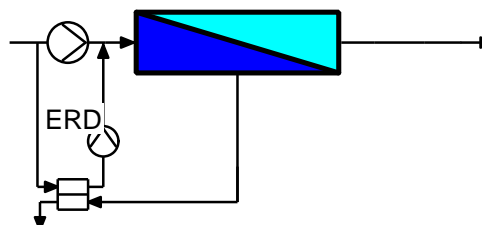
Configuración del sistema

Paso	1 / 1
Número de etapas / elementos de membrana	1 / 196
Permeado, mezcla	No
Permeado, recirculación	No
Rechazo, recirculación	No
Dispositivo recuperación energía	Isobárico
Dimensionado de la unidad por defecto	50,90 [m³/h]
Fuga / Cudal en exceso	1,00 / 0,00 [%]

Ajuste del pH

pH	6,50
Producto químico	H2SO4
Dosificación (100%)	39,68 [mg/l]

Diseño del paso 1



Parámetros de la membrana

Edad de membrana promedia	3,00 [a]
Edad de la membrana promedia	3,00 [a]
Tasa disminución, caudal	6,00 [%]
Aumento de paso de sal	11,00 [%/a]
Flujo medio del permeado	17,14 [l/m²/h]
Salinidad del permeado	176,91 [mg/l]
Conductividad del permeado	324,92 [µS/cm]

Etapas

		1
Tipo de elemento		RO S400 HR
Tubos / Elementos por tubo		28 / 7
Presión de la agua de aprte	[bar]	66,54
Presión del concentrado	[bar]	65,25
Presión del permeado	[bar]	0.00
Permeado, flujo	[l/m²/h]	17,14
Caudal del agua de aporte por tubo	[m³/h]	9,92
Caudal del concentrado por tubo	[m³/h]	5,46

Sistema diseñado			Parámetros de los costes de operación		
Capacidad del sistema	3000,0 [m³/d]		Tiempo de vida de la membrana	3,0 [a]	
Recuperación del sistema	45,0 [%]		Limpiezas de membrana por año	2	
Número de líneas	1		Costo de limpieza por tubo	40 [EUR]	
Parámetros de costo por línea			Número operadores en planta	2	
Número de tubos de presión	28		Salario promedio anual	30.000 [EUR]	
Coste por tubo presión	1300 [EUR]		Consumo energía, bombas HP	2,55 [kWh/m³]	
Número elementos de membrana	196		Consumo energía, equipo aux.	0,51 [kWh/m³]	
Coste por elemento de membrana	500 [EUR]		Tasa de energía	0,080 [EUR/kWh]	
			Factor de carga de la planta	90,0 [%]	
Costo de los componentes del sistema			Costo de operación		
	[EUR]	[%]		[EUR/m³]	[%]
Filtros de cartucho	103.322	4,8	Energía	0,245	29,9
Líneas de OI	557.406	25,7	Sustitución de cartuchos	0,012	1,5
Membranas OI	98.000	4,5	Sustitución de la membrana	0,033	4,0
Bombas de alta presión y ERD	582.559	26,8	Prod. químicos (pre-tratamiento)	0,021	2,6
Tuberías de interconexión	197.850	9,1	Prod. químicos (post-tratamiento)	0,006	0,7
Post-tratamiento	76.942	3,5	Limpiezas de la membrana	0,002	0,3
Unidad limpieza de la membrana	136.297	6,3	Mantenimiento y piezas	0,055	6,7
Sistema eléctrico	98.925	4,6	Laboratorio	0,061	7,4
Instrumentación y controles	98.925	4,6	Suministro de agua/eliminación	0,344	42,1
Contingencia	219.834	10,1	Contingencia	0,039	4,8
Total	2.170.060		Total	0,819	

Valor de gastos actual neto	
Vida proyect. de la planta	5,0 [a]
Tipo de interés	4,0 [%]
Costo anual de operacón	807.201 [EUR/a]
Aumento de los costes de operacón	0,0 [%/a]
Valor actual neto	3.593.514 [EUR]

Costo de agua producida		[EUR/m ³]
Costo de capital		0,495
Costo de operacón		0,819
Costo total del agua		1,314

Coste del sistema de referencia	
Aplicación	Agua de mar
Capacidad	5000,0 [m ³ /d]
Coste	665,000 [EUR/m ³ /d]

Coste del pre-tratamiento

Producto químico	[mg/l]	[EUR/t]	[EUR/m ³]
H ₂ SO ₄ in paso 1	39,7	150	0,013
Antiincrustante	2,0	1.800	0,008
Biocida	0,0	1.700	0,000
Total			0,021

Coste del post-tratamiento

Producto químico	[mg/l]	[EUR/t]	[EUR/m ³]
NaOH	5,1	500	0,003
CaCO ₃	50,0	70	0,004
Total			0,006

Exención de responsabilidades

Este programa de software LewaPlus se utiliza para el dimensionamiento y el cálculo de sistemas de resinas de intercambio iónico y de sistemas de membranas de ósmosis inversa (en adelante OI) aplicados en el tratamiento de agua.

Dentro de este programa, Lanxess pone a disposición al diseñador del sistema ciertos conocimientos con respecto al diseño y a la operación de productos Lanxess específicamente diseñados para intercambio de iones (en configuraciones únicas: como lecho fluidificado, Lift bed, Multistep y Rinse Bed), así como otras tecnologías de intercambio de iones existentes. Además, Lanxess pone a disposición al diseñador de instalaciones ciertas informaciones sobre el diseño y la operación de sistemas de membranas de ósmosis inversa, incluyendo cálculos de incrustaciones, químicos y proyecciones de costes de energía y de capital, y proyecciones de costes operativos basadas en el pretratamiento del agua de alimentación, y las decisiones de diseño hecho por el diseñador.

Este conocimiento se da de buena fé pero sin garantía ninguna. Nuestro consejo no le exime de su obligación de comprobar la información recibida recientemente - especialmente élla encontrándose en nuestras hojas de datos de seguridad y en las hojas de información técnica - y probar nuestros productos en cuanto a su idoneidad para los procedimientos y fines previstos. La aplicación, la utilización y la transformación de nuestros productos y de los productos fabricados por ustedes sobre la base de nuestro asesoramiento técnico están fuera de nuestro control y, por lo tanto, exclusivamente bajo su propia responsabilidad.

Nuestros productos se venden en conformidad con la versión actual de nuestras Condiciones Generales de Venta y Suministro.