

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA,
TITULACIONES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES

AUTOR: Alberto Meneses Moreno

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA,
TITULACIONES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

ÍNDICE GENERAL

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

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

AUTOR: Alberto Meneses Moreno

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE MEMORIA

1. OBJETIVO	1
1.1. ABSTRACT	2
2. ALCANCE DEL PROYECTO.....	3
3. ANTECEDENTES.....	6
3.1. RECURSOS HÍDRICOS MUNDIALES.....	6
3.2. RECURSOS HÍDRICOS NACIONALES E INSULARES.....	8
3.2.1. Recursos hídricos insulares.....	9
3.2.2. Recursos hídricos en la isla de La Gomera.....	10
3.3. HISTORIA DE LA DESALACIÓN.....	14
3.3.1. La desalación en las Islas Canarias.....	15
3.3.2. La desalación en la isla de La Gomera.....	19
4. GENERALIDADES	19
4.1. LA DESALACIÓN DE AGUA.....	19
4.1.1. Procesos de desalación por evaporación.....	20
4.1.2. Procesos de desalación por membranas	22
4.2. PROCESO DE DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA	23
4.2.1. Las membranas de ósmosis inversa.....	24
4.3. INSTALACIÓN DESALADORA DE AGUA POR ÓSMOSIS INVERSA	26
4.3.1. Captación del agua de mar	26
4.3.2. Pretratamiento fisicoquímico	29
4.3.3. Núcleo de ósmosis inversa.....	32
4.3.3.1. Bombas de alta presión	32
4.3.3.2. Recuperadores de energía.....	33
1.1.1.1. Bastidores de membranas.....	35
4.3.4. Postratamiento de acondicionamiento	36
4.3.5. Distribución y drenaje de salmuera	37
4.4. LA ENERGÍA EÓLICA.....	38
4.4.1. Antecedentes	39
4.4.1.1. La energía eólica en Canarias.....	39
4.4.1.2. La energía eólica en la isla de La Gomera	40
4.4.2. Fundamentos	40
4.4.2.1. El recurso eólico.....	40
DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES	I

4.4.2.2. Aerogeneradores	41
4.4.3. <i>La energía renovable en procesos de desalación</i>	42
5. NORMAS Y REFERENCIAS	44
5.1. NORMAS	44
5.2. BIBLIOGRAFÍA	44
5.3. OTRAS REFERENCIAS	45
5.4. PROGRAMAS INFORMÁTICOS Y HERRAMIENTAS DE CÁLCULO.....	46
6. ABREVIATURAS Y DEFINICIONES	47
6.1. ABREVIATURAS.....	47
6.2. DEFINICIONES	47
7. REQUISITOS DE DISEÑO	48
7.1. REQUISITOS DEL CLIENTE	48
7.2. SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO	49
7.3. CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN.....	53
7.4. PROPIEDADES DEL AGUA	53
7.4.1. <i>Temperatura de alimentación</i>	54
7.5. PROPIEDADES DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN	55
7.6. PROPIEDADES DEL AGUA PRODUCTO	56
8. ANÁLISIS DE SOLUCIONES.....	57
8.1. CAPTACIÓN DEL AGUA DE MAR	58
8.1.1. <i>Tipo de toma</i>	58
8.1.2. <i>Tubería de captación</i>	60
8.1.3. <i>Selección de la bomba sumergible</i>	60
8.2. PRETRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO	61
8.3. NÚCLEO DE DESALACIÓN.....	62
8.3.1. <i>Bastidor de membranas</i>	62
8.3.2. <i>Dispositivo de recuperación de energía</i>	63
8.3.3. <i>Selección de la bomba de alta presión</i>	65
8.3.4. <i>Selección de la bomba Booster</i>	65
8.4. POSTRATAMIENTO DE ACONDICIONAMIENTO.....	66
8.4.1. <i>Selección de la bomba de postratamiento</i>	66
8.5. DISTRIBUCIÓN Y RECHAZO DE SALMUERA.....	67
8.5.1. <i>Distribución de agua producto</i>	67

8.5.1.1.	Distribución inferior.....	67
8.5.1.2.	Distribución superior.....	69
8.5.2.	<i>Rechazo de salmuera</i>	71
8.6.	CONSUMO TOTAL Y CONSUMO ESPECÍFICO.....	72
8.7.	SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.....	73
8.7.1.	<i>Ubicación del parque eólico</i>	73
8.7.2.	<i>Estudio del recurso eólico</i>	73
8.7.3.	<i>Selección del aerogenerador</i>	74
8.8.	ANÁLISIS DE COSTE ECONÓMICO E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.....	76
8.8.1.	<i>Viabilidad económica</i>	76
8.8.2.	<i>Aspectos medioambientales</i>	77
9.	RESULTADOS FINALES.....	78
9.1.	UBICACIÓN Y CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN.....	79
9.2.	SISTEMA DE CAPTACIÓN.....	79
9.3.	PRETRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO.....	79
9.4.	NÚCLEO DE DESALACIÓN.....	80
9.4.1.	<i>Bastidor de membranas</i>	80
9.4.2.	<i>Dispositivo de recuperación de energía</i>	80
9.4.3.	<i>Bomba de alta presión</i>	80
9.4.4.	<i>Bomba Booster</i>	80
9.5.	POSTRATAMIENTO DE ACONDICIONAMIENTO.....	80
9.6.	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	81
9.6.1.	<i>Distribución inferior</i>	81
9.6.2.	<i>Distribución superior</i>	81
9.7.	SISTEMA DE RECHAZO.....	82
9.8.	SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.....	82
9.9.	ANÁLISIS DE COSTE ECONÓMICO E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.....	83
9.9.1.	<i>Aspectos económicos</i>	83
9.9.2.	<i>Aspectos medioambientales</i>	83
10.	CONCLUSIONES.....	84

ÍNDICE ANEXO I

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MÉTODO DE CÁLCULO	1
2.1. MÉTODO BLANEY-CRIDDLE	1
2.2. MÉTODO ICIA.....	6
3. ANÁLISIS DEL TERRENO	8
4. CONSUMO DIARIO	10
4.1. CONSUMO MÉTODO BLANEY-CRIDDLE	10
4.2. CONSUMO MÉTODO ICIA.....	11
4.3. COMPARACIÓN.....	12
5. PRODUCCIÓN DIARIA	13
6. CONCLUSIONES	16

ÍNDICE ANEXO II

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. SOFTWARE INFORMÁTICO.....	1
2.1. DATOS DE PARTIDA.....	2
2.2. ANÁLISIS	2
2.2.1. <i>Temperatura del agua de alimentación.....</i>	<i>3</i>
2.2.2. <i>Propiedades del agua de alimentación.....</i>	<i>6</i>
2.2.3. <i>Propiedades del agua producto.....</i>	<i>7</i>
2.3. DISEÑO.....	9
2.3.1. <i>Sistema.....</i>	<i>9</i>
2.3.2. <i>Trenes</i>	<i>10</i>
2.3.3. <i>Especificación del sistema.....</i>	<i>12</i>
2.4. DISPOSITIVO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA (ERD)	23
2.5. REANÁLISIS MEDIANTE IMSDESING.....	29
3. ELECCIÓN DE LA MEMBRANA	30
4. CONCLUSIONES	31

ÍNDICE ANEXO III

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. SISTEMA DE CAPTACIÓN	2
2.1. TOMAS DE CAPTACIÓN.....	2
2.2. POZOS DE CAPTACIÓN.....	3
2.3. UBICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN.....	3
2.4. PROFUNDIDAD DE CAPTACIÓN.....	6
2.5. TUBERÍAS DE CAPTACIÓN	8
3. PRETRATAMIENTO.....	11
4. BOMBAS SUMERGIBLES DE CAPTACIÓN.....	13
4.1. BALANCE DE ENERGÍA	13
4.2. PÉRDIDAS DE CARGA.....	15
4.3. SELECCIÓN DE BOMBA	22
5. BOMBAS DE ÓSMOSIS INVERSA	27
5.1. BOMBAS DE ALTA PRESIÓN	27
5.1.1. <i>Balance de energía</i>	27
5.1.2. <i>Selección de bomba</i>	30
5.2. BOMBA AUXILIAR TIPO BOOSTER.....	32
5.2.1. <i>Balance de energía</i>	32
5.2.2. <i>Selección de bomba</i>	34
6. POSTRATAMIENTO.....	38
6.1. BOMBA POSTRATAMIENTO.....	39
6.2. BALANCE DE ENERGÍA	39
6.3. SELECCIÓN DE BOMBA	40
7. ALMACENAMIENTO HÍDRICO	44
7.1. ALMACENAMIENTO INFERIOR.....	45
7.2. ALMACENAMIENTO SUPERIOR	46
8. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA	49
8.1. DISTRIBUCIÓN INFERIOR.....	49
8.1.1. <i>Diseño distribución inferior</i>	49
8.1.2. <i>Tubería de distribución inferior</i>	51
 DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES	 VI

8.1.3.	<i>Balance de energía</i>	52
8.1.4.	<i>Pérdidas de carga</i>	53
8.1.5.	<i>Selección de bomba</i>	53
8.2.	DISTRIBUCIÓN SUPERIOR	60
8.2.1.	<i>Diseño distribución superior</i>	60
8.2.2.	<i>Tubería de distribución superior</i>	63
8.2.3.	<i>Balance de energía Tramo 1</i>	63
8.2.4.	<i>Selección de bomba Tramo 1</i>	64
8.2.5.	<i>Balance de energía Tramo 2</i>	65
8.2.6.	<i>Selección de bomba Tramo 2</i>	66
9.	SISTEMA DE RECHAZO DE SALMUERA	67
9.1.	TUBERÍA DE RECHAZO.	68
9.2.	BALANCE DE ENERGÍA	69
9.3.	PÉRDIDAS DE CARGA.....	69
10.	CONSUMO TOTAL Y ESPECÍFICO	71
10.1.	CONSUMO SISTEMA DE CAPTACIÓN	71
10.2.	CONSUMO NÚCLEO DE MEMBRANAS.....	72
10.3.	CONSUMO DISTRIBUCIÓN.....	73
11.	CONCLUSIONES	75

ÍNDICE ANEXO IV

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ESTUDIO DEL RECURSO EÓLICO DE LA ZONA.....	1
3. DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL.....	3
4. SELECCIÓN DEL AEROGENERADOR.....	5
5. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS.....	13
6. CONCLUSIONES	16

ÍNDICE ANEXO V

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	ANÁLISIS DE VIABILIDAD TÉCNICA	1
3.	ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA	2
3.1.	COSTES DEL AEROGENERADOR.....	2
3.1.1.	<i>Costes de inversión.....</i>	2
3.1.2.	<i>Costes variables.....</i>	3
3.2.	COSTES PLANTA DE DESALACIÓN.	3
3.2.1.	<i>Costes de inversión.....</i>	3
3.2.2.	<i>Costes variables.....</i>	5
4.	ANÁLISIS DE RENTABILIDAD.....	6
4.1.	RENTABILIDAD DEL AEROGENERADOR.....	7
4.2.	RENTABILIDAD DE LA PLANTA DE DESALACIÓN	9
5.	ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES.....	11
5.1.	ENERGÍA EÓLICA.....	11
5.2.	PLANTA DE DESALACIÓN	13
6.	CONCLUSIONES	14

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA,
TITULACIONES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

MEMORIA

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

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

AUTOR: Alberto Meneses Moreno

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

Hoja de identificación

TITULO DEL PROYECTO

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

DATOS DEL PETICIONARIO

NOMBRE: Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología. Universidad de La Laguna.

DIRECCIÓN: Camino San Francisco de Paula, S/N. Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología. Apartado 456. Código postal 38200. San Cristóbal de La Laguna. S/C de Tenerife

CONTACTO: **TELÉFONO:** (+34) 922 31 83 09

EMAIL: esit@ull.es

DATOS DEL AUTOR

NOMBRE: Alberto Meneses Moreno

DNI: 43834422 X

CONTACTO: alu0100993974@ull.edu.es

DATOS DEL TUTOR

NOMBRE: Vicente José Romero Ternero

CONTACTO: yromero@ull.edu.es

FECHA

Septiembre de 2019

ÍNDICE MEMORIA

1. OBJETIVO	1
1.1. ABSTRACT	2
2. ALCANCE DEL PROYECTO.....	3
3. ANTECEDENTES.....	6
3.1. RECURSOS HÍDRICOS MUNDIALES.....	6
3.2. RECURSOS HÍDRICOS NACIONALES E INSULARES.....	8
3.2.1. Recursos hídricos insulares.....	9
3.2.2. Recursos hídricos en la isla de La Gomera.....	10
3.3. HISTORIA DE LA DESALACIÓN.....	14
3.3.1. La desalación en las Islas Canarias.....	15
3.3.2. La desalación en la isla de La Gomera.....	19
4. GENERALIDADES	19
4.1. LA DESALACIÓN DE AGUA.....	19
4.1.1. Procesos de desalación por evaporación.....	20
4.1.2. Procesos de desalación por membranas	22
4.2. PROCESO DE DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA	23
4.2.1. Las membranas de ósmosis inversa.....	24
4.3. INSTALACIÓN DESALADORA DE AGUA POR ÓSMOSIS INVERSA	26
4.3.1. Captación del agua de mar	26
4.3.2. Pretratamiento fisicoquímico	29
4.3.3. Núcleo de ósmosis inversa.....	32
4.3.3.1. Bombas de alta presión	32
4.3.3.2. Recuperadores de energía.....	33
1.1.1.1. Bastidores de membranas.....	35
4.3.4. Postratamiento de acondicionamiento	36
4.3.5. Distribución y drenaje de salmuera	37
4.4. LA ENERGÍA EÓLICA.....	38
4.4.1. Antecedentes	39
4.4.1.1. La energía eólica en Canarias.....	39
4.4.1.2. La energía eólica en la isla de La Gomera	40
4.4.2. Fundamentos	40
4.4.2.1. El recurso eólico.....	40
DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA ALIMENTADA MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES	I

4.4.2.2. Aerogeneradores	41
4.4.3. <i>La energía renovable en procesos de desalación</i>	42
5. NORMAS Y REFERENCIAS	44
5.1. NORMAS	44
5.2. BIBLIOGRAFÍA	44
5.3. OTRAS REFERENCIAS	45
5.4. PROGRAMAS INFORMÁTICOS Y HERRAMIENTAS DE CÁLCULO.....	46
6. ABREVIATURAS Y DEFINICIONES	47
6.1. ABREVIATURAS.....	47
6.2. DEFINICIONES	47
7. REQUISITOS DE DISEÑO	48
7.1. REQUISITOS DEL CLIENTE	48
7.2. SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO	49
7.3. CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN.....	53
7.4. PROPIEDADES DEL AGUA	53
7.4.1. <i>Temperatura de alimentación</i>	54
7.5. PROPIEDADES DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN	55
7.6. PROPIEDADES DEL AGUA PRODUCTO	56
8. ANÁLISIS DE SOLUCIONES.....	57
8.1. CAPTACIÓN DEL AGUA DE MAR	58
8.1.1. <i>Tipo de toma</i>	58
8.1.2. <i>Tubería de captación</i>	60
8.1.3. <i>Selección de la bomba sumergible</i>	60
8.2. PRETRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO	61
8.3. NÚCLEO DE DESALACIÓN.....	62
8.3.1. <i>Bastidor de membranas</i>	62
8.3.2. <i>Dispositivo de recuperación de energía</i>	63
8.3.3. <i>Selección de la bomba de alta presión</i>	65
8.3.4. <i>Selección de la bomba Booster</i>	65
8.4. POSTRATAMIENTO DE ACONDICIONAMIENTO.....	66
8.4.1. <i>Selección de la bomba de postratamiento</i>	66
8.5. DISTRIBUCIÓN Y RECHAZO DE SALMUERA.....	67
8.5.1. <i>Distribución de agua producto</i>	67

8.5.1.1.	Distribución inferior.....	67
8.5.1.2.	Distribución superior.....	69
8.5.2.	<i>Rechazo de salmuera</i>	71
8.6.	CONSUMO TOTAL Y CONSUMO ESPECÍFICO.....	72
8.7.	SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.....	73
8.7.1.	<i>Ubicación del parque eólico</i>	73
8.7.2.	<i>Estudio del recurso eólico</i>	73
8.7.3.	<i>Selección del aerogenerador</i>	74
8.8.	ANÁLISIS DE COSTE ECONÓMICO E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.....	76
8.8.1.	<i>Viabilidad económica</i>	76
8.8.2.	<i>Aspectos medioambientales</i>	77
9.	RESULTADOS FINALES.....	78
9.1.	UBICACIÓN Y CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN.....	79
9.2.	SISTEMA DE CAPTACIÓN.....	79
9.3.	PRETRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO.....	79
9.4.	NÚCLEO DE DESALACIÓN.....	80
9.4.1.	<i>Bastidor de membranas</i>	80
9.4.2.	<i>Dispositivo de recuperación de energía</i>	80
9.4.3.	<i>Bomba de alta presión</i>	80
9.4.4.	<i>Bomba Booster</i>	80
9.5.	POSTRATAMIENTO DE ACONDICIONAMIENTO.....	80
9.6.	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	81
9.6.1.	<i>Distribución inferior</i>	81
9.6.2.	<i>Distribución superior</i>	81
9.7.	SISTEMA DE RECHAZO.....	82
9.8.	SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.....	82
9.9.	ANÁLISIS DE COSTE ECONÓMICO E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.....	83
9.9.1.	<i>Aspectos económicos</i>	83
9.9.2.	<i>Aspectos medioambientales</i>	83
10.	CONCLUSIONES.....	84

ÍNDICE FIGURAS MEMORIA

Figura 1. Distribución del recurso hídrico mundial. Fuente: Wikipedia.....	6
Figura 2. Disponibilidad de agua dulce. Fuente: Iagua.....	7
Figura 3. Escorrentía total media anual. Fuente: Instituto Geográfico Nacional.....	8
Figura 4. Evolución histórica de la oferta de agua en Canarias. Fuente: ITC.....	9
Figura 5. Lluvia horizontal. Fuente: GomeraToday.....	10
Figura 6. Captaciones de los recursos hídricos de la isla de La Gomera. Fuente: Consejo Insular de Aguas de La Gomera.....	11
Figura 7. Volumen extraído de los pozos para cada uso y año. Fuente: Consejo Insular de Aguas de La Gomera.....	12
Figura 8. Volumen extraído de los sondeos para cada uso y año. Fuente: Consejo Insular de Aguas de La Gomera.....	12
Figura 9. Volumen extraído de las galerías para cada uso y año. Fuente: Consejo Insular de Aguas de La Gomera.....	12
Figura 10. Volumen extraído de los nacientes para cada uso y año. Fuente: Consejo Insular de Aguas de La Gomera.....	12
Figura 11. Indicios de sequía en tanque privado. Fuente: Elaboración propia.....	13
Figura 12. Indicios de sequía en presa de Antoncojo. Fuente: Elaboración propia.....	13
Figura 13. Superficie agrícola no cultivada. Fuente: Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca.....	14
Figura 14. Porcentajes de capacidad desalinizadora. Fuente: DW Made for Minds....	15
Figura 15. Desaladora de Lanzarote (1964). Fuente: Canarias7.....	16
Figura 16. Número de plantas de desalación en 2012. Fuente: The History of Desalination in the Canary Islands.....	17
Figura 17. Esquema de planta desaladora MSF con energía solar. Fuente: Renewable and Sustainable Energy Reviews.....	20

Figura 18. Esquema de un proceso de destilación multiefecto (MEF). Fuente: Journal of Scientific Research.....	21
Figura 19. Esquema de un proceso compresión de vapor (CV). Fuente: Journal of Scientific Research.....	21
Figura 20. Esquema de un proceso de electrodiálisis (ED). Fuente: Journal of Scientific Research	22
Figura 21. Proceso de ósmosis natural y ósmosis inversa. Fuente: Ministerio de Sanidad y Política Social.....	23
Figura 22. Membrana de arrollamiento espiral. Fuente: Ministerio de Sanidad y Política Social.....	25
Figura 23. Estructuración de una planta de desalación. Fuente: BNamericas.....	26
Figura 24. Esquema de captación cerrada mediante pozos. Fuente: WaterReuse.....	27
Figura 25. Toma abierta mediante emisario submarino. Fuente: Steve Cook Illustration	28
Figura 26. Bomba centrífuga. Fuente: Indimart	32
Figura 27. Bomba de pistones axial. Fuente: Indimart.....	32
Figura 28. Turbina Pelton. Fuente: USF Scholar Commons.....	33
Figura 29. Turbochanger. Fuente: Fedco-USA	34
Figura 30. Intercambiador de presión de tipo rotativo. Fuente: Energy Recovery Inc	35
Figura 31. Ejemplo bastidor de membranas EDAM Alicante. Fuente: Inima.es	36
Figura 32. Evolución de la potencia instalada en el mundo (En MW). Fuente: GWEC	39
Figura 33. Esquema gráfico de un aerogenerador. Fuente: Blog.structuralia.com	42
Figura 34. Emplazamiento EDAM. Fuente: Google Earth	50
Figura 35. Emplazamiento de la parcela en Playa de Santiago. Fuente: Google Earth	50
Figura 36. Mapa eólico y emplazamiento del parque eólico. Fuente: Grafcan.....	52
Figura 37. Temperaturas medias mensuales (2008-2018). Fuente: Puertos del Estado	54

Figura 38. Ubicación y distribución de los pozos. Fuente: Google Earth.....	59
Figura 39. Interfaz de trenes. Fuente: IMSDesing	63
Figura 40. Parámetros de funcionamiento ERD. Fuente: Energy Recovery Inc.....	64
Figura 41. Distribución inferior. Fuente: Google Earth	69
Figura 42. Recorrido distribución superior. Fuente: Google Eath	70
Figura 43. Emisario submarino. Fuente: Google Earth.....	71
Figura 44. Distribución de Weibull. Fuente: Elaboración propia	74

ÍNDICE TABLAS MEMORIA

Tabla 1. Producción de agua desalada en Canarias (2013). Fuente: FCCA.....	18
Tabla 2. Tomas de captación para desalación. Fuente: Ministerio de Sanidad y Política Social.....	28
Tabla 3. Composición química del agua de mar. Fuente: Laboratorios Labaqua	56
Tabla 4. Valores normales de análisis de agua de riego. Fuente: Técnicas de Riego. José Luis Fuentes Yagüe.....	56
Tabla 5. Selección de bombas de captación. Fuente: Elaboración propia.....	61
Tabla 6. Selección de bombas Booster. Fuente: Elaboración propia.	65
Tabla 7. Selección de bomba de postratamiento. Fuente: Elaboración propia.....	67
Tabla 8. Selección de bombas de distribución inferior. Fuente: Elaboración propia...	68
Tabla 9. Clasificación de tuberías de la distribución inferior. Fuente: Elaboración propia.....	68
Tabla 10. Consumo total y específico de desalación. Fuente: Elaboración propia	72
Tabla 11. Potencia estimada aerogenerador. Fuente: Elaboración propia a partir de datos ITC	76
Tabla 12. Tuberías de distribución inferior. Fuente: Elaboración propia.....	81

1. Objetivo

El objetivo de este proyecto se podría clasificar en dos vertientes significativas, la académica y la profesional.

Si se define el objetivo académico se ve conveniente citar la descripción realizada en la guía docente de la asignatura *“El objetivo del TFG es desarrollar de forma integrada las distintas competencias de la titulación y evaluar su adquisición por parte del estudiante y se desarrollará por la modalidad de organización específica”*.

Entiéndase, de forma resumida, como la superación de la asignatura Trabajo Fin de Grado. A consecuencia, se obtiene la titulación de Ingeniero Técnico Industrial en la Universidad de La Laguna después de haber adquirido los conocimientos y competencias necesarios para realizar el trabajo de forma autónoma y correcta.

Por otro lado, si se describe el aspecto profesional, el objetivo específico de este proyecto es el estudio de un sistema de desalación alimentado por energías renovables. Se dimensionará una mediana planta de desalación por ósmosis inversa (1850 m³/día). La producción de agua estará destinada al sector agrícola. Se cubrirán las necesidades hídricas de 25,6 hectáreas de cultivos en el municipio de Alajeró (Isla de La Gomera). Se distribuirá el agua hasta una cota de 1268 metros sobre el nivel del mar. De esta forma se reduce el uso de agua potable destinado a este mismo fin.

Además, se busca producir el menor impacto medioambiental posible. A raíz de esto, el abastecimiento energético de la planta de desalación se realiza mediante energías renovables. Se estudia la instalación de un aerogenerador eólico capaz de cumplir con la demanda anual de la desaladora. No obstante, se tendrá en cuenta la inestabilidad del recurso eólico. Por ello, parte del suministro eléctrico será aportado por la red local.

Finalmente, se realiza un análisis de coste económico e impacto medioambiental. El propósito es conocer la viabilidad económica del proyecto, y, por otro lado, estudiar la reducción de emisión de gases contaminantes alcanzada y el ahorro de combustible fósil gracias a la implantación del sistema de energías renovables.

1.1. Abstract

The objective of this project could be classified in two significant tracks: the academic and the professional.

When defining the academic objective, it is convenient to cite the description found in the teaching guide of the course: *“The objective of the End-of-degree project (TFG) is to develop in an cohesive matter the different competences of the diploma and to evaluate its acquisition by the student and it will be developed by the modality of an specific organization”*.

This can be understood, in a summarized form, as the passing of the End-of-degree course (TFG). As a consequence, the degree of Industrial Engineering of the University of La Laguna is obtained, after acquiring the necessary knowledge and capabilities for the completion of the work in an autonomous and correct way.

On the other hand, if the professional aspect is to be described, the specific objective of this projects is the study of a desalination system fed by renewables energies. The dimensions of a reverse osmosis medium-sized desalination plant (1850 m³/day) will be drawn. The water production will be destined to the agriculture sector. The hydraulic needs of 25,6 hectares of farmland will be covered in the locality of Alajeró (in the island of La Gomera). Water will be distributed up to a bound of 1268 meters over the sea level. In this way, a reduction of the potable water, used for the same objective, will be reduced.

Moreover, it is aimed to produce the least environmental impact as possible. Because of this, the energy supply of the desalination plant is provided using renewable energies. The installation of a wind powered generator, able to cope with the annual demand of the plant is studied. Nevertheless, the instability of a wind resource will be considered. Consequently, a part of the electricity supply will be supplied by the local network.

Finally, an analysis of the economic cost and the environmental impact will be performed. The objective, on the one hand, is to assess the economic viability of the project, and, on the other hand, to study the reached reduction of the emission of polluting gases and the saving of fossil fuels thanks to the implementation of the renewable energies program.

2. Alcance del proyecto

Este documento se centra en el estudio de una planta de desalación de agua de mar por tecnología de ósmosis inversa alimentada energéticamente por un sistema de energía renovable. Su producción, de 1850 m³/día, estará destinada a cubrir la demanda hídrica de 25,6 hectáreas de cultivo en el municipio de Alajeró (Isla de La Gomera). Se distribuirá el agua por todo el municipio alcanzando una cota máxima de 1268 metros sobre el nivel del mar.

La desaladora se situará en la zona de La Laguna, en la comarca Playa de Santiago, perteneciente al municipio de Alajeró (La Gomera). Un espacio abierto y con buena accesibilidad. Por el contrario, el sistema eólico para la producción de energía eléctrica se posicionará en la zona de Tecina. Estará próximo a la desaladora, pero pertenecerá al municipio de San Sebastián de La Gomera que colinda con la ubicación del proyecto.

De gran importancia es, también, el estudio de coste económico e impacto medioambiental. Se analizará la viabilidad económica del proyecto a lo largo de 20 años. Del mismo modo, se estimará la reducción en las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

A raíz de ello, el presente estudio se centra en el dimensionado de la planta de desalación y del sistema de energía eléctrica.

Se analizan y se seleccionan los diferentes equipos requeridos en el sistema de desalación (captación de agua de mar, núcleo de membranas, distribución de agua producto y rechazo de salmuera) para obtener y comparar el consumo de la producción con los valores estándares de este sector.

Del mismo modo, se dimensionará el sistema eólico para la producción de energía eléctrica. Se seleccionará un aerogenerador capaz de cumplir con la demanda energética de la planta de desalación. Se estudiarán, además, una serie de alternativas relacionadas con el aprovechamiento del exceso energético que brinda este último.

A continuación, se enumeran los principales puntos a estudiar en este proyecto.

- Necesidades hídricas.
 - Determinación de las necesidades hídricas de los cultivos del municipio.
 - Estimación de la extensión superficial de cultivo.
 - Cálculo de la producción diaria de la planta de desalación considerando una parada de larga duración.

- Sistema de desalación.
 - Dimensionado del núcleo de desalación.
 - Determinación de las propiedades del agua de mar de la región.
 - Diseño y selección de la membrana de ósmosis inversa.
 - Diseño y dimensionado del bastidor de membranas para ósmosis inversa.
 - Dimensionado y selección del sistema de recuperación de energía.
 - Cálculo del consumo específico de la planta.
 - Dimensionado del sistema de captación.
 - Dimensionado de los pozos de captación.
 - Dimensionado de la tubería de captación.
 - Dimensionado y selección de la bomba de captación.
 - Dimensionado del sistema de pretratamiento.
 - Dimensionado y selección de bombas para el núcleo de membranas.
 - Dimensionado del sistema de postratamiento.
- Sistema de distribución y rechazo
 - Dimensionado del depósito de almacenamiento.
 - Dimensionado de las tuberías de distribución.
 - Dimensionado y selección de las bombas de distribución.
 - Dimensionado de las tuberías de rechazo.
 - Dimensionado y selección de las bombas de rechazo.
- Sistema de producción de energía.
 - Estudio del recurso eólico de la zona.
 - Selección de la localización del aerogenerador.
 - Dimensionado de la producción energética y selección del aerogenerador.
 - Funcionalidad del sistema de abastecimiento de la planta de desalación.
 - Estudio del aprovechamiento del exceso energético.
- Análisis de coste económico e impacto ambiental.
 - Estudio del coste económico de inversión de la planta de desalación y del sistema eólico.
 - Estudio de la rentabilidad económica de la planta de desalación y del sistema eólico.

- Análisis del ahorro económico en la producción de energía eléctrica mediante combustibles fósiles.
- Estudio de las emisiones de gases contaminantes.
- Impacto ambiental de los sistemas de desalación y producción de energía.

No obstante, al considerar que forman parte de otro campo de la ingeniería, no se contemplan en este proyecto los siguientes apartados:

- Proyectos de obra civil.
- Instalaciones eléctricas, de saneamiento, de climatización, de automatización, contraincendios o de índole similar.
- Dimensionado de las tuberías interiores de la planta de desalación.
- Ubicación de los equipos en el interior de la planta de desalación.
- Elementos de control y distribución.
- Estudio de otros campos de conocimiento, tales como, el análisis químico-biológico del agua o estudios geotécnicos.
- Estudio de seguridad y salud.
- Pliego de condiciones.
- Estado de mediciones.

Por tanto, siguiendo las consideraciones reflejadas en los apartados anteriores, tanto las incluidas como las excluidas, se remarca que el estudio se basará en el análisis, cálculo y selección de los sistemas y equipos necesarios para llevar a cabo el proceso de desalación y de producción de energía.

Los resultados obtenidos (consumo específico, consumo total y coste económico) serán analizados y comparados con los valores existentes para estos tipos de aplicaciones. De este modo se podrá comprobar la autenticidad del proyecto.

Se desea recalcar que en caso de ejecutar el proyecto se deben incluir todos los apartados expuestos anteriormente. Dada la extensión del estudio se puede justificar la exclusión en este proyecto.

3. Antecedentes

3.1. Recursos hídricos mundiales

Se estima que dos terceras partes de la superficie del planeta están cubiertas por agua. En total, según cifras de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, existen unos 1400 millones de kilómetros cúbicos de agua perceptibles en océanos, mares o ríos. La inmensa mayoría (96,5%) se encuentra en forma salada, a priori, inútil para la alimentación, la agricultura y la mayor parte de los recursos industriales.

Solo un 2,5% representa el volumen de agua dulce, imprescindible para el desarrollo de la vida humana y de sus actividades. No obstante, un 68,7% de los 35 millones de kilómetros cúbicos existentes se encuentra inutilizada en las capas polares, los glaciares o los acuíferos profundos.

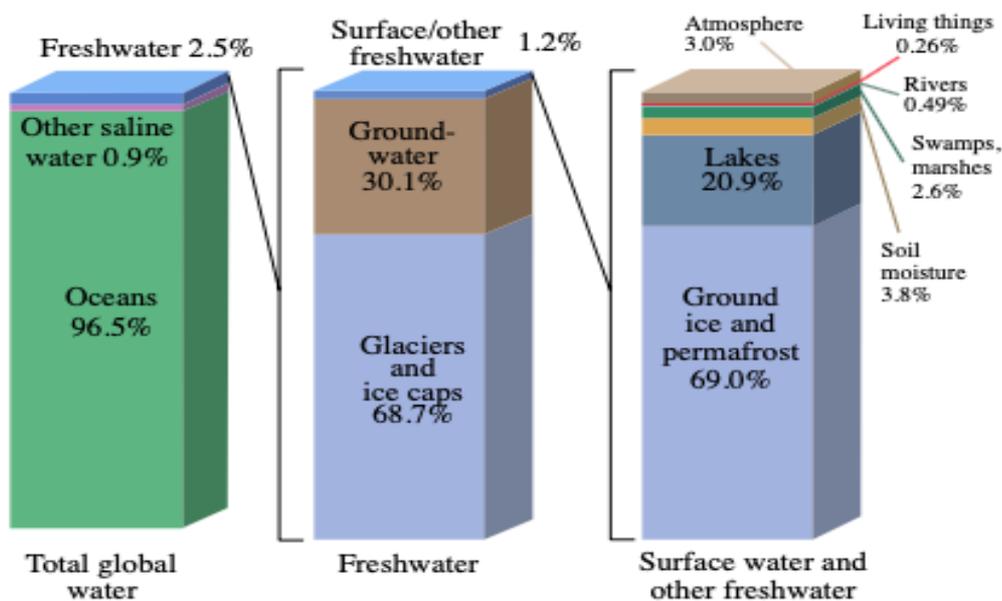


Figura 1. Distribución del recurso hídrico mundial. Fuente: Wikipedia

El agua disponible y utilizable por parte del ser humano procede esencialmente de la lluvia. En este aspecto, se produce un reparto bastante dispar en la Tierra. La diversidad climatología del planeta produce un desequilibrio en las precipitaciones, existiendo zonas con recursos hídricos elevados (Norteamérica, Sudamérica o Asia) y otras con escasez extrema (Medio Oriente o Norte de África) visibles en la Figura 2.

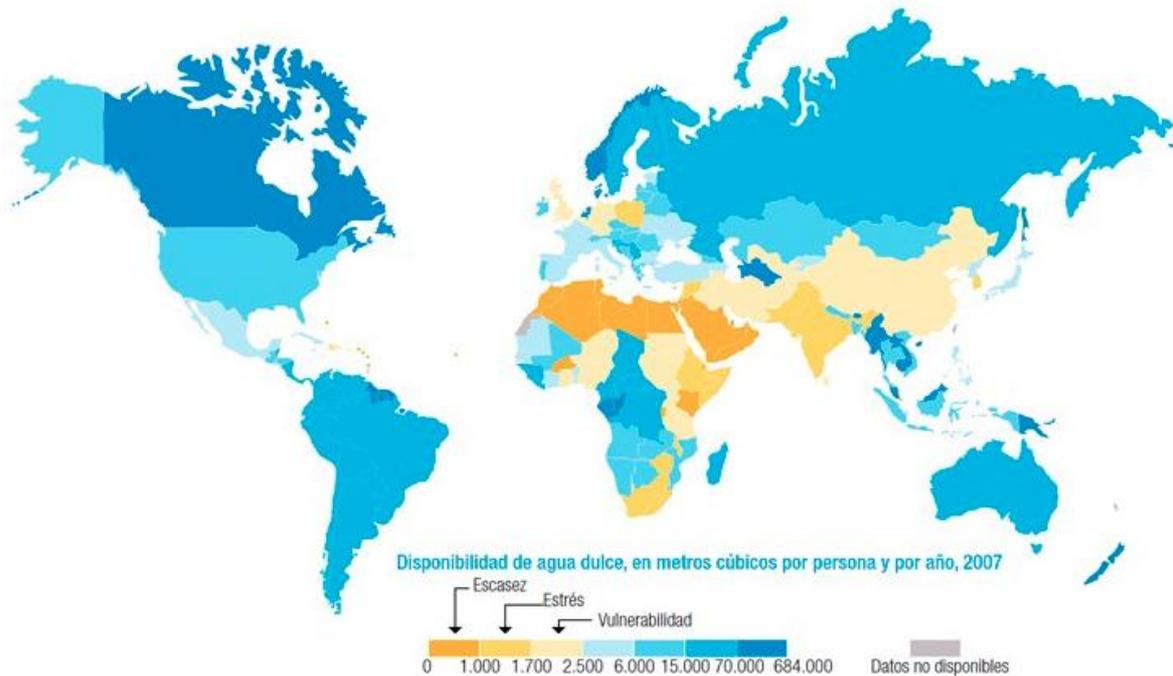


Figura 2. Disponibilidad de agua dulce. Fuente: Iagua

Además, esta pequeña proporción de agua está sufriendo un acelerado proceso de contaminación y sobreexplotación. Por ejemplo, la contaminación de los ríos se ha convertido en uno de los principales inconvenientes de aprovechamiento de este recurso hídrico. Degradan y contaminan el ecosistema y amenazan la salud y el sustento de las personas que dependen de ellos.

De igual forma, los países con escasez hídrica se ven obligados a la sobreexplotación de las fuentes de agua dulce para suplir la demanda por parte de la población. Por el contrario, los países con abundancia presentan un consumo excesivo y poco racional.

La falta de recursos se incrementará con el paso del tiempo. El aumento de la población mundial está relacionado de forma directa con el consumo hídrico mundial. Se producirá un aumento en las necesidades hídricas humanas, industriales y agrícolas.

Ante esta situación se deberán buscar diferentes soluciones que permitan la reducción del consumo hidráulico y aumenten el aporte de recursos hídricos. En estos aspectos el sector ingenieril jugará un papel fundamental. El desarrollo de diversas tecnologías que permitan el tratamiento de agua, tanto salobre como marina, debe ir en aumento, y más, al tratarse de un recurso “inagotable” (96,5% del agua mundial).

Así, en diferentes países del mundo, la implantación de sistemas de desalación ha permitido el suministro de agua para uso humano, industrial y agrícola.

3.2. Recursos hídricos nacionales e insulares

A razón de los recursos hídricos, el panorama nacional no sufre cambios respecto al mundial. Existe nuevamente una gran diversidad en la distribución hidráulica. Se diferencian tres grandes vertientes hidrográficas, la cantábrica, la atlántica y la mediterránea. Las dos primeras presentan las mejores condiciones hídricas del país. Por el contrario, la región sur y la costa del Mediterráneo muestran los mayores índices de escasez, junto con las Islas Canarias. La figura 3 refleja el flujo de agua de lluvia sobre la superficie (escorrentía) visible en el informe realizado por el Instituto Geográfico Nacional.

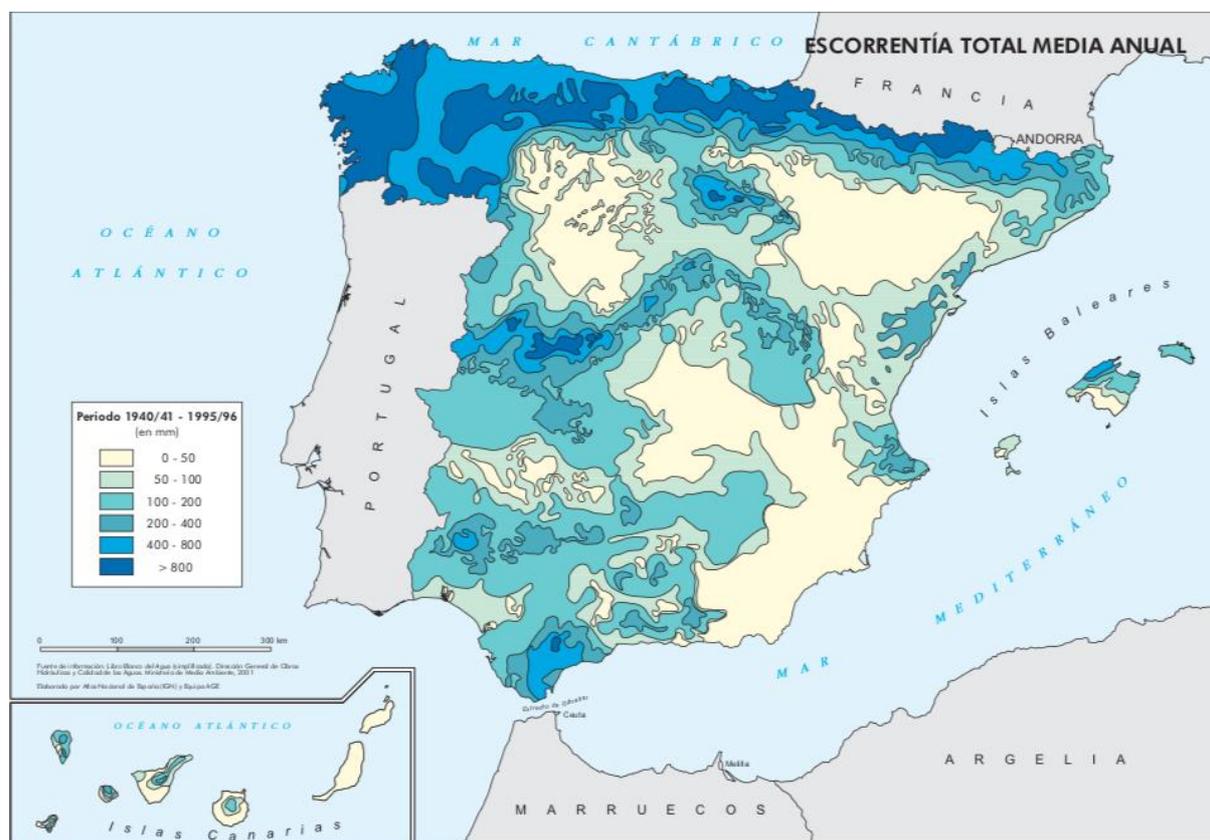


Figura 3. Escorrentía total media anual. Fuente: Instituto Geográfico Nacional

Este informe refleja que “la demanda total de agua también presenta importantes diferencias regionales. Desde el punto de vista cuantitativo destaca la demanda para riego, que representa cerca del 80% del total, seguida del abastecimiento urbano (14%) y de la demanda para la industria (6%). [...] A su vez, en los últimos años, la tecnología asociada a la desalación del agua marina ha alcanzado un gran desarrollo, y las plantas en las que se

"fabrica" agua potable se están multiplicando por todas las regiones litorales de España, que se ha convertido en uno de los países más avanzados del mundo en este campo". (Instituto Geográfico Nacional [Online]. https://www.ign.es/espmap/mapas_ma_eso/MedioESO_Mapa_04.htm).

3.2.1. Recursos hídricos insulares

El agua en el archipiélago canario ha jugado un papel fundamental a lo largo de la historia. Cada isla se ha tenido que autoabastecer de sus propios recursos hídricos.

Las condiciones climatológicas y geográficas de Canarias han reducido los recursos hídricos respecto a la península ibérica, fundamentalmente por la escasez de precipitaciones (muestra visible en las islas más orientales como Fuerteventura o Lanzarote). Unidas a las circunstancias geomorfológicas del terreno, que aminora el aprovechamiento de aguas superficiales (salvo La Gomera y Gran Canaria), el archipiélago canario ha obtenido la mayor parte del agua a través de las fuentes subterráneas. Se muestra en la Figura 4 una ilustración representativa de la evolución histórica de la oferta de agua en Canarias, incluida en el informe de Ecogestión del Agua, publicado por el Instituto Tecnológico de Canarias.

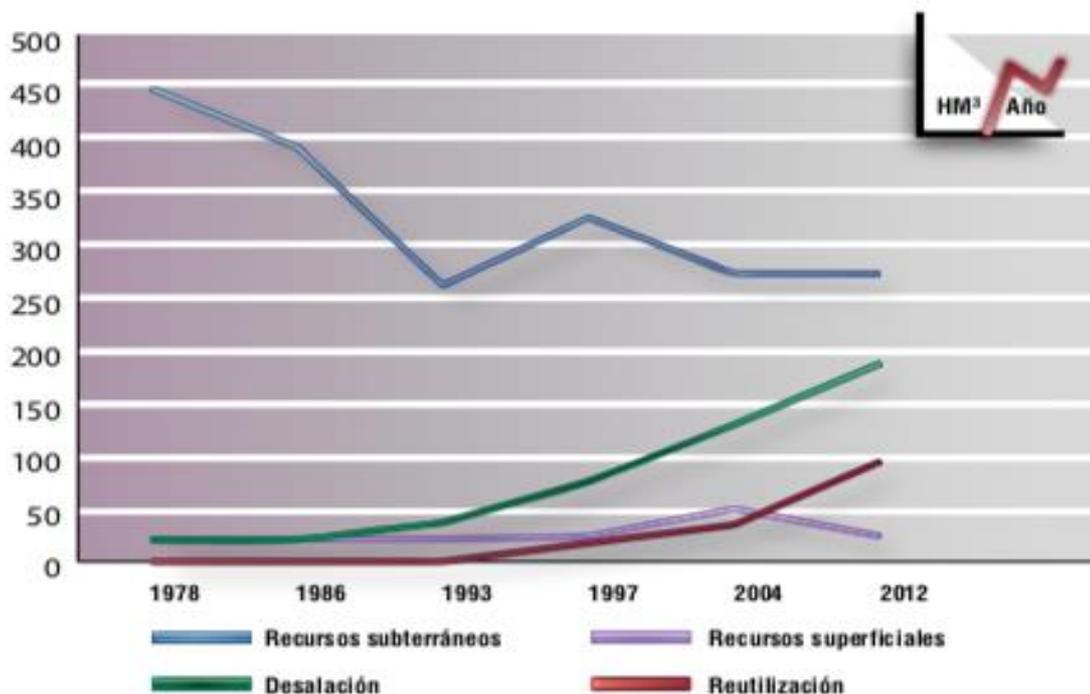


Figura 4. Evolución histórica de la oferta de agua en Canarias. Fuente: ITC

Tal ha sido la captación, que los recursos subterráneos se han visto sobrexplotados con el paso del tiempo. Este hecho es producto del aumento de la demanda por parte de los

consumidores. El cambio en la actividad económica de las islas vinculado con el auge del turismo y de las actividades ligadas a él, han producido una disminución en el nivel freático de los acuíferos, provocando una reducción, tanto de la cantidad como de la calidad de agua extraída.

Actualmente, esta tendencia se ha incrementado. El consumo de agua en sectores como el agrícola, el urbano y el turístico, ha multiplicado el uso de fuentes no convencionales (desalación) para el suministro hídrico.

Según datos facilitados en ese mismo informe, en 2004, las aguas subterráneas representaban el 87% de los recursos necesarios de las Islas Canarias. En 2012, sufre una gran disminución, superando algo más del 50%.

Hoy en día, islas como Fuerteventura o Lanzarote dependen en su totalidad de esta tecnología.

3.2.2. Recursos hídricos en la isla de La Gomera

La isla de La Gomera cuenta, a diferencia de las islas orientales, con un recurso hídrico abundante. La aportación de agua en forma de lluvia horizontal es clave para mantener esos niveles tan satisfactorios.

La lluvia horizontal es un proceso natural que posibilita la condensación de agua a través de los árboles. Este fenómeno se origina cuando las nubes chocan con las hojas de los árboles y se condensan cayendo en forma de pequeñas gotas de agua al suelo, infiltrándose posteriormente en la tierra para aumentar el caudal subterráneo.

En este caso, el Parque Nacional del Garajonay actúa como una esponja. Según los datos facilitados en un artículo de



Figura 5. Lluvia horizontal. Fuente: GomeraToday

Gomeratoday, “El Parque Nacional cuantifica en una media de 200 litros por metro cuadrado al año el volumen de este tipo de precipitación [...] Como datos globales, se concluye que de los 600 litros por metro cuadrado de precipitaciones que se registran al año en el Parque Nacional, 200 se corresponden a la lluvia horizontal”.

El artículo informe relata que “En el caso de La Gomera un cálculo muy aproximado fijaría en 10 hectómetros el producto de este tipo de precipitación de los 70 en total que se infiltran” (Gomera Today, *La Lluvia horizontal; el regalo del Garajonay*; 2016; [Online]: <https://www.gomeratoday.com/2016/05/20/la-lluvia-horizontal-el-regalo-del-garajonay/>).

Este proceso natural hace que en la isla de La Gomera únicamente existe dos fuentes hídricas. Los recursos superficiales regulados y las aguas subterráneas para uso directo, prevaleciendo esta última con un mayor porcentaje. Según datos facilitados en el Plan Hidrológico de La Gomera (2021-2027), más de las tres cuartas partes del agua que se consume en la isla de La Gomera procede de los nacientes, pozos, sondeos y galerías, es decir, son de origen subterráneo. Estas fuentes se utilizan para satisfacer las demandas de la población y de la agricultura (se carece de un sector industrial desarrollado). Se muestra la distribución que sigue este tipo de captación en cada uno de los municipios de la isla:

MUNICIPIO	MANANTIALES	POZOS	SONDEOS	GALERÍAS
Agulo	67	2	4	1
Alajeró	44	2	30	3
Hermigua	84	7	1	1
San Sebastián de La Gomera	61	48	30	4
Valle Gran Rey	21	6	14	1
Vallehermoso	139	7	6	1
TOTAL	416	72	85	11

Figura 6. Captaciones de los recursos hídricos de la isla de La Gomera. Fuente: Consejo Insular de Aguas de La Gomera

Haciendo hincapié en cada una de las extracciones se pueden obtener las siguientes figuras.

- Pozos.

USO	VOLUMEN 2015 (HM ³ /AÑO)	VOLUMEN 2016 (HM ³ /AÑO)	VOLUMEN 2017 (HM ³ /AÑO)
Agrícola	2,46	2,46	2,18
Urbano	1,00	0,97	0,75
TOTAL	3,46	3,44	2,92

Figura 7. Volumen extraído de los pozos para cada uso y año. Fuente: Consejo Insular de Aguas de La Gomera.

- Sondeos.

USO	VOLUMEN 2015 (HM ³ /AÑO)	VOLUMEN 2016 (HM ³ /AÑO)	VOLUMEN 2017 (HM ³ /AÑO)
Urbano	2,01	2,09	2,08

Figura 8. Volumen extraído de los sondeos para cada uso y año. Fuente: Consejo Insular de Aguas de La Gomera

- Galerías.

USO	VOLUMEN 2015 (HM ³ /AÑO)	VOLUMEN 2016 (HM ³ /AÑO)	VOLUMEN 2017 (HM ³ /AÑO)
Agrícola	0,31	0,31	0,30
Urbano	0,14	0,11	0,07
TOTAL	0,45	0,42	0,37

Figura 9. Volumen extraído de las galerías para cada uso y año. Fuente: Consejo Insular de Aguas de La Gomera

- Manantiales o nacientes.

USO	VOLUMEN 2015 (HM ³ /AÑO)	VOLUMEN 2016 (HM ³ /AÑO)	VOLUMEN 2017 (HM ³ /AÑO)
Agrícola	1,08	1,08	1,11
Urbano	0,27	0,27	0,18
TOTAL	1,35	1,35	1,29

Figura 10. Volumen extraído de los nacientes para cada uso y año. Fuente: Consejo Insular de Aguas de La Gomera

El uso del agua extraída en acuíferos subterráneos es, mayoritariamente, agrícola. Representa, de forma aproximada, un 70% de la demanda hídrica insular.

No obstante, existen zonas de la isla donde la escasez de precipitaciones se hace notar. La zona sur, más árida y seca, sufre la mayor parte del año sequías en sus depósitos de agua superficial, como presas o tanques.



Figura 11. Indicios de sequía en tanque privado. Fuente: Elaboración propia



Figura 12. Indicios de sequía en presa de Antoncojo. Fuente: Elaboración propia

Sumado a una mala comunicación con los recursos hídricos del resto de la isla, ha producido un drástico descenso en la actividad agrícola de municipios como Alajeró, lugar de propuesta para la implantación de una fuente no convencional de agua mediante este estudio.

Según el informe Mapa de Cultivos, realizado por la Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca disponible en la página web del Gobierno de Canarias, el municipio de Alajeró únicamente cuenta con 21,94 hectáreas dedicadas al cultivo. No obstante, este valor es

significativamente pequeño en comparación con la superficie agrícola abandonada. Se ha extraído una tabla representativa sobre este hecho. Se ilustra en la siguiente figura:

MAPA DE CULTIVOS DE LA GOMERA (Campaña 2018)					Tabla: Alajero		
Categoría	Superficie Categoría (Ha)	Agrupación	Superficie Agrupación (Ha)	Cultivo	Superficie Total (Ha)	Superficie en Invernadero (Ha) (*)	Superficie en Regadío (Ha) (**)
Sin cultivo	1.039,91	Sin Cultivo	1.039,91	Abandono reciente	10,98		0,29
				Abandono prolongado	1.025,13	0,00	0,31
				Aguacate abandono	2,80		
				A. Viña-Templados abandono			
				Almendro abandono			
				Aloe abandono			
				Aromáticas abandono			
				Cítricos abandono	0,01		0,01
				Higuera abandono	0,02		
				Huerto familiar abandono			
				Mango abandono	0,04		0,04
				Ornamentales abandono			
				Papaya abandono			
				Pitalla abandono			
				Piña abandono			
				Platanera abandono			
				Próteas abandono			
				Strelitzias abandono			
				Subtropicales varios abandono	0,02		0,02
				Templado hueso abandono	0,01		
Templado pepita abandono	0,06						
Templados varios abandono	0,19		0,17				
Tunera abandono	0,09		0,09				
Viña abandono	0,57		0,22				
Viveros abandono							
SUPERFICIE AGRÍCOLA NO CULTIVADA					1.039,91	0,00	1,14

Figura 13. Superficie agrícola no cultivada. Fuente: Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca

El abandono progresivo de superficie agrícola no se relaciona sólo con la sequía, sino también con el cambio evolutivo que ha sufrido el municipio hacia un nuevo sector económico.

3.3. Historia de la desalación

Desde tiempos inmemorables transformar el agua salada existentes en los mares en agua potable ha sido un reto para el ser humano. Sería en 1872 cuando se habla de la primera instalación desaladora propiamente dicha. Ubicada en el desierto de Atacama, la planta de destilación solar producía una pequeña cantidad de agua que abastecía a la población local. (N. Arellano; “La Planta Solar de Desalación de Agua de Las Salinas (1872). Literatura y memoria de una experiencia pionera” en Cuadernos de Historia de la Ingeniería; Volumen 12; 2011; pág. 229-251;[Online]:

https://www.academia.edu/1479691/La_planta_solar_de_desalación_de_agua_de_Las_Salinas_1872_Literatura_y_memoria_de_una_experiencia_pionera)

No obstante, no es hasta mitades del siglo XX, donde el crecimiento de la población y la expansión de la industria, producen un auge en la desalación. La técnica más utilizada fue la evaporación dado el bajo coste del petróleo.

La crisis del petróleo de la década de los 70 produce el desarrollo de una nueva tecnología, la ósmosis inversa. Se reducen los consumos asociados a la producción de agua desalada. A partir de aquí, el crecimiento exponencial de esta técnica es capaz de abastecer a la poblaciones más áridas y secas del planeta.

Según datos de la International Desalination Association (IDA), actualmente existen 20516 plantas de desalación repartidas por más de 150 países. La capacidad de producción de estas es de 122 millones de m³/día abasteciendo a más de 300 millones de personas. La Figura 12 muestra los porcentajes mundiales en relación con la producción de agua desalada.

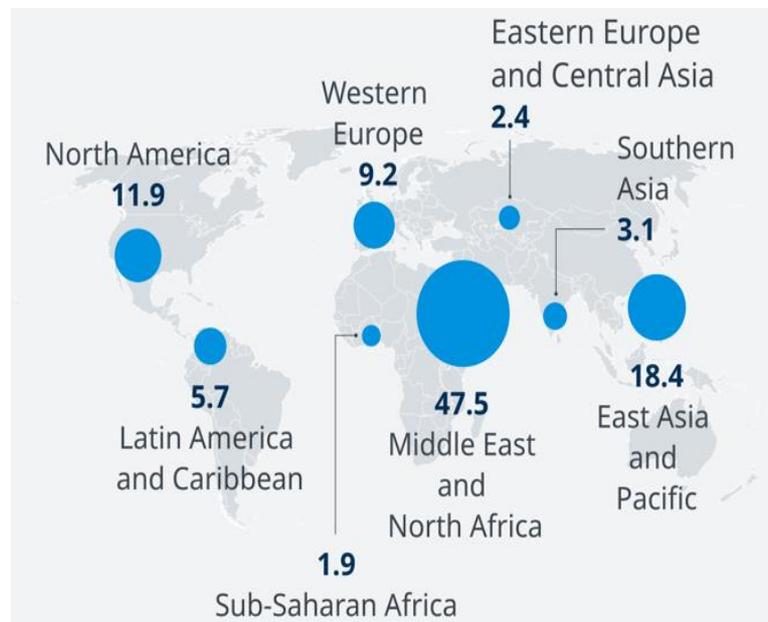


Figura 14. Porcentajes de capacidad desalinizadora.
Fuente: DW Made for Minds

3.3.1. La desalación en las Islas Canarias

Año 1964, las Islas Canarias pasan a ser pioneras en España y Europa al instalarse la primera planta desaladora de agua de mar (EDAM) en la isla de Lanzarote. Esta medida se decide después de estudiar otras alternativas, por ejemplo, el transporte de agua en barco o la producción de precipitaciones de forma artificial, que permitiesen aumentar el recurso hídrico de la isla. Se descartaron por falta de viabilidad. Todo ello impulsado por el aumento de la demanda de agua, la reducción de los bienes hídricos, consecuencia de la sobreexplotación de

los recursos subterráneos, y la escasez de precipitación, notoriamente visibles en las islas de Fuerteventura y Lanzarote.

Siguiendo con la tendencia de los años 50, la tecnología implantada en la EDAM de 1964 es la evaporación en múltiples etapas (MSF) con una capacidad de producción de 2300 m³/día.

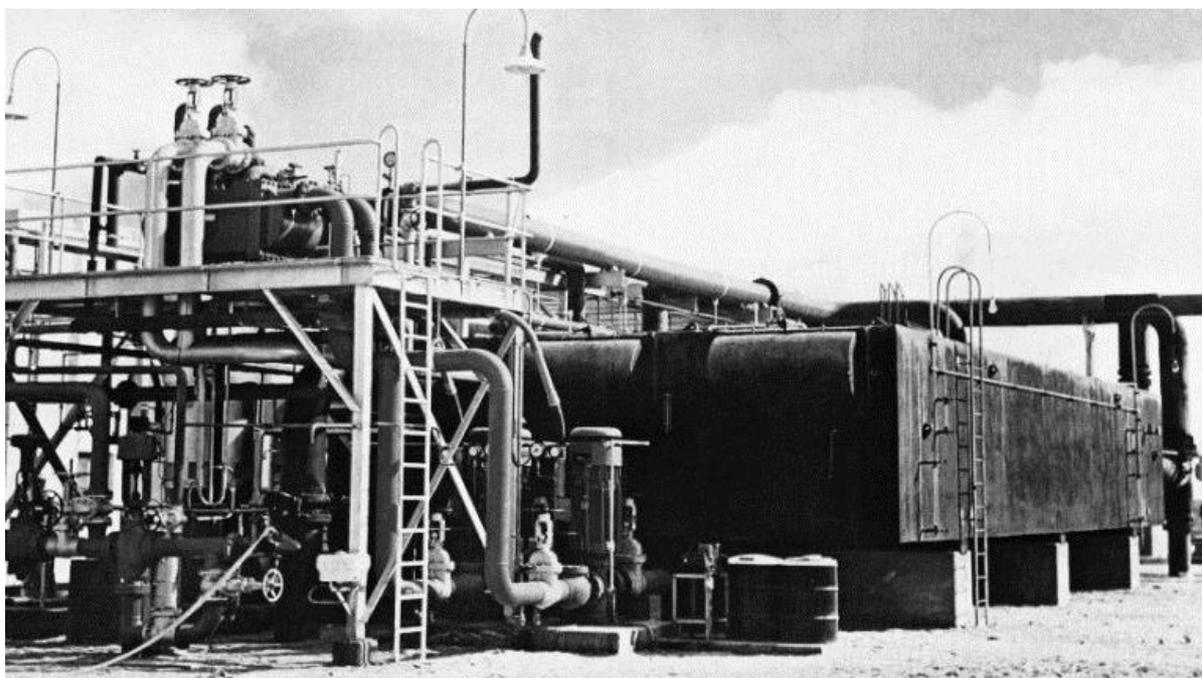


Figura 15. Desaladora de Lanzarote (1964). Fuente: Canarias7

A partir de este punto, el desarrollo económico y turístico de las Islas Canarias, mayoritariamente las orientales, ha estado ligado a la producción de agua desalada. Es tal, que Canarias ha sido considerada como un laboratorio mundial para el desarrollo de esta tecnología, incluyendo las capacidades, las calidades del agua bruta y las aplicaciones del agua producto.

Años más tarde, y utilizando la misma tecnología, se instalan las primeras plantas de desalación en Gran Canaria y Fuerteventura. A modo de peculiaridad, ambas plantas poseían un carácter dual, lo cual quiere decir que podían producir simultáneamente agua y energía eléctrica.

Siguiendo con el crecimiento del sector hotelero, industrial y urbano comienzan a instalarse módulos desaladores con una nueva tecnología, la destilación por compresión de vapor. El primero se instala en 1972 en el Hotel Maxorata, en la isla de Fuerteventura, con una capacidad de 200 m³/día y marcará el devenir de la desalación.

Si se habla de la tecnología de ósmosis inversa (OI) hay que esperar hasta los años 1982 y 1983 para ver su consolidación en la isla de Lanzarote. Se construyen dos plantas con capacidad para 500 m³/día cada una. No obstante, en los años precedentes, se habían probado dos módulos de desalación con diferentes estructuras en la membrana, fibra hueca y arrollamiento en espiral, resultando más eficiente la segunda.

A lo largo de la década de los noventa se instauran nuevas tecnologías. Primero la electrodiálisis, que venía a completar la gama comercial de procesos de membranas, con una planta con capacidad para 22000 m³/día en Morro Besudo (Gran Canaria) y segundo la destilación multiefecto (ME). En este caso se construyó en Tenerife, siendo la primera planta de capacidad media con 3600 m³/día en la isla.

Sin embargo, el continuo desarrollo de la capacidad de producción se ha relacionado con la tecnología de ósmosis inversa. Esta ha ido evolucionando en mejora de las membranas y en el aumento de la eficiencia energética mediante el uso de diversos dispositivos de recuperación de energía.

En la primera década del siglo XXI el uso de las plantas de desalación se expande a todas las islas, aunque perteneciendo, algunas de ellas, al sector privado.

Actualmente, la desalación de agua posibilita el abastecimiento, prácticamente total, de islas como Lanzarote o Fuerteventura. Se muestra en la Figura 16 y en la Tabla 1 los valores del número de desaladoras y la capacidad de producción de cada isla para el año 2012 y 2013 respectivamente. (A. Gómez-Gotor, B. Del Río-Gamero, I. Prieto Prado, and A. Casañas, “*The history of desalination in the Canary Islands*,” *Desalination*, vol. 428, no. October 2017, pp. 86–107, 2018. [Online]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916417318313>).

	Desalination plants	Public desalination plants	Private desalination plants
Gran Canaria	137	11	126
Tenerife	44	6	38
Fuerteventura	64	4	60
Lanzarote	85	5	80
La Gomera	1	0	1
El Hierro	4	4	0
La Palma	0	0	0

Figura 16. Número de plantas de desalación en 2012. Fuente: *The History of Desalination in the Canary Islands*

PRODUCCIÓN DE AGUA DESALADA EN CANARIAS (2013)							
<i>m³/día</i>	<i>Lanzarote</i>	<i>Fuerteventura</i>	<i>Gran Canaria</i>	<i>Tenerife</i>	<i>La Gomera</i>	<i>El Hierro</i>	<i>Total</i>
<i>Pública</i>	93.800	65.625	169.900	66.214	0	4.100	399.639
<i>Privada</i>	24.704	35.665	164.235	35.870	2.000	1.350	263.824
<i>Estimación FCCA</i>	29.429	47.500	164.235	88.299	2.000	1.350	332.813
<i>Total (oficial)</i>	118.504	101.290	334.135	102.084	2.000	5.450	663.463
<i>Estimación de la FCCA</i>	123.229	113.125	334.135	154.513	2.000	5.450	732.452

Tabla 1. Producción de agua desalada en Canarias (2013). Fuente: FCCA

El clima árido de las islas orientales produce un desequilibrio en el número de desaladoras respecto a las islas occidentales. Nótese, además, la alta sectorización privada de estas, resultado del auge turístico y del amplio uso agrícola.

Con el transcurso de los años la isla de Gran Canaria se ha visto obligada a aumentar su capacidad de producción. La tasa de población es superior a otras islas, a consecuencia, se establece como principal centro de producción de agua desalada en el archipiélago. Seguido aparece Lanzarote y Tenerife. Esta última ha sufrido una reducción de sus recursos hídricos en el sur de la isla que junto con el crecimiento del sector hotelero han hecho necesario el aporte a red de agua desalada.

Contrastando con la tendencia de las islas, en materia de desalación, las islas de La Gomera y La Palma no han requerido de el uso de esta tecnología. En el caso de la isla colombiana únicamente se ha instalado una planta desaladora.

Si se desea profundizar más sobre la evolución histórica de la desalación en Canarias se recomienda consultar la tercera parte del libro *Introducción a la Desalación de Agua* publicado por José Miguel Veza.

(Veza. J. M.; “*Tercera Parte. La Experiencia de Canarias*” en *Introducción a la desalación de agua*; Servicio de Publicaciones y Producción Documental de La Universidad de Las Palmas de Gran Canaria; 2002; pág.: 331-375)

3.3.2. *La desalación en la isla de La Gomera*

El gran recurso hídrico de la isla de La Gomera ha imposibilitado el aporte de agua desalada al abastecimiento insular. Se tardó hasta el año 2002 para construir, hasta el momento, única EDAM existente en la isla. Perteneciente al sector privado y con un mediano tamaño tiene una producción de 2000 m³/día que suministra agua al Hotel Jardín Tecina para el riego del campo de golf y de los cultivos privados. La tecnología de ósmosis inversa se ha implantado siguiendo la corriente de esos años.

La EDAM de este proyecto ha basado parte del estudio en la desaladora mencionada dada la similitud y cercanía.

4. Generalidades

4.1. La desalación de agua

En primera medida se debe aclarar la terminología utilizada. Según el Diccionario de la Lengua Española (DLE) editado y elaborado por la Real Academia Española (RAE), el término *desalación* se define como la acción y el efecto de desalar (quitar la sal a algo). Si bien, el vocablo correcto es *desalinización* definido como la acción y el efecto de desalinizar (quitar la sal del agua del mar o de las aguas salobres, para hacerlas potables o útiles para otros fines). Aun así, la RAE ha considerado sinónimo ambas terminologías. En España se ha hecho bastante común el uso de la palabra desalación.

La desalinización o desalación es un proceso mediante el cual se elimina la sal del agua de mar o de las aguas salobres. Las encargadas de llevar a cabo esta tarea son las plantas desaladoras.

En la actualidad existe gran diversidad de aplicaciones que posibilitan esta labor. A continuación, se mostrarán y detallarán las más utilizadas. No obstante, se hará mayor hincapié en la técnica utilizada para este proyecto, la ósmosis inversa.

Según la tecnología utilizada, los procesos de desalación se distinguen en dos grupos. El primer conjunto hace uso de la termodinámica, utilizando el cambio de fase para llevar a cabo la separación. Aportando energía térmica, en forma de calor, se obtienen los procesos de

evaporación o destilación: evaporación instantánea multietapa (MSF), destilación multiefecto (MED) y Compresión de Vapor (CV).

El segundo grupo hace referencia a la utilización de membranas. Si se aporta energía eléctrica o mecánica se consiguen los procesos de electrodiálisis y ósmosis inversa respectivamente.

Aparecen también otro tipo de aplicaciones como pueden ser la humidificación solar (SH), la destilación por congelación o el intercambio iónico.

4.1.1. Procesos de desalación por evaporación

- *Evaporación instantánea multietapa (MSF)*. El agua de mar se introduce en gotas sobre una cámara a baja presión, por debajo de la presión de saturación. Parte de las gotas se evaporan y posteriormente se condensan para obtener agua desalada. El agua residual repite el mismo proceso en cámaras con presiones más bajas. Las plantas pueden contar con más de 24 etapas.

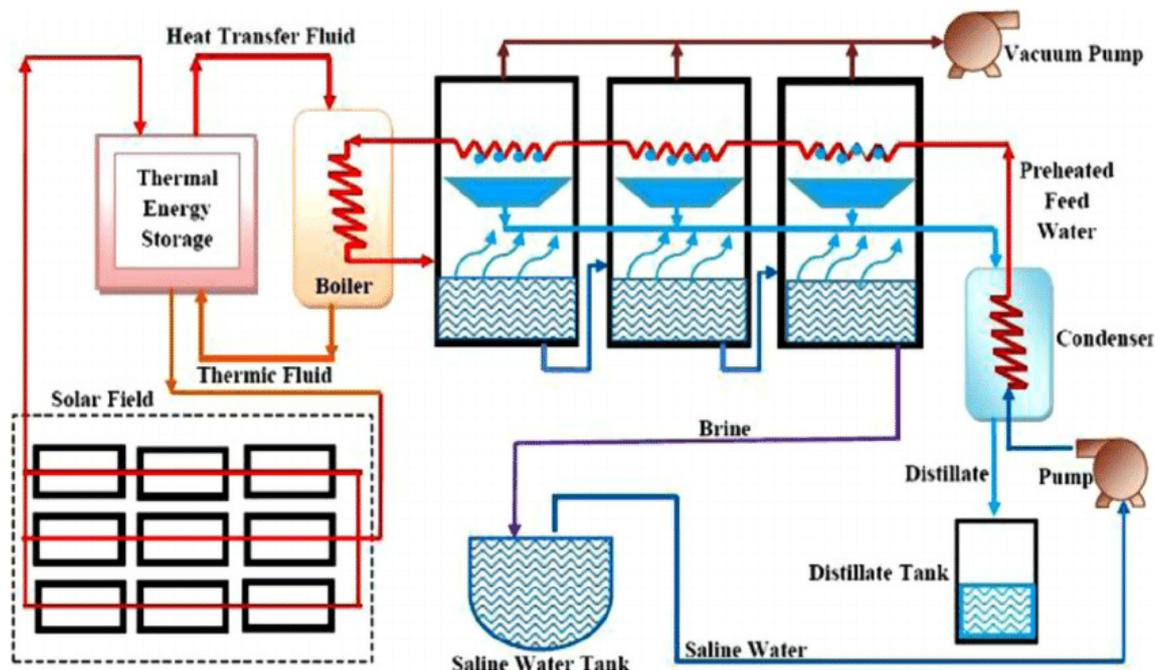


Figura 17. Esquema de planta desaladora MSF con energía solar.
Fuente: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*

- *Destilación multiefecto (MEF)*. Este proceso es idóneo para aprovechar el calor residual de procesos industriales. Se hace pasar vapor por el interior de un intercambiador de tubos existente dentro de cada etapa. A continuación, se pulveriza agua de mar sobre los tubos para conseguir la evaporación de la misma. El vapor de

agua obtenido se hace circular hasta la siguiente etapa para su condensación. El fluido no evaporado se recoge en la base de las cámaras y se recircula a la zona de pulverización para repetir el proceso. Se muestra en la Figura 16 un esquema representativo del proceso.

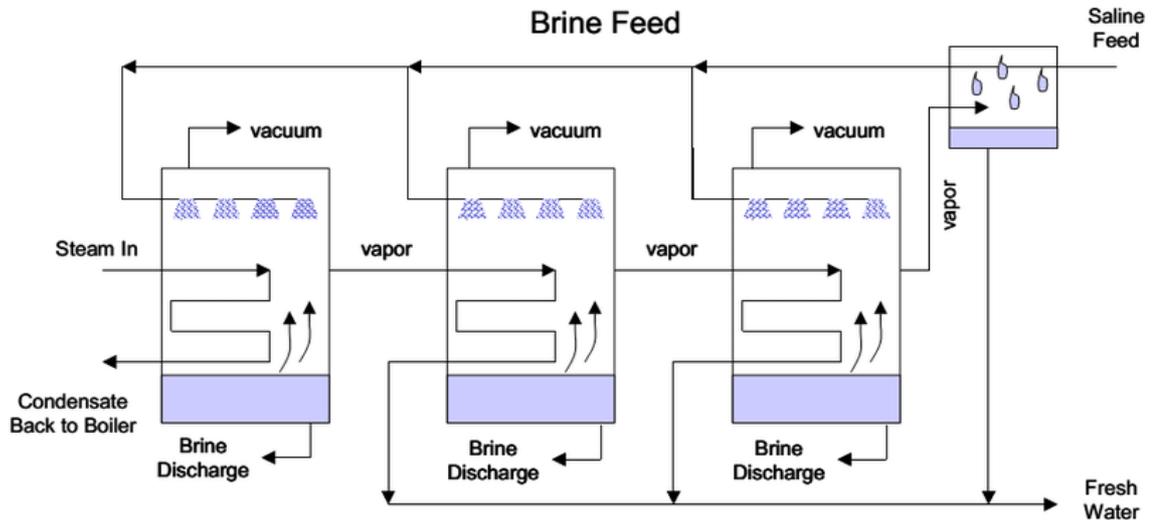


Figura 18. Esquema de un proceso de destilación multiefecto (MEF). Fuente: Journal of Scientific Research

- *Compresión de vapor (CV)*. El principio de funcionamiento es similar al anterior. En este caso el agua que se pulveriza es evaporada por el calor que suministra el compresor al aumentar la presión del agua. El propio compresor aspira el vapor obtenido y nuevamente lo comprime para enviarlo hasta el intercambiador de calor exterior, encargado de condensar el agua producto.

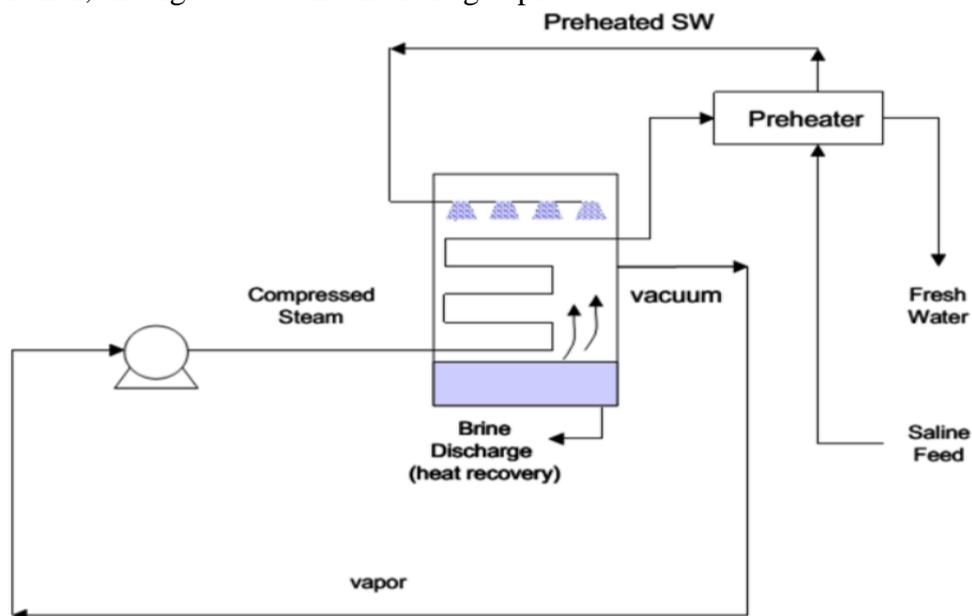


Figura 19. Esquema de un proceso compresión de vapor (CV). Fuente: Journal of Scientific Research

4.1.2. *Procesos de desalación por membranas*

- *Electrodiálisis (ED)*. Consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través de una solución iónica introducida entre dos electros. De esta forma se obtiene una separación de los iones. Los cationes (+) son atraídos por la polaridad negativa mientras que los aniones (-) lo son hacia el electrodo positivo. Si aprovechando esta circunstancia se colocan, entre ambos electrodos, dos membranas semipermeables se consigue el paso único del Na^+ o del Cl^- . Se logra, en el centro de la celda electrolítica, un agua desalada.

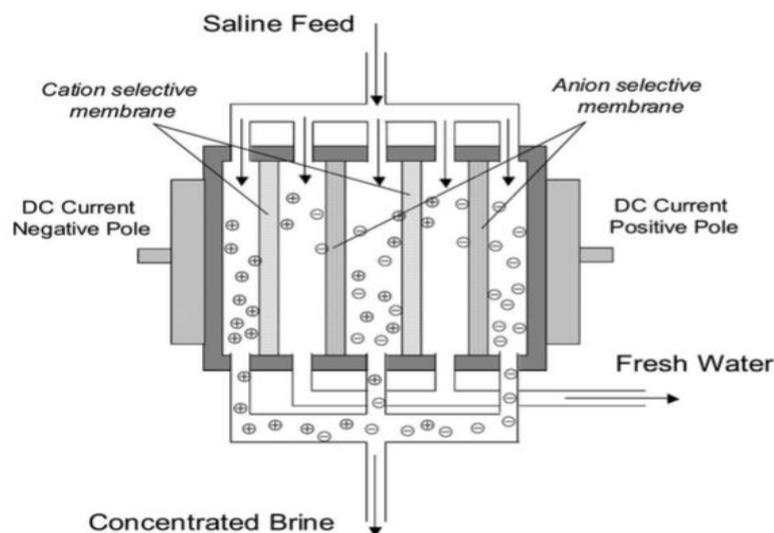


Figura 20. Esquema de un proceso de electrodiálisis (ED). Fuente: *Journal of Scientific Research*

El proceso de ósmosis inversa se detallará por separado para realizar un análisis más preciso. Por otra parte, si se desea obtener más información acerca de la tecnología de desalación se recomienda visitar la siguiente bibliografía.

- Segunda parte del libro *Introducción a la Desalación de Agua* publicado por José Miguel Veza. (Veza. J. M., “*Segunda Parte. Procesos de Desalación*” en *Introducción a la desalación de agua*, Servicio de Publicaciones y Producción Documental de La Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2002, pág.: 109-250)
- El artículo *Desalination Technologies for Developing Countries: A Review* publicado en *Journal of Scientific Research*. (M. S. Islam, A. Sultana, A. H. M. Saadat, M. S. Islam, M. Shammi, and M. K. Uddin, “*Desalination Technologies for*

Developing Countries: A Review,” J. Sci. Res., vol. 10, no. 1, pp. 77–97, 2018, [Online] <https://doi.org/10.3329/jsr.v10i1.33179>).

- Informe Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano. (Ministerio de Sanidad y Política Social, “Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano,” *Inf. Estud. e Investig.*, 2009).

4.2. Proceso de desalación por ósmosis inversa

La ósmosis inversa es un proceso basado en el funcionamiento de la ósmosis natural. Esta se produce cuando dos disoluciones de distinta concentración de sales se encuentran separadas por una membrana semipermeable. De forma natural, aparece un flujo de agua desde la disolución de menor concentración hacia la de mayor concentración. Únicamente pasan las moléculas de agua, quedando las sales atrapadas en la membrana. Este flujo continúa hasta que las concentraciones a ambos lados de la membrana se igualan. La fuerza que provoca ese movimiento se conoce como presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales en el interior de ambas soluciones.

Tal y como se ilustra en la Figura 21, el proceso de ósmosis inversa produce una inversión en la dirección del flujo. Es decir, aplicando una presión (superior a la osmótica) sobre la disolución más concentrada se consigue que el agua fluya hacia la solución más diluida.

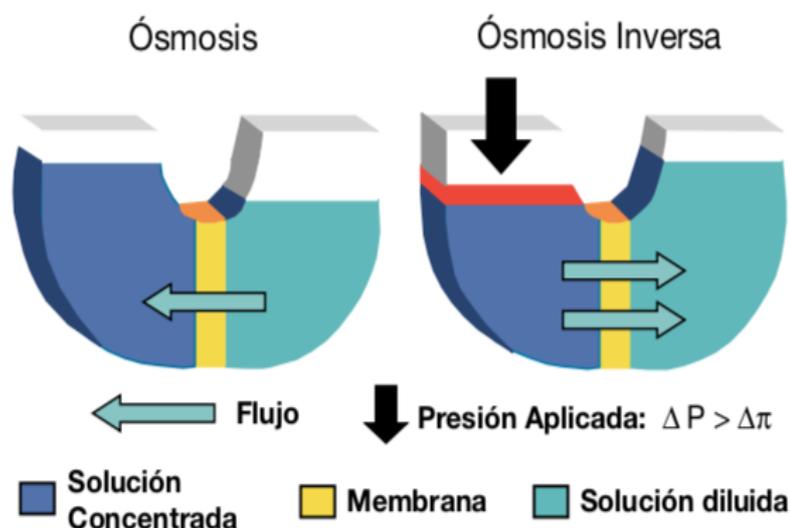


Figura 21. Proceso de ósmosis natural y ósmosis inversa.
 Fuente: Ministerio de Sanidad y Política Social

Así, no se concibe el proceso de ósmosis inversa sin el uso de membranas que imposibiliten el paso de la sal. En la actualidad, según la aplicación de uso, existen diferentes modelos de membranas.

4.2.1. *Las membranas de ósmosis inversa*

Siguiendo la estructuración interna de la membrana se consideran cuatro configuraciones básicas:

1. *Plato y marco*. Es la primera membrana en utilizarse. Consiste en una membrana plana que se introduce dentro de un marco, circular o rectangular, que actúa de soporte. Para recoger el permeado obtenido, las membranas se posicionan a ambos lados de un plato.
2. *Tubular*. Presenta el diseño más simple. La membrana se introduce dentro de un tubo resistente. El agua es circulada por el interior de la membrana y se filtra hacia el exterior mediante unos orificios minúsculos. El fondo del recipiente en el que va introducido el tubo hace de depósito para recoger el líquido permeado.
3. *Fibra hueca*. A diferencia de las anteriores, la membrana se construye con su propia estructura soporte. Está compuesta por fibras finas que se estructuran en un tubo con forma de U. El agua a presión es introducida desde el exterior de la fibra. Se retienen las moléculas desechables y se permite el flujo del agua producto por su interior, recogiénose a través del extremo opuesto de la alimentación. El agua que no ha pasado a través de la membrana arrastra las sales hacia la salida del concentrado. La densidad de empaquetado posibilita una mayor relación de producción de agua. A consecuencia, esta configuración presenta mayor índice de ensuciamiento.
4. *Arrollamiento en espiral*. Actualmente acaparan la instalación en la tecnología de la ósmosis inversa. Están constituidas por el enrollamiento de una serie de láminas rectangulares. Las láminas se agrupan entre sí pero se separan por un espaciador que es capaz de recoger el flujo de permeado. El arrollamiento final se introduce en unos tubos capaces de resistir las altas presiones de operación, conocidos como cajas de presión. La alimentación se sitúa en un extremo y la salida de salmuera en su opuesto. El flujo de permeado se puede recoger en cualquiera de los dos extremos. Siguiendo la representación existente en el informe *Guía de Desalación: aspectos*

técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano, la composición que sigue este tipo de membrana es:

- Membrana.
- Espaciadores de salmuera.
- Espaciadores de permeado.
- Tubos de permeado.
- Tapas finales.
- Envoltorio del elemento.
- Junta labiada de salmuera.

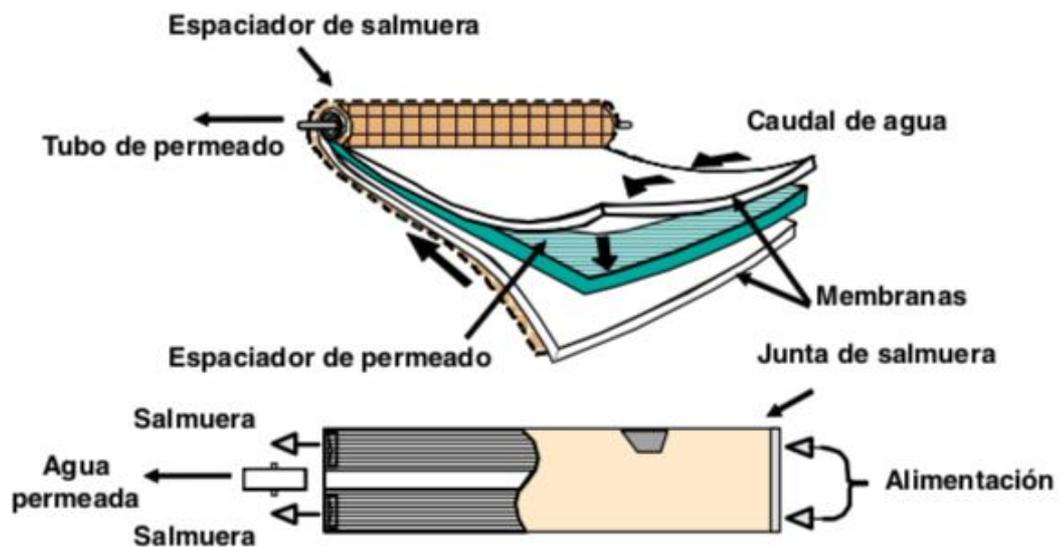


Figura 22. Membrana de arrollamiento espiral. Fuente: Ministerio de Sanidad y Política Social

El material de este tipo de membranas se clasifica en orgánico e inorgánico. Actualmente, el mercado cuenta con un amplio abanico de posibilidades para la elección de una membrana en función de su aplicación. No obstante, el más es la poliamida aromática. Este material presenta buenas prestaciones frente a los agentes químicos del agua de mar.

Por otro lado, para facilitar la selección de las membranas, los fabricantes han estandarizado el tamaño según diámetro y longitud. Los más utilizados en las aplicaciones industriales o de abastecimiento son 8 pulgadas (200 milímetros) y 1 metro respectivamente. No obstante, estas dimensiones varían en función de la capacidad de producción deseada.

4.3. Instalación desaladora de agua por ósmosis inversa

La estructuración de una planta de desalación consta, principalmente, de cinco partes bien diferenciadas:

1. Captación de agua de mar.
2. Pretratamiento fisicoquímico.
3. Equipos de bombeo y bastidor de membranas de ósmosis inversa.
4. Postratamiento de acondicionamiento.
5. Distribución y drenaje de salmuera.

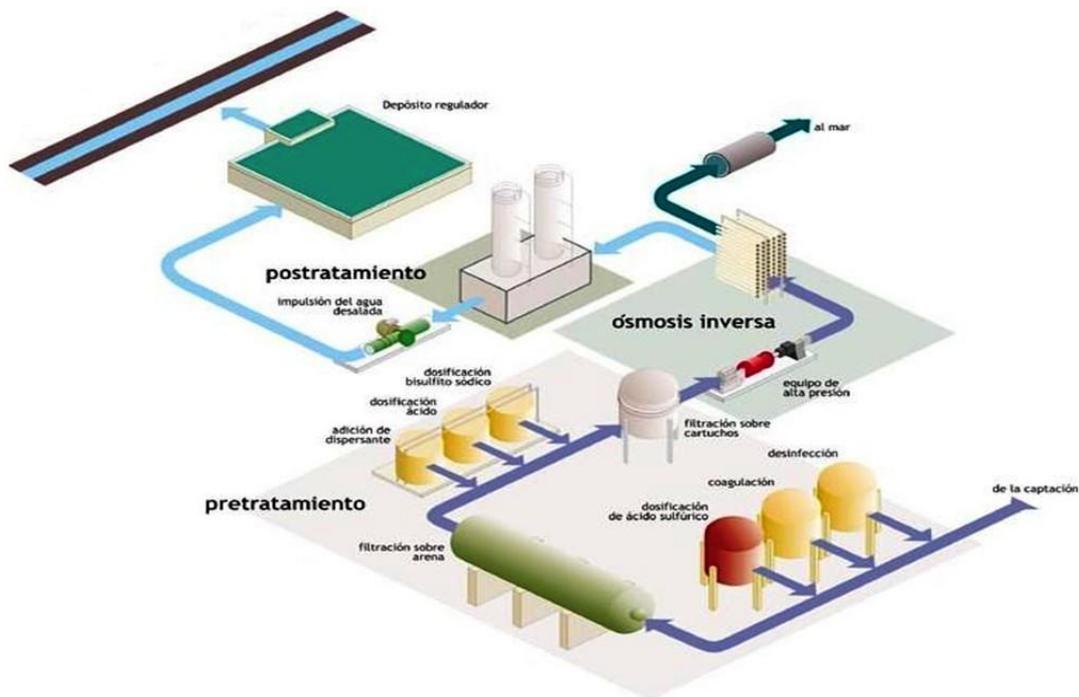


Figura 23. Estructuración de una planta de desalación. Fuente: BNamericas

4.3.1. Captación del agua de mar

Dependiendo de la localización y del caudal de extracción las tomas de captación más comunes son:

- *Toma cerrada.* La captación, en este tipo de tomas, se realiza mediante pozos o mediante una cántara común. Se logra captar un agua de mayor calidad debido al efecto de filtrado que realiza el terreno. Tienen unas dimensiones

determinado, en función del caudal de suministro. Para la obtención del agua se utilizan bombas sumergibles (pozos) u horizontales (cántara común), capaces de impulsar el fluido hasta la cota de la desaladora. No obstante, el gran inconveniente de este tipo de tomas es la permeabilidad del terreno. Puede dificultar la extracción de grandes caudales de suministro. Aún así, si la orografía y los parámetros de operación lo permiten, son las más recomendables. Se muestran algunas ventajas y desventajas de la toma cerrada en la Tabla 2.

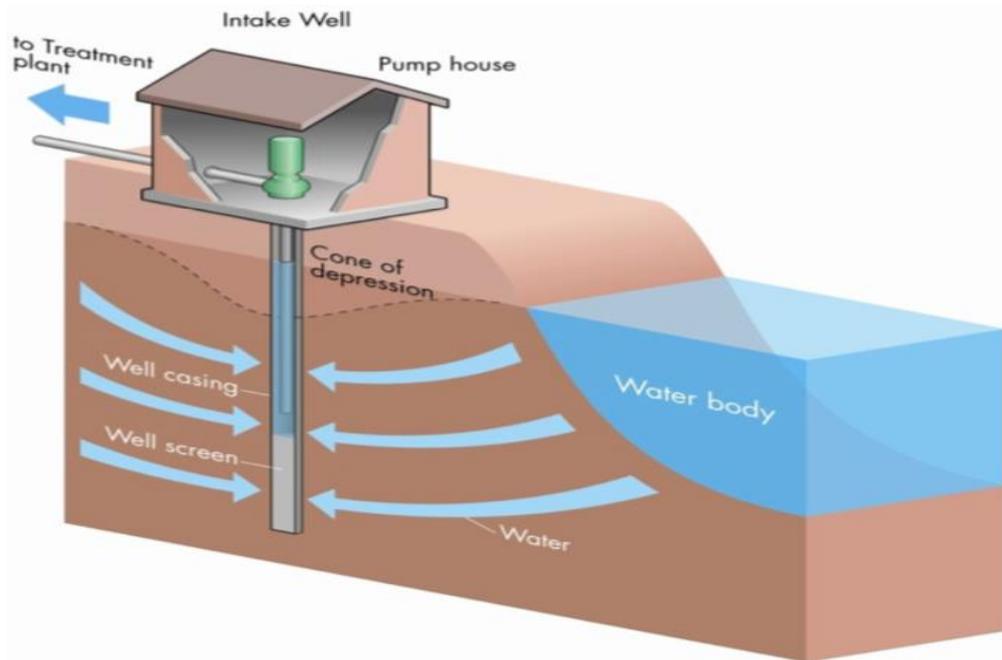


Figura 24. Esquema de captación cerrada mediante pozos. Fuente: WaterReuse

- *Toma abierta.* La captación abierta se realiza por canal o por emisarios submarinos. Se suelen instalar cuando se necesitan grandes caudales de suministro. El agua de captación posee peor calidad, a consecuencia, se requerirá de un pretratamiento más complejo y costoso. El primer caso, la toma en canal, se instala en la superficie del mar y es de menor longitud. Suele presentar indicios de contaminación por algas o turbidez. Se requieren de filtros a la entrada de la toma.

Por el contrario, el emisario submarino no presenta los inconvenientes anteriores. Este tipo de toma se sumerge y ancla, con dados de hormigón si el terreno lo permite, en las profundidades del fondo marino. Por ello, son necesarios el uso de materiales anticorrosivos como el polietileno (PE) o el

poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV). En la Tabla 2 se reflejan las ventajas y desventajas de esta instalación.

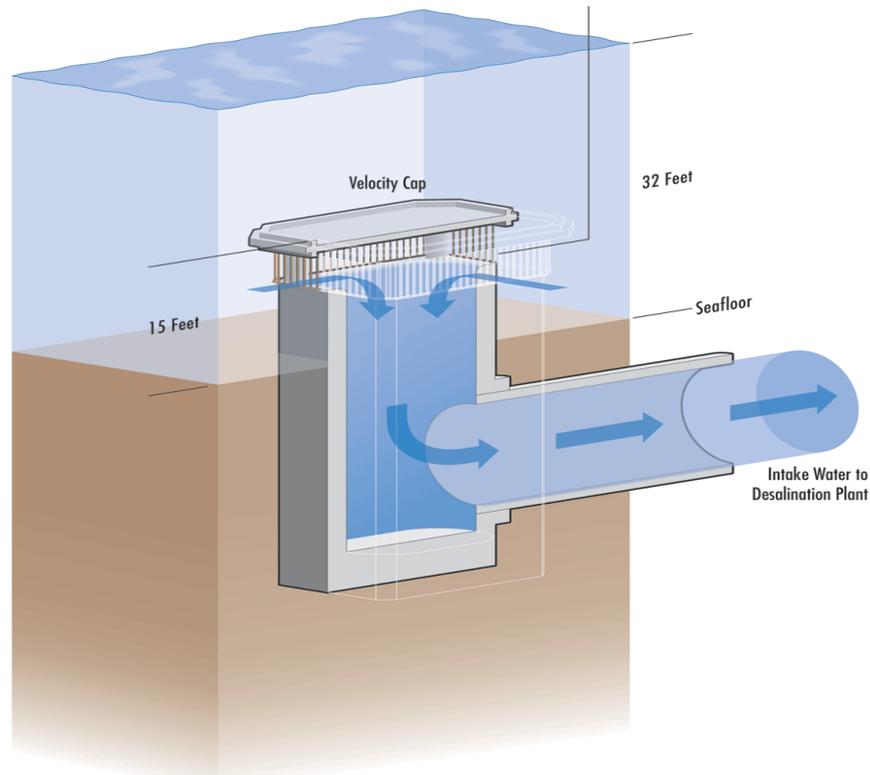


Figura 25. Toma abierta mediante emisario submarino. Fuente: Steve Cook Illustration

TOMAS DE CAPTACIÓN PARA DESALACIÓN	
Captación cerrada	Captación abierta
<i>Agua limpia como consecuencia de la acción filtrante del terreno.</i>	<i>Contenido en sólidos en suspensión importante y variable</i>
<i>Mínima actividad orgánica o biológica</i>	<i>Importante actividad biológica y presencia de materia orgánica</i>
<i>Baja concentración de oxígeno disuelto</i>	<i>Mayor exposición a la contaminación</i>
<i>Temperaturas estables</i>	<i>Importante concentración de oxígeno disuelto</i>
<i>Posible presencia de altas concentraciones de hierro, manganeso, sílice y aluminio</i>	<i>Composición química muy variable</i>
<i>Posible contaminación por nitratos y plaguicidas</i>	<i>Posible presencia de gran variedad de contaminantes</i>
<i>Composición química bastante estable aunque sujeta a variaciones temporales o estacionales por contacto con otros acuíferos</i>	<i>Temperaturas más variables</i>

Tabla 2. Tomas de captación para desalación. Fuente: Ministerio de Sanidad y Política Social

4.3.2. Pretratamiento fisicoquímico

Para aumentar la vida útil de los equipos y reducir costes de mantenimiento se requiere de un sistema de pretratamiento. La definición de esta técnica, según la Guía de Desalación, es la siguiente, “*el objeto del pretratamiento en las plantas de desalación es adecuar las características fisicoquímicas y biológicas del agua captada a las necesidades del proceso de desalación, para evitar de ese modo, la corrosión, la formación de incrustaciones y, en definitiva, el deterioro prematuro de los equipos*”. (Ministerio de Sanidad y Política Social, “Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano,” *Inf. Estud. e Investig.*, 2009, pág: 32).

El pretratamiento se debe ajustar a las características y requerimientos del proceso de desalación elegido. Como el proyecto utilizará el proceso de membranas, el estudio de pretratamiento estará enfocado en esta tecnología. Se recomienda consultar la bibliografía descrita en el apartado de procesos de desalación si se desea adquirir más información acerca de los procesos de pretratamiento.

La tecnología de membranas requiere un sistema de pretratamiento capaz de eliminar o reducir al máximo posible el riesgo de obstrucción en las membranas por acumulación de partículas, materiales y microorganismos sobre su superficie. Con ello se aumenta la vida y la eficiencia de las membranas. El atascamiento produce un incremento en la presión necesaria de funcionamiento y una decadencia en la calidad del agua.

Una instalación de pretratamiento para el proceso de membranas debe conseguir:

- *Eliminar los sólidos en suspensión.* Las partículas en suspensión pueden acabar atrapadas en los diminutos filtros de la membrana. Para la prevención de este inconveniente se realiza una valoración según el índice de fouling o el SDI₁₅ (Silt Density Index).
- *Evitar la precipitación de óxidos metálicos.* La aparición de óxidos de hierro y manganeso IV pueden producir un atascamiento en la membrana. Por el contrario, la aparición de aluminio en el agua produce una precipitación en forma de hidróxido. A consecuencia, se puede crear una capa de impermeabilidad en la superficie de la membrana
- *Evitar la precipitación de sales minerales.* Si la concentración en el agua de rechazo supera el producto de solubilidad se produce una precipitación de sales

en la membrana. Para limitar la formación de cristales en la superficie se utilizan productos antiincrustantes.

- *Reducir el contenido de materia orgánica del agua.* La materia orgánica, de origen natural (humus vegetal) o artificial (aceites o grasas) produce el atascamiento de los elementos de las membranas.
- *Eliminar o reducir la actividad biológica del agua de entrada.* Si el agua de aportación contiene microorganismos se puede desarrollar un crecimiento microbiológico. Se produce un deterioro en la capa activa de la membrana, en caso de ser una biodegradable, o un atascamiento en caso de no serlo.

(Ministerio de Sanidad y Política Social, “*Pretratamiento en los procesos de membranas*” en Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano, *Inf. Estud. e Investig.*, 2009, pág: 31-35).

Para conseguir un resultado satisfactorio y cumplir con los requisitos anteriores, se utilizan los siguientes sistemas de pretratamiento fisicoquímicos.

- *Acidificación y dosificación de inhibidores de la incrustación.* Aumentando la acidez del agua se evita la precipitación de las sales. No obstante, se requiere una dosificación de antiincrustantes para evitar la aparición de cualquier tipo de óxido que favorezca el atascamiento.
- *Oxidación.* Este proceso se utiliza para eliminar sustancias orgánicas, hierro ferroso y manganeso divalente. Se utilizan oxidantes como el hipoclorito sódico y el permanganato potásico. Es imprescindible realizar, tras este proceso, una filtración para eliminar las formas insolubles oxidadas.
- *Coagulación-floculación.* Las sustancias coloidales, orgánicas e inorgánicas, que producen una obstrucción en la membrana son eliminadas con este proceso. Se debe realizar conjunto con la decantación y la filtración. Se adhiere una sal metálica o coagulante (sales de aluminio o de hierro) para neutralizar la partícula de la carga asociada a las partículas coloidales.
- *Decantación y flotación.* Si los índices de concentración de materia floculada superan los 30-50 mg/L, se debe hacer uso de decantadores. Estos eliminan la materia en suspensión y la materia floculada por sedimentación gravitatoria. Un proceso alternativo es la flotación. Se eliminan los sólidos existentes con la inyección de microburbujas de aire.

- *Filtración por lecho de arena.* Se usan filtros de arena por presión y se sitúan, de forma común, en conjuntos para mejorar su capacidad. Son capaces de retener partículas de hasta 0,1 mm. El agua circula por el interior desde arriba hacia abajo, con lo que las partículas quedan en la parte superior. Cuando los filtros se colmatan deben lavarse para eliminar la suciedad acumulada y devolverlos a su estado de máxima eficacia.
- *Filtración por cartuchos.* Es un proceso imprescindible en la desalación. El poro del filtro se comprende entre 1 y 5 μm nominales para evitar el arrastre de macropartículas hasta las membranas. Se sitúa previo paso de estas. Por ello, es el pretratamiento mínimo que debe tener una EDAM.
- *Desinfección.* Se requiere para eliminar los agentes microbiológicos del agua. Existen dos técnicas, la dosificación de un oxidante (cloro) con un posterior agente reductor para evitar el deterioro de la membrana o por un proceso físico como es la radiación ultravioleta.
- *Adsorción.* Este procedimiento es utilizado para eliminar las concentraciones de materia orgánica. El empleo de filtros de carbón activo posibilita este hecho. No obstante, estos equipos son susceptibles de albergar colonias de microorganismos que deberán ser tratadas posteriormente.

En la actualidad, se han introducido nuevas posibilidades en las técnicas de pretratamientos, tales como, la microfiltración (MF), ultrafiltración (UF) y la nanofiltración (NF). Estas tecnologías son utilizadas en el tratamiento de aguas superficiales destinadas a consumo humano, así como en el tratamiento de aguas residuales. A consecuencia, no se detallará el funcionamiento de las estas. No obstante, se puede obtener más información en la bibliografía siguiente, Informe Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano.

(Ministerio de Sanidad y Política Social, “*Pretratamiento en los procesos de membranas*” en Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano, *Inf. Estud. e Investig.*, 2009, pág: 35-49) o en el artículo Introducción a la desalación por ósmosis inversa. Conceptos básicos. (C. Tejedor, “Introducción a la desalación por ósmosis inversa. Conceptos básicos,” p. 56, 2008).

4.3.3. Núcleo de ósmosis inversa

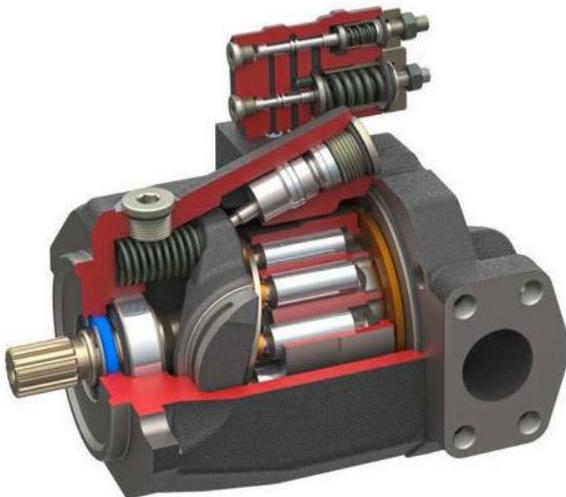
La producción de agua producto se realiza en el núcleo de ósmosis inversa o de desalación. Esta constituido por los equipos de alta presión, los recuperadores de energía y los bastidores de membranas.

4.3.3.1. Bombas de alta presión

Son, por así decirlo, el “corazón” del proceso de ósmosis inversa. Deben aportar la presión necesaria para superar la presión osmótica del agua que permita obtener la producción predeterminada. Dada su importancia, la selección de la bomba debe cumplir con dos requisitos, la presión de bombeo necesaria y el caudal de producción deseado. Si bien, se deben tener en cuenta otros aspectos como son los materiales de construcción, el mantenimiento, el coste y el rendimiento. Los modelos más utilizados para esta aplicación son las bombas de desplazamiento positivo o de tipo pistón y las bombas centrífugas.

Las bombas de desplazamiento positivo o de tipo pistón son utilizadas en instalaciones de pequeña capacidad. Presentan un rendimiento hidráulico bastante aceptable, especialmente las de tipo pistón, sin embargo, el coste es elevado y se requiere de un mayor mantenimiento.

Por otro lado, las bombas centrífugas son estructuralmente más sencillas. Este hecho reduce el coste de adquisición y de mantenimiento, aunque el rendimiento disminuye respecto a las otras bombas. Dentro de la diversidad estructural de la bomba centrífuga, en el proceso de ósmosis inversa se suelen utilizar las bombas de tipo segmento y las de cámara partida.



*Figura 27. Bomba de pistones axial.
Fuente: Indimart*



*Figura 26. Bomba centrífuga.
Fuente: Indimart*

4.3.3.2. Recuperadores de energía

En búsqueda de una optimización del consumo de energía en el proceso de ósmosis se han desarrollado diversas tecnologías que permiten aprovechar la energía hidráulica existente en el flujo de rechazo. El flujo de rechazo tiene, prácticamente, la misma presión que el fluido de alta presión. La presión no se pierde en el interior de las membranas, sino que el flujo de rechazo tiene esa misma presión menos las pérdidas de carga que produce el paso de las membranas. Dado que el flujo de rechazo será devuelto al mar, lo idóneo es transferir esa energía al flujo de alimentación de las membranas reduciendo así el trabajo correspondiente a las bombas de alta presión (BAP). Los encargados de esta misión son los recuperadores de energía. En la actualidad existen diversos equipos que cumplen este requisito, la turbina Pelton, los Turbochanger y los intercambiadores de energía.

La turbina Pelton es un sistema similar al utilizado para la producción de energía eléctrica. La presión hidráulica del flujo de rechazo incide sobre los álabes de la turbina produciendo un movimiento rotativo. Se acopla a ella el motor de la bomba de alta presión aumentando así la presión en el flujo de alimentación. Este tipo de dispositivos tienen un 88% de rendimiento aproximadamente.

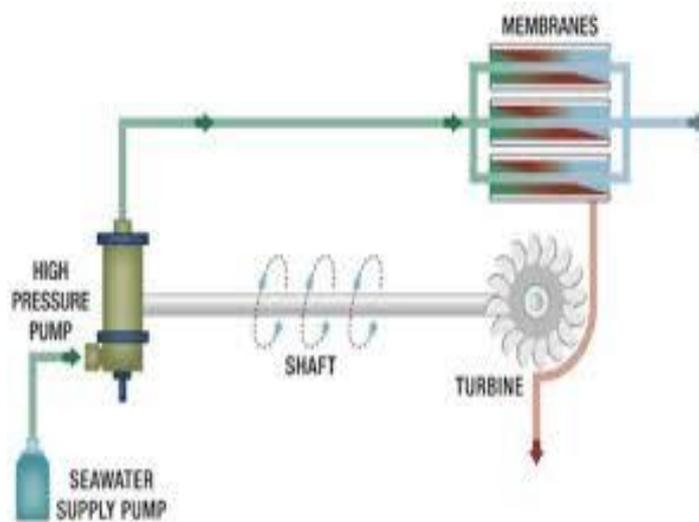


Figura 28. Turbina Pelton. Fuente: USF Scholar Commons

Por otro lado, el Turbochanger, produce un aumento de presión en el flujo de alimentación utilizando la energía hidráulica del flujo de rechazo. Para ello se instala la turbina y la bomba en el mismo eje. La gran ventaja es que con su funcionamiento hidráulico no hay

necesidad de prever un motor de accionamiento eléctrico. Este equipo se instala entre la bomba de alta presión y el bastidor de membranas. El rendimiento suele estar situado en torno al 90%.



Figura 29. Turbocharger. Fuente: Fedco-USA

Por último, los intercambiadores de presión, ha diferencia de los anteriores, son capaces de transformar la energía existente en el flujo de rechazo y transmitirla al flujo de alimentación sin convertirla previamente en energía mecánica. Según su funcionamiento se diferencian dos tipos, los intercambiadores de presión por rotación y los intercambiadores de presión por desplazamiento.

El principio de funcionamiento es similar para ambos:

1. Se introduce el agua de rechazo (alta presión) y el agua de alimentación (baja presión) en una cámara.
2. Se produce un intercambio de presión en los fluidos, reduciéndose la presión del agua de rechazo y aumentándose en la de alimentación.
3. El agua de alimentación a alta presión sale de la cámara destino a la bomba Booster, encargada de igualar la presión de fluido con la existente en el fluido de alimentación procedente de la bomba de alta presión. Estas bombas, generalmente centrifugas, poseen rendimientos superiores al trabajar con caudales más pequeños.
4. El fluido de rechazo de baja presión se expulsa de la cámara con la entrada, nuevamente, de agua de alimentación a baja presión.

Con estos equipos se consiguen rendimientos superiores al 90% especialmente en el intercambiador de presión por rotación. De esta forma se ha conseguido reducir significativamente el consumo específico del proceso de ósmosis inversa.

Se recomienda visualizar las animaciones existentes sobre el funcionamiento de estos equipos. Consultando las paginas web de los principales fabricantes (Energy Recovery, Danfoss o Flowserve) se puede precisar de más información.

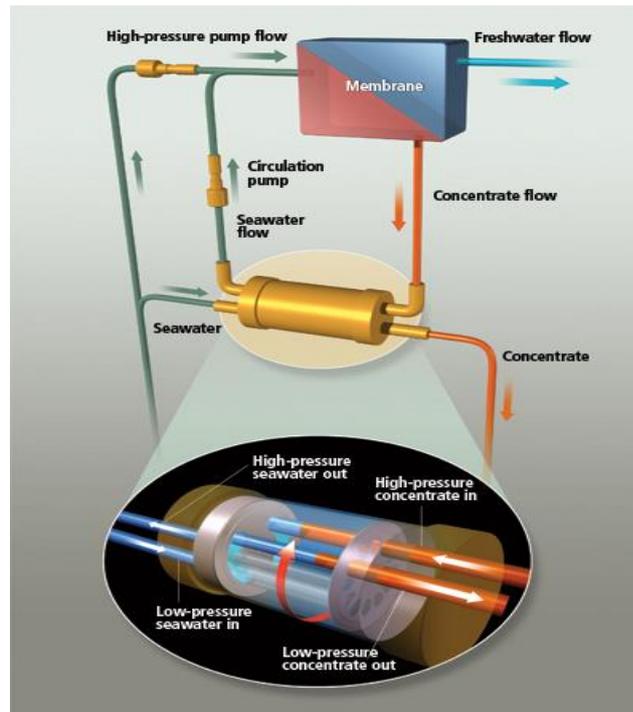


Figura 30. Intercambiador de presión de tipo rotativo. Fuente: Energy Recovery Inc

4.3.3.3. Bastidores de membranas

Las membranas se agrupan en lo que se denomina bastidor de membranas. Esta formado por una serie de tubos portamembranas en los que se alojan las membranas. Dependiendo de la estructura de esta última, el número de unidades varía. Para las membranas de arrollamiento en espiral, el tubo portamembranas es capaz de albergar 6 o 7 unidades. Tanto el número de unidades de tubos como de membranas dependen principalmente de:

- Las características del agua de alimentación.
- La temperatura.
- La conversión del proceso.
- La presión de alimentación.

- El coeficiente de compactación de la membrana y fouling factor (envejecimiento de la membrana).

Todos estos parámetros se simulan gracias a programas informáticos facilitados por los fabricantes de los equipos.

Los tubos portamembranas se conectan mediante tuberías de conexión. Además, se posibilita, dependiendo de la conversión del sistema, de conectar varios bastidores de membrana para aumentar el número de etapas.



Figura 31. Ejemplo bastidor de membranas EDAM Alicante. Fuente: Inima.es

4.3.4. *Postratamiento de acondicionamiento*

El sistema de postratamiento estará definido en función del uso que se le dará al agua. No obstante, las aguas desaladas presentan durezas y alcalinidad bajas. La regularización del agua se realiza con cinco actuaciones diferentes, la eliminación de CO₂ o descarbonatación, la mezcla de aguas, el intercambio iónico, el acondicionamiento químico y la desinfección. Si bien, únicamente se detallarán los procesos más utilizados siguiendo las recomendaciones del autor José Migue Veza en su libro *Introducción a la Desalación de Aguas*.

- *Eliminación de CO₂ o descarbonatación.* La reducción de pH realizada en el pretratamiento produce un agua agresiva con alto nivel carbónico. Mediante la descarbonatación se pueden reducir las concentraciones de CO₂ existentes y equilibrar, a consecuencia, los niveles de pH deseados. Para este proceso se utiliza un descarbonatador.
- *Acondicionamiento químico.* El proceso de equilibrio se lleva a cabo con la dosificación de algún componente químico. En este caso, si se desea reducir el pH se puede hacer uso de la sosa caustica (NaOH) o carbonato sódico (Na₂CO₃). Del mismo modo, si se desea remineralizar el agua se pueden aplicar dos técnicas. La remineralización mediante mezcla de aguas (mezclar el agua producto con otra que haya sido tratada previamente) o la remineralización química del agua producto (dosificando un componente químico que establezca el agua).
- *Cloración.* Por razones de potabilidad se aconseja mantener un nivel de cloro libre para evitar el desarrollo de crecimiento de organismos. Realizando un pretratamiento con gas Cloro, hipoclorito sódico o hipoclorito cálcico se consiguen los objetivos deseados.

4.3.5. *Distribución y drenaje de salmuera*

La distribución del agua producto estará condicionada por la ubicación y por el uso que se le dará. No obstante, suele seguir un proceso común para las plantas de desalación. El agua producto es bombeada (el equipo de bombeo se elige en función del caudal y de la altura que debe salvar) hasta un depósito de almacenamiento para su posterior distribución. Este debe tener una capacidad de almacenamiento que cumpla con las exigencias de producción.

Por otro lado, el proceso de ósmosis inversa genera un fluido de rechazo (salmuera). Este, generalmente, es devuelto al mar. El inconveniente de este proceso es la alta concentración en sales que presenta el fluido (aproximadamente entre el 1,6-2,5 de la salinidad del agua de mar). Este hecho afecta de forma directa a los ecosistemas marinos. Los organismos existentes se mantienen en equilibrio osmótico con el medio que los rodea. Si se altera el contenido en sales, el agua de las células tiende a salirse del organismo para igualar las concentraciones., produciendo una deshidratación en estos.

Para evitar en la medida de lo posible el impacto de salmuera en el mar existen dos procesos principales:

- *Descarga mediante emisario submarino.* Es un proceso que permite la disolución eficaz de las concentraciones en el mar. Simplemente consiste en instalar una serie de difusores en la tubería de descarga. Esta deberá tener una longitud y profundidad determinada que posibilite la impulsión del fluido y permita la mayor dispersión posible de la salmuera.
- *Descarga tras disolución previa.* Este proceso consiste en diluir la salmuera antes de su vertido. El fluido de rechazo se almacena en un depósito de gran capacidad y allí se diluye con agua procedente del mar. Esta operación reduce las concentraciones de sales, pero aumenta el consumo de la planta. Se requiere de un nuevo sistema de captación que bombee el agua hasta el depósito de disolución.

4.4. La energía eólica

La energía eólica es una fuente de energía renovable. Su funcionamiento permite captar la energía cinética existente en el viento y transformarla en energía eléctrica. El viento produce un movimiento rotativo en las hélices, que, acopladas a un generador mediante un sistema mecánico, son capaces de producir electricidad.

Presenta una serie de ventajas respecto a la producción de energía por fuentes convencionales.

1. Es una fuente inagotable.
2. No emite gases contaminantes.
3. No produce un gran impacto medioambiental en comparación con otras tecnologías.
4. Facilidad de montaje y mantenimiento.
5. Energía segura.

Así bien, también tiene una serie de aspectos negativos.

1. Variabilidad y aleatoriedad del viento.
2. Dificultad de planificación.
3. Rendimiento.

4.4.1. Antecedentes

La energía eólica ha permitido la evolución del ser humano. Desde tiempos inmemorables la humanidad utilizó el potencial de la energía eólica para navegar con los primeros barcos veleros. No obstante, los primeros molinos de viento aparecen en el siglo VII siendo utilizados para moler grano o para bombear agua.

El primer aerogenerador propiamente dicho se fabrica en 1888 pero hasta mediados del siglo XX no se produce un interés real por la energía eólica. En la década de los 70, a consecuencia de la crisis del petróleo, el desarrollo de los aerogeneradores sufre un crecimiento significativo. Con el paso de los años se ha aumentado la capacidad de producción, se han reducido los costes de inversión y se ha mejorado la tecnología de los equipos. Este hecho ha producido un impacto más que llamativo en las empresas de producción eléctrica.

En la actualidad, la energía eólica instalada en el mundo creció un 9,6% en 2018, hasta situarse en 591.000 MW, según datos del Global Wind Energy Council (GWEC). China, Estados Unidos, Alemania, India y España son los primeros productores mundiales.

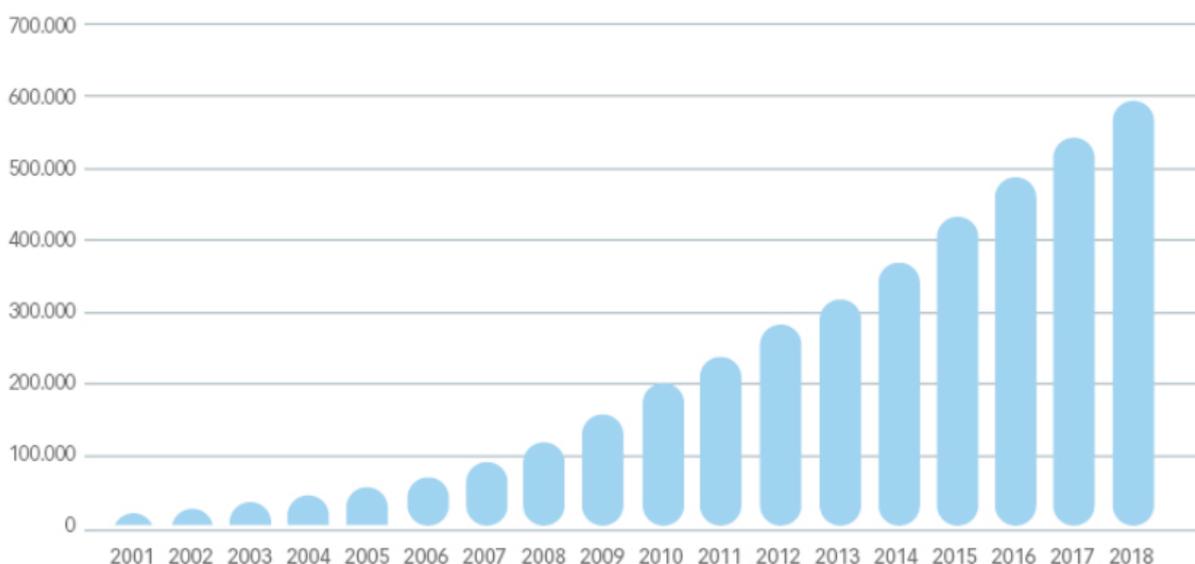


Figura 32. Evolución de la potencia instalada en el mundo (En MW). Fuente: GWEC

4.4.1.1. La energía eólica en Canarias

La energía eólica en las Islas Canarias aparece en 1950 cuando se construye el primer aerogenerador (15 kW) para iluminar la pista del aeropuerto de Gando en Gran Canaria. Años más tardes se instalarían los primeros aerogeneradores modernos, uno en cada provincia. Al igual que sucedió con la desalación, Canarias es un punto de desarrollo experimental para esta

tecnología. En 1988 se construyó en Granadilla un parque eólico experimental y años más tarde otro en Arinaga. Cuatro años más tarde se construyen en Granadilla y en Pozo Izquierdo los dos primeros parques eólicos de producción de energía eléctrica.

Con el paso de los años, el archipiélago canario ha sufrido un crecimiento exponencial en la capacidad de producción instalada. En la actualidad, según la Asociación Empresaria Eólica (AEE), las islas cuentan con un total de 431 MW instalados repartidos en 84 parques eólicos. Representa un 1,84% de la potencia total instalada en el país.

4.4.1.2. La energía eólica en la isla de La Gomera

Respecto a la isla de La Gomera, en 1994 se instala el primer y único parque eólico. Ubicado en Epina (Vallehermoso), cuenta con dos aerogeneradores de 180 kW de potencia. En 2018, una de las turbinas sufre la pérdida de un rotor a causa de los fuertes vientos.

Sin embargo, el futuro de la energía eólica en La Gomera es esperanzador. La nueva apuesta por el proyecto “La Gomera 100% renovable” permitirá la construcción de 5 parques eólicos con una capacidad individual de 2,32 MW (11,75 MW en total).

4.4.2. Fundamentos

El funcionamiento de la energía eólica depende, principalmente, de dos factores: el recurso eólico y el aerogenerador.

4.4.2.1. El recurso eólico

El viento es aire en movimiento a consecuencia de las diferencias de presión atmosférica. La radiación solar incide de forma desigual sobre la superficie terrestre creando variaciones de temperatura. Estas variaciones producen diferencias de presiones y densidades que permiten el movimiento de aire y, a posteriori, la formación del viento.

El gran inconveniente de la energía eólica es la variabilidad y aleatoriedad del viento. Es extremadamente difícil predecir las características del viento. Depende factores como la ubicación, la orografía o la dirección del viento.

No obstante, se han desarrollado técnicas que permiten obtener una aproximación del comportamiento del viento. Entre ellas cabe destacar el proceso estadístico de la distribución de Weibull. Esta operación nos permite medir las velocidades de viento más probables en una

zona determinada. Igualmente, existen diferentes aplicaciones informáticas que llevan a cabo estas labores de forma automática.

Otro inconveniente de la energía eólica es su bajo rendimiento. La energía cinética del viento no se transforma en su totalidad en energía eléctrica. Existe una limitación teórica, denominada límite de Betz, que impide que un sistema de captación pueda extraer más de un 59,3 % de esta potencia incidente. De cualquier modo, en la práctica, los aerogeneradores no son capaces de alcanzar esa cota. En el intervalo de operación más común, se sitúa entre un 35-45 % de la potencia incidente. Este porcentaje es denominado coeficiente de potencia. Es la relación entre la potencia generada por el sistema de captación por unidad de área de rotor y la potencia incidente en esa misma área.

4.4.2.2. Aerogeneradores

Un aerogenerador es un tipo de turbina eólica. Se considera turbina eólica a una máquina capaz de transformar la energía eólica en cualquier otro tipo de energía, tanto mecánica, como eléctrica.

Están constituidos por varios elementos.

- *El rotor.* Incluye las palas y el buje. Convierte la fuerza del viento en energía rotatoria. Las palas serán las encargadas de captar la energía cinética del viento. Cuanta mayor superficie de barrido posea mayor será la captación. No obstante, influyen otros parámetros como la densidad o velocidad del viento. Los aerogeneradores, en su mayoría, presentan tres palas en el rotor.
- *Góndola.* Alberga el generador eléctrico, el multiplicador y los sistemas hidráulicos. La energía rotatoria es transmitida mediante un eje al generador de energía para transformarla en electricidad. Antes de este proceso se aumenta la velocidad de giro con una caja de engranajes (multiplicador).
- *Torre.* Soporta la góndola y el rotor. Se determina la altura dependiendo de las características técnicas del rotor y del recurso eólico existente. De forma común, la estructura de la torre sigue un perfil tubular.

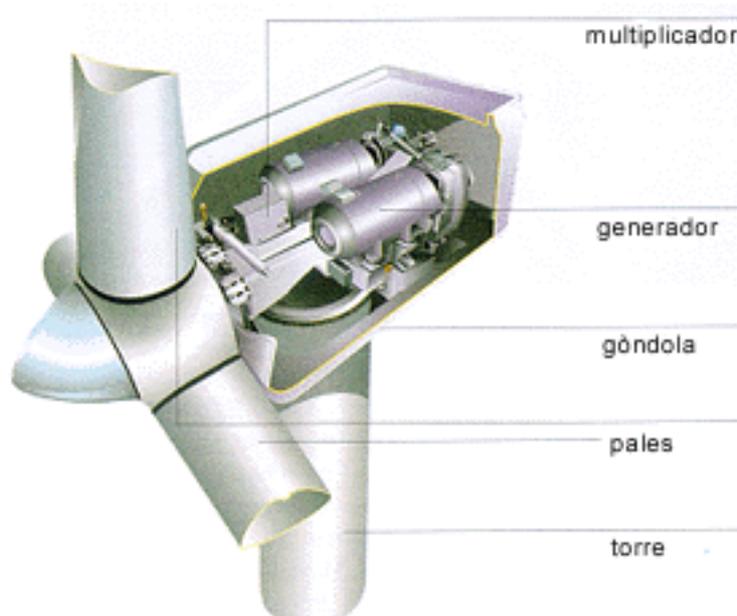


Figura 33. Esquema gráfico de un aerogenerador. Fuente: Blog.structuralia.com

Un ejemplo del potencial que tienen estos equipos es el modelo V164/8000 fabricado por la compañía Vestas. Es capaz de producir 8 MW de potencia. Sus aspas miden 80 metros de longitud y la altura de la góndola se establece en 200 metros. Sin embargo, el principal inconveniente que presenta es el elevado coste de inversión. Suponen más de la mitad del capital de un proyecto de esta categoría.

La energía eólica, en comparación con otras fuentes de producción de energía, presenta un alto coste de inversión. Si bien, con el paso de los años se ha producido una reducción bastante significativa, consecuencia de la alta competitividad existente en el sector. En la actualidad, el precio de inversión por MW instalado ronda los 1,4 millones de euros para la eólica terrestre y 2,5 millones de euros para la eólica marina. Respecto a 2015 se ha reducido un 30% y un 55% respectivamente. Los estudios deparan que esta reducción ira en aumento.

4.4.3. *La energía renovable en procesos de desalación*

La constante búsqueda por una disminución en los costes de producción ha sido el principal objetivo de las EDAM. El elevado consumo eléctrico que presenta la desalación produce un gasto económico directamente proporcional al mismo. Acompañado de un aumento del precio del combustible fósil, principal fuente de energía eléctrica, la energía renovable presenta unas características únicas para su implantación en esta materia.

El uso de la energía renovable en la técnica de la desalación se distingue en tres técnicas:

- *Uso indirecto*. La producción de energía eléctrica a través de una fuente renovable se aporta a la red. La EDAM se abastece de la red local. No existe una relación directa entre ambas. Se consigue, con esta medida, abaratar el coste de la energía de red.
- *Uso indirecto*. La producción de energía renovable se suministra directamente a la EDAM permitiendo el autoabastecimiento de esta. No depende de una red externa. El principal inconveniente es la aleatoriedad y variabilidad del recurso renovable.
- *Uso mixto*. Es una combinación de los casos anteriores. Se consigue solucionar la insuficiencia energética de la fuente renovable con un aporte eléctrico de la red local.

Combinando diferentes tecnologías se puede alcanzar el objetivo de suministrar electricidad para una producción de agua limpia y económicamente rentable. Un claro ejemplo es el parque eólico de 1,7 MW de potencia que se construyó para autoabastecer la estación desaladora de agua marina de Corralejo (Fuerteventura). El suministro se combina con la red eléctrica para cumplir con la demanda en caso de ausencia de recurso eólico (uso mixto).

En la actualidad existen proyectos que siguen esta línea de autoabastecimiento mixto. Por ejemplo, el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria promueve la instalación un parque eólico de autoconsumo en la EDAM Roque Prieto con una capacidad de 2,3 MW, en el término municipal de Santa María de Guía. También, el Cabildo de Gran Canaria ha adjudicado la instalación de 988 placas fotovoltaicas en la cubierta de la desaladora de Arucas-Moya para reducir la factura anual del consumo eléctrico.

No obstante, el alto consumo de las EDAM supone el uso de una fuente de energía constante y segura, principal inconveniente de las energías renovables (aleatoriedad y variabilidad). Para acabar con esta dificultad se están desarrollando sistemas de almacenamiento eléctrico o de cualquier otra fuente de energía. Esta tecnología permite el suministro eléctrico en momentos de producción crítica por parte de la fuente renovable.

En definitiva, la tendencia actual comienza a relacionar las desaladoras con un aporte energético limpio y respetable con el medioambiente.

5. Normas y referencias

5.1. Normas

- UNE 157001:2002 “Criterios generales para la elaboración de proyectos”
- Real 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 las Islas Canarias.
- Real Decreto-Ley 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.
- Real Decreto-Ley 137/2018, de 17 de septiembre, por el que se aprueba definitivamente el Plan Hidrológico Insular de la Demarcación Hidrográfica de La Gomera.

5.2. Bibliografía

- 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, J. M. *Introducción a la desalación de aguas*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Servicio de Publicaciones. (2002)
- Villarrubia López, M. *Ingeniería de la energía eólica*. Marcombo Barcelona Técnicas. (2012)
- *Mapas de Cultivos de La Gomera, “Informe estadístico,”* Consejería de Agricultura, Ganadería Pesca y Agua 2018.
- C. Tejedor, *Introducción a la desalación por ósmosis inversa. Conceptos básicos*, p 56, 2008.
- A. Gómez-Gotor, B. Del Río-Gamero, I. Prieto Prado, and A. Casañas, *The history of desalination in the Canary Islands* en *Desalination*, vol. 428, no. October 2017, pp. 86–107, 2018.
- M. S. Islam, A. Sultana, A. H. M. Saadat, M. S. Islam, M. Shammi, and M. K. Uddin, *Desalination Technologies for Developing Countries: A Review* *J. Sci. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 77–97, 2018.

- R. S. Timur, A. Corum, H. E. Okten, A. Coban, G. Demir, and T. Bozbura, *Comparative cost analysis of pressure exchanger (PX) and turbine type energy recovery devices at seawater reverse osmosis (SWRO) plants* J. Environ. Prot. Ecol., vol. 12, no. 3, pp. 1186–1194, 2011.
- J. L. Fuentes Yagüe, *Técnicas de Riego*, Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi-Prensa.

5.3. Otras referencias

- Aerogeneradores Enercorn: <https://www.enercon.de/home/>
- Aerogeneradores Dewind: <http://www.dewindco.com>
- Agencia Estatal de Meteorología: <http://www.aemet.es/es/portada>
- Agrocabildo: <http://www.agrocabildo.org>
- Asociación Empresarial Eólica: <https://www.aeeolica.org>
- Asociación Industrial Danesa del Viento: <https://winddenmark.dk>
- Bombas KSB: <https://www.ksb.com/ksb-en/>
- Bombas Lowara: <http://www.lowara.com>
- Bombas Grundfos: <https://es.grundfos.com>
- Bombas Wilo: <https://wilo.com/en/index.html>
- Consejo Insular de Aguas de La Gomera: <http://aguasgomera.es>
- Cabildo de La Gomera: <https://www.lagomera.es>
- Dirección General de Aguas: <https://www.gobiernodecanarias.org/agricultura/aguas/>
- Fundación Centro Canario del Agua (FCCA): <http://fcca.es>
- Grafcan: <https://visor.grafcan.es>
- iAgua: <https://www.iagua.es>
- Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA): <https://www.icia.es/icia/>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía: <https://www.idae.es>
- Instituto Nacional de Estadística: <https://www.ine.es>
- Instituto Canario de Estadística: <http://www.gobiernodecanarias.org/istac/>
- Instituto Tecnológico de Canarias (ITC): <http://www.itccanarias.org/web/>
- Instituto Geográfico Nacional (IGN): <https://www.ign.es/web/ign/portal>
- Membranas Hydranautics: <http://membranes.com>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación: <https://www.mapa.gob.es>

- Ministerio Para La Transición Ecológica: <https://www.miteco.gob.es/es/>
- Puertos del Estado: <http://www.puertos.es>
- Recuperadores de energía Danfoss: <https://www.danfoss.com/es-es/>
- Recuperadores de energía Energy Recovery: <http://www.energyrecovery.com>
- Repositorio institucional de la Universidad de La Laguna: <http://www.riull.ull.es>
- Red Eléctrica de España: <https://www.ree.es/es>
- Sede Electrónica del Catastro: <http://www.sedecatastro.gob.es>
- The Wind Power: <https://www.thewindpower.net>

5.4. Programas informáticos y herramientas de cálculo

- Documento Excel “PX-POWER-SELECTOR” para el dimensionado del recuperador de energía, desarrollado por Energy Recovery Inc.
- Documento Excel “Danfoss iSave Select” para el dimensionado del recuperador de energía, desarrollado por Danfoss.
- Google Earth
- Herramienta online de selección de bombas “Wilo Select 4”, desarrollado por Wilo: <https://wilo.com/es/es/Wilo-Services/Análisis-planificación-y-selección/Wilo-Select-4/>
- Herramienta online de selección de bombas “Xylect”, desarrollado por Lowara: https://www.xylect.com/bin/Xylect.dll?IS_NEXTPAGE=startup&IS_CRMST_ATUS=RESETCRM&IS_BROWSER=%23%231.5%231280%23737
- Herramienta online de selección de bombas “KSB EasySelect”, desarrollado por KSB: https://www.ksb.com/ksb-es/Selecciona_sus_bombas_y_valvulas/KSB-EasySelect_Configurador_de_Producto_es/
- Herramienta online de selección de bombas “Grundfos Product Center”, desarrollado por Grundfos: <https://product-selection.grundfos.com/sizing-result.html?qcid=595553254&sizetype=quick>
- Herramienta online “Estimación de la Energía producida por un Aerogenerador” del Instituto Tecnológico de Canarias: http://www.itccanarias.org/recursoeolico/calculation_tool/index.html
- Herramienta online “Necesidades Hídricas de Los Cultivos”, desarrollado por AgroCabildo: http://www.agrocabildo.org/recomendaciones_otros.asp

- Microsoft Excel 2019
- Microsoft Word 2019
- Software “IMSDesing” para el dimensionado de membranas, desarrollado por Hydranautics Nitto Company.

6. Abreviaturas y definiciones

Se hará referencia a las terminologías más destacadas del escrito. Existiendo la posibilidad de una descripción imprecisa u poco clara, se desea minimizar la confusión o equivocación en la comprensión lectora del documento con las siguientes abreviaturas y definiciones.

6.1. Abreviaturas

- AEE: Asociación Empresarial Eólica
- AEMET: Agencia Estatal de Meteorología.
- EDAM: Estación desaladora de agua de mar.
- BAP o HPP: Bomba de alta presión.
- FC: Factor de carga.
- FCCA: Fundación Centro Canario del Agua
- ITC: Instituto Tecnológico de Canarias.
- TDS: Siglas en ingles de sólidos disueltos totales.
- TRI: Tasa de rentabilidad interna.
- tep: Tonelada equivalente de petróleo.
- OI: Ósmosis inversa.
- PAB: Payback actualizado.
- VAN: Valor actual neto.

6.2. Definiciones

- *Agua de alimentación*: es el agua captada del mar para realizarle el proceso de desalación.

- *Agua producto o permeado*: es el agua desalada después de realizar el proceso de ósmosis inversa.
- *Agua de rechazo o salmuera*: es el residuo que se produce después de realizar el proceso de ósmosis inversa. Su contenido en sales es elevado.
- *Bomba Booster*: encargada de igualar la presión de fluido con la existente en el fluido de alimentación procedente de la bomba de alta presión.
- *Conversión*: es la relación entre el agua producto y el agua de alimentación.
- *Consumo específico*: es el consumo eléctrico de la planta de desalación por metro cúbico producido.
- *Costes de inversión*. Se engloban los costes asociados a los equipos, a la obra civil y a las instalaciones pertinentes. Suelen expresarse en €/kW instalado.
- *Costes de operación y mantenimiento*. Son costes variables asociados a la explotación y al mantenimiento de las instalaciones y de los equipos. Se expresa en €/MWh año.
- *Costes de desmantelación*. Costes asociados al desmantelamiento de las instalaciones al final de la vida útil.
- *Necesidades hídricas*: es la cantidad de agua que se debe aportar a un cultivo para optimizar su desarrollo.
- *Presión osmótica*: la presión que se debe aplicar a una solución para detener el flujo neto de disolvente a través de una membrana semipermeable.

7. Requisitos de diseño

Se describen las bases y datos de partida establecidos por el cliente, la legislación, la reglamentación y la normativa aplicable. Se estudia el entorno socioeconómico y ambiental en el emplazamiento de la EDAM. Si fuese necesario, se describe el desarrollo de los estudios técnicos realizados (análisis químico, análisis topográfico...)

7.1. Requisitos del cliente

El cliente, la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna, establece los siguientes requisitos para el desarrollo del proyecto:

- Proyecto: Realizar una estación desaladora de agua de mar.
- Tecnología: Para llevar a cabo la desalación se debe hacer uso de la ósmosis inversa.
- Abastecimiento: Se debe suministra la energía eléctrica de una fuente renovable.
- Producción: La instalación será considerada de tamaño pequeño o medio. La capacidad de producción se debe ajustar a esta premisa. El valor diario de agua producto se debe relacionar con la demanda requerida, previamente estudiada.
- Emplazamiento: Se debe situar la planta desaladora en una ubicación conveniente. Minimizar el impacto medioambiental como idea principal.
- Legislación: Se debe cumplir con la legislación vigente.

En consideración con las hipótesis descritas se analizan y detallan los requisitos de diseño de este proyecto.

7.2. Situación y emplazamiento

El emplazamiento de la EDAM debe facilitar la captación de los recursos hídricos marinos y minimizar, en la zona, el impacto medioambiental y sociocultural que pueda producir. Además, se debe escoger una ubicación que carezca de recursos hídricos para su abastecimiento. Sin considerar el uso, debe existir una demanda de agua desalada.

Del mismo modo, la posición y orientación del parque eólico debe favorecer el aprovechamiento máximo del recurso eólico. Si bien, no debe infringir la normativa vigente, *Real 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 las Islas Canarias.*

Siguiendo las condiciones expuestas se decide instalar la planta de desalación en el municipio de Alajeró, en la isla de La Gomera. Como se detalló en el apartado 3.2.2 “Recursos hídricos en la isla de La Gomera” la isla colombina cuenta con un recurso hídrico subterráneo admirable. Es capaz de autoabastecer la demanda impuesta por la población. No obstante, el uso agrícola representa, aproximadamente, el 70% del consumo insular.

La zona sur de la isla, más árida y seca, ha sufrido una disminución en la superficie de cultivo. Se relaciona este inconveniente con la escasez de precipitaciones y la mala comunicación con los recursos hídricos del resto de la isla.

Estas han sido las razones que han impulsado el desarrollo del proyecto en esta localidad. Concretamente, la EDAM estará ubicada en la comarca de Playa de Santiago.



Figura 34. Emplazamiento EDAM. Fuente: Google Earth

Dada las escasas dimensiones que tendrá, en comparación con plantas de alta capacidad, se ha decidido ubicar la EDAM en un espacio amplio e inhabilitado produciendo el menor impacto sociocultural y medioambiental posible. En el mismo cause del barranco se encuentra una planta de depuración de agua y una industria de áridos.

La superficie elegida se utilizaba para el plantío de la platanera sin embargo actualmente permanece en abandono. Se muestra en la Figura 35 una imagen representativa del emplazamiento. El área descrita se simboliza con un recuadro amarillo.



Figura 35. Emplazamiento de la parcela en Playa de Santiago. Fuente: Google Earth

Para obtener más información de la parcela se hace uso de Sede Electrónica del Catastro. Consultando la referencia catastral número **38003A001004610000RR** (<https://www1.sedecatastro.gob.es/CYCBienInmueble/OVCConCiud.aspx?del=38&mun=3&UrbRus=R&RefC=38003A001004610000RR&Apenom=&esBice=&RCBice1=&RCBice2=&DenoBice=&from=nuevoVisor>) y número **38003A001004530000RT** (<https://www1.sedecatastro.gob.es/CYCBienInmueble/OVCConCiud.aspx?del=38&mun=3&UrbRus=R&RefC=38003A001004530000RT&Apenom=&esBice=&RCBice1=&RCBice2=&DenoBice=&from=nuevoVisor>) se obtienen los siguientes datos:

- Localización. Polígono 1 Parcela 461 y Parcela 453. Artamache. Alajeró (Santa Cruz de Tenerife).
- Clase: Rústico.
- Uso principal: Agrario.
- Superficie gráfica: 16.463 m² y 6.720 m² (Total: 23183 m²)

Se analiza también la existencia de una planta de desalación ubicada en la zona (la única existente en la isla de uso agrario con una producción de 2000 m³/día). Si bien, no tendrá ninguna influencia en el desarrollo productivo de la EDAM del proyecto dada su lejanía.

Por otro lado, la ubicación del aerogenerador debe reunir las mejores condiciones eólicas de la zona. No obstante, se debe cumplir con la normativa vigente de explotación de aerogeneradores en Canarias.

En el Artículo 29. Distancias de los aerogeneradores a viviendas o a otros aerogeneradores del *Real 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 las Islas Canarias* se describe el siguiente punto:

“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

Respecto a viviendas aisladas la localización de los aerogeneradores deberá asegurar que no se superen en la edificación los 50 dB (A), salvo que la reglamentación vigente establezca niveles máximos de ruido inferiores, en cuyo caso estos, no deberán superarse.” (I.

y C. Consejería de Empleo, DECRETO 6-2015- Instalación y explotación de los Parques Eólicos en Canarias. 2015.)

Para no infringir esta medida se decide ubicar el parque eólico en una zona inhabilitada y aislada. Se muestra en la Figura 36 el recurso eólico existente en la comarca facilitado en el Visor Grafcan. En violeta se representan las velocidades de viento más elevadas. Si se desea profundizar más acerca de las condiciones eólicas y de la justificación del emplazamiento diríjase al Apartado 2 “Estudio del recurso eólico de la zona” existente en el *Anexo IV, Dimensionado del sistema eólico. Abastecimiento de energía eléctrica.*

La referencia catastral de la ubicación elegida es **38036A004000280000IT** (<https://www1.sedecatastro.gob.es/CYCBienInmueble/OVCConCiud.aspx?del=38&mun=36&UrbRus=R&RefC=38036A004000280000IT&Apenom=&esBice=&RCBice1=&RCBice2=&DenoBice=&from=nuevoVisor>)

- Localización. Polígono 4 Parcela 28. Tecina. San Sebastián de La Gomera (Santa Cruz de Tenerife).
- Clase: Rústico.
- Uso principal: Agrario.
- Superficie gráfica: 1.376.160 m²

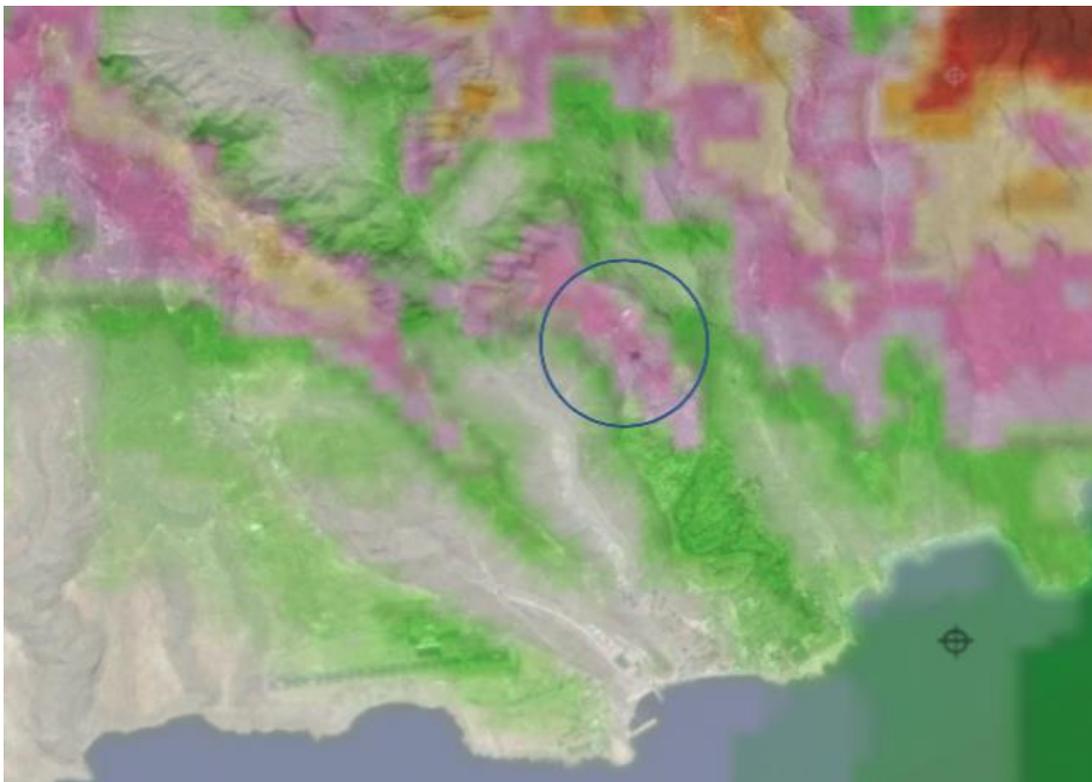


Figura 36. Mapa eólico y emplazamiento del parque eólico. Fuente: Grafcan

7.3. Capacidad de producción

Siguiendo la limitación impuesta por el cliente, la capacidad de producción diaria de la EDAM se debe aproximar a los 2000 m³/día (se sigue como referencia la existente en la zona), no obstante, se realiza un estudio de la demanda de consumo que ajusta este valor a la realidad del municipio.

Se calcula el consumo de agua destinada a regadío siguiendo la metodología especializada. Este se rige por tres aspectos fundamentales: la superficie agrícola a cubrir, las características de cultivo y las condiciones climatológicas de la zona.

Realizando los cálculos pertinentes se obtiene una capacidad de producción de 1500 m³ al día. Sin embargo, se decide realizar una parada de larga duración para reducir los costes de explotación y realizar las tareas de mantenimiento.

Después de considerar varias hipótesis, se determina que, a favor del incremento de las precipitaciones en la época invernal, la parada se programa en los meses de enero, febrero y marzo.

El abastecimiento en los meses de pausa se efectuará gracias al almacenaje de agua en las infraestructuras hídricas existentes. Para satisfacer la demanda a la par que se almacena agua, la producción diaria se debe aumentar hasta los 1850 m³/día.

Si se desea conocer el proceso de desarrollo realizado se recomienda visualizar el *Anexo I, Dimensionado de las necesidades hídricas de los cultivos*. De igual forma, si se pretende conocer el almacenamiento hídrico existentes se aconseja visitar el *Anexo III, Dimensionado de almacenamiento, bombas, tuberías y tratamientos*.

7.4. Propiedades del agua

En este apartado se definen las principales características físicas y químicas del agua de alimentación. Serán de vital importancia en el desarrollo técnico del proceso de desalación. Entre ellas destacan la temperatura del agua,

Del mismo modo, se definen las exigencias que debe poseer el agua producto considerando los cultivos propios de la zona.

7.4.1. *Temperatura de alimentación*

La temperatura del agua influye de manera directa en el proceso de desalación. El elemento más vulnerable es la membrana.

1. La viscosidad del agua se ve afectada por la temperatura. A mayor temperatura menor viscosidad, o, de igual forma, a menor temperatura mayor viscosidad. Estas circunstancias varían la presión de trabajo de las membranas pudiendo aumentar consigo el consumo específico de la planta de desalación.
2. Crecimiento biológico. El aumento de la temperatura favorece el crecimiento biológico y, a raíz, el ensuciamiento prematuro de las membranas. Los costes de pretratamiento y mantenimiento se verían afectados.
3. De igual forma, el aumento de la temperatura beneficia la precipitación de sales y, por consiguiente, el atascamiento de las membranas. Nuevamente los costes de pretratamiento y mantenimiento se verían afectados.

Por ello, la medida de la temperatura de alimentación debe poseer el mínimo error posible. No obstante, al tratarse de una captación mediante toma cerrada inexistente hasta el momento, se deberá realizar una aproximación con la temperatura superficial de mar. Esta, como se visualiza en la Figura 37, presenta a variaciones a lo largo del año. Se representa la temperatura media anual de la última década. Si bien, se debe aclarar que el punto analizado no corresponde con la ubicación de estudio. Aun así, se ha creído correcto interpolar la información obtenida dada la similitud en las condiciones climáticas de ambas zonas.

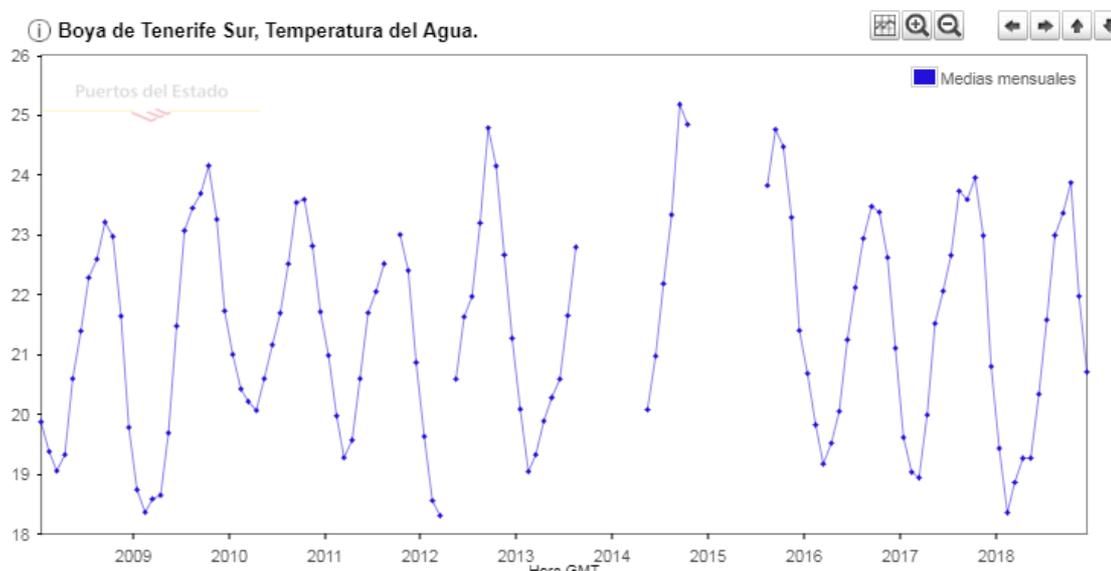


Figura 37. Temperaturas medias mensuales (2008-2018). Fuente: Puertos del Estado

En el apartado 6.2.1 “Temperatura del agua de alimentación” desarrollado en el *Anexo 2, Dimensionado del núcleo de membranas y recuperadores de energía para ósmosis inversa*, se determina, después de realizar una media aritmética, la temperatura media que tendrá el agua de alimentación en los pozos de captación. Tendrá un valor de 21°C y se supondrá constante durante todo el año.

7.5. Propiedades del agua de alimentación

Otro aspecto necesario para el dimensionado del núcleo de membranas es la composición química del agua de mar. Factores como el contenido de sólidos totales disueltos (TDS) o el pH del agua influyen en la selección de la membrana.

Por este motivo se debe realizar un análisis completo de la composición del agua alimentación (agua de mar). Sin embargo, dada la imposibilidad de obtener los resultados mediante el Ayuntamiento del municipio u otras fuentes se decide recabar la información de otros Trabajos Fin de Grado disponibles en el repositorio de la Universidad de La Laguna.

En la gran mayoría se cita un análisis químico efectuado por el laboratorio Labaqua en la EDAM de Santa Cruz de Tenerife. Se estima que las propiedades químicas del agua serán similares a las del puerto de Playa de Santiago.

<i>COMPOSICIÓN QUÍMICA DE AGUA DE MAR</i>	
<i>Iones</i>	<i>mg/L</i>
<i>Sodio</i>	<i>11870</i>
<i>Potasio</i>	<i>451</i>
<i>Magnesio</i>	<i>1470</i>
<i>Calcio</i>	<i>431</i>
<i>Estroncio</i>	<i>10</i>
<i>Bario</i>	<i>0,02</i>
<i>Sulfatos</i>	<i>3148</i>
<i>Fluoruros</i>	<i>0,86</i>
<i>Cloruros</i>	<i>21280</i>
<i>Nitratos</i>	<i>0,70</i>
<i>Bicarbonatos</i>	<i>141,50</i>
<i>Boro</i>	<i>5,23</i>
<i>Bromo</i>	<i>0,50</i>

<i>Sílice</i>	1,10
<i>TDS Calculado</i>	38824
<i>pH</i>	8

Tabla 3. Composición química del agua de mar. Fuente: Laboratorios Labaqua

7.6. Propiedades del agua producto

Del mismo modo, se deben analizar las condiciones químicas del agua producto, cumpliendo con los requisitos necesarios para el correcto desarrollo de la actividad agrícola.

No obstante, el sector agrario no cuenta con una normativa específica que legisle los niveles químicos del agua desalada como se exige, por ejemplo, en el agua de consumo humano (El Real Decreto 140/2003 o el Programa de Vigilancia del Agua de Consumo Humano (PVSACH) de la Comunidad Autónoma de Canarias).

Dado este inconveniente, se cree oportuno hacer uso de la bibliografía especializada en el sector agrícola. Se ilustran los valores estándares que debe poseer el agua producto extraídos del libro Técnicas de Riego redactado por José Luis Fuentes Yagüe.

Salinidad

<i>Conductividad eléctrica</i>	0-3	<i>dS/m</i>
<i>Total de sólidos en disolución</i>	0-2000	<i>mg/l</i>
<i>Calcio</i>	0-20	<i>meq/l</i>
<i>Magnesio</i>	0-5	<i>meq/l</i>
<i>Sodio</i>	0-40	<i>meq/l</i>
<i>Carbonatos</i>	0-0,1	<i>meq/l</i>
<i>Bicarbonatos</i>	0-10	<i>meq/l</i>
<i>Cloruro</i>	0-30	<i>meq/l</i>
<i>Sulfatos</i>	0-20	<i>meq/l</i>

Nutrientes

<i>Nitrógeno (nitrato)</i>	0-10	<i>mg/l</i>
<i>Nitrógeno (amonio)</i>	0-5	<i>mg/l</i>
<i>Fósforo (fosfato)</i>	0-2	<i>mg/l</i>
<i>Potasio</i>	0-2	<i>mg/l</i>

Varios

<i>Boro</i>	0-2	<i>mg/l</i>
<i>pH</i>	6-8,5	
<i>RAS</i>	0-15	

Tabla 4. Valores normales de análisis de agua de riego. Fuente: Técnicas de Riego. José Luis Fuentes Yagüe

8. Análisis de soluciones

En esta sección se analizarán las opciones existentes para dimensionar la planta de desalación.

La información recabada en este apartado ha sido extraída de los diferentes anexos. Si se desea conocer al detalle los procesos de análisis realizados se recomienda visitar los mismos.

1. Anexo I. Dimensionado de las necesidades hídricas de los cultivos.
2. Anexo II. Dimensionado del núcleo de membranas y recuperación de energía para ósmosis inversa.
3. Anexo III. Dimensionado de almacenamiento, bombas, tuberías y tratamientos.
4. Anexo IV. Dimensionado del sistema eólico. Abastecimiento de energía eléctrica.
5. Anexo V. Análisis de coste económico e impacto medioambiental.

En búsqueda de un documento claro y preciso se describirán las alternativas encontradas siguiendo el flujo del agua como criterio. Es decir, se distinguirán los aspectos más relevantes desde la captación hasta la distribución del agua, analizando por último los valores de consumo de la planta.

1. Captación de agua de mar.
2. Pretratamiento fisicoquímico.
3. Equipos de bombeo y bastidor de membranas de ósmosis inversa.
4. Postratamiento de acondicionamiento.
5. Distribución y drenaje de salmuera.
6. Consumo total y consumo específico.

También se hará mención del estudio del sistema de producción de energía. En este caso se analizarán los siguientes puntos.

1. Ubicación del parque eólico.
2. Análisis del recurso eólico.
3. Selección del aerogenerador.
4. Producción anual total.

8.1. Captación del agua de mar

8.1.1. Tipo de toma

Las técnicas de captación se clasifican según la estructura utilizada, pudiendo ser en toma abierta o en toma cerrada. Las diferencias entre ambas se muestran en el apartado 4.3.1. de este mismo documento. Siguiendo las ventajas y desventajas establecidas en la Tabla 2 se concluye que el tipo de toma más apropiado para este proyecto es la cerrada mediante pozos. Se favorece, gracias al proceso de filtrado del terreno, un agua de mayor calidad. A consecuencia, se reduce el coste del pretratamiento. No se producirá una sobreexplotación de los pozos dada la pequeña capacidad productiva de la EDAM.

Otra ventaja que produce este tipo de toma es la estabilización en la temperatura del agua de captación. No obstante, se corre el riesgo de encontrar concentraciones de elementos como el hierro, manganeso, sílice y aluminio.

El programa utilizado para el dimensionado del núcleo de membranas determinó un caudal de alimentación de 4111,11 m³/día. En comparación con las grandes plantas de desalación este valor es significativamente pequeño. Esto se traduce en un menor número de pozos de captación.

Para definir la ubicación, las dimensiones y el número de pozos se requiere un estudio topográfico que determine las condiciones del terreno que se presentan en la zona, sin embargo, no se cuenta con los conocimientos pertinentes para interpretar este tipo de informes. Por ello, se ha decidido interpolar esta información de otras plantas con parámetros de funcionamiento similares a la proyectada.

Analizando la EDAM privada, ubicada en la misma comarca, se decide construir dos pozos de captación. La extracción de agua se hará de forma alternativa para reducir el riesgo de sobreexplotación en los pozos, aumentar la vida útil de los equipos y facilitar las labores de mantenimiento. Es decir, tendremos un pozo de suministro y otro de reserva que irán alternando sus funciones.

El emplazamiento debe ser próximo, tanto a la EDAM como a la costa. Analizando la zona se cree oportuno aprovechar un descampado amplio y en desuso. Se representa en la Figura 38 la ubicación y distribución de los pozos. Referencia catastral nº 38036A005000070000IM

(<https://www1.sedecatastro.gob.es/CYCBienInmueble/OVCConCiud.aspx?UrbRus=R&RefC=38036A005000070000IM&esBice=&RCBice1=&RCBice2=&DenoBice=&from=OVCBusqueda&pest=rc&RCCompleta=38036A005000070000IM&final=&del=38&mun=36>)

- Localización. Polígono 5 Parcela 7. Laguna Santiago. (Santa Cruz de Tenerife).
- Clase: Rústico.
- Uso principal: Agrario.
- Superficie gráfica: 1.635 m²



Figura 38. Ubicación y distribución de los pozos. Fuente: Google Earth

La distribución de los pozos se puede visualizar en la figura anterior. La boca de los pozos se situará a 4,1 metros sobre el nivel del mar y 6 metros para la entrada de la desaladora. Para evitar el trasiego entre ambos se ha considerado una separación de 30 metros.

La profundidad de los pozos será de 40 metros siguiendo como ejemplo el pozo existente en la desaladora privada. Serán provistos de bombas sumergibles conectadas con la desaladora gracias a tuberías verticales y horizontales.

Las bombas, después de estudiar los valores de pleamar y bajamar, se deberán instalar como mínimo a 9,36 metros de profundidad. No obstante, se situarán a 25 metros aprovechando las dimensiones del pozo y asegurando su correcto funcionamiento en todo momento. Serán capaces de impulsar el fluido hasta la planta de desalación.

8.1.2. *Tubería de captación*

Las tuberías se fabricarán del mismo material. Los más utilizados en este tipo de aplicaciones son el polietileno de alta densidad (PEAD) y el poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Aunque ambos materiales cumplen con los requisitos mecánicos se ha decidido utilizar el PRFV porque se ajusta más a las necesidades existentes. Se ha elegido la empresa Ollearis por ser una empresa española con más de 80 años de historia.

En los pozos de captación se diferencian dos tipos de tubería, las horizontales y las verticales. Las primeras, similares para ambos pozos, tendrán una longitud de 25 metros. Por el contrario, la horizontal será de 30 metros, pero únicamente para el pozo más alejado.

Las tomas se conectarán a un colector en forma de T. A partir de este se instala la tubería de alimentación hasta la EDAM. Como se muestra en la Figura 38 tendrá tres tramos y una longitud total de 240 metros.

Los diámetros de todas las tuberías serán iguales (el caudal de trasiego es el mismo). Se ha utilizado el criterio de Bonnet para su cálculo. A partir del resultado se ha seleccionado una tubería con un diámetro inmediatamente superior. En este caso, 250 mm de diámetro.

Además, se han calculado las pérdidas de carga existente en las tuberías y en los accesorios. Han hecho falta para el dimensionado de la bomba de captación.

8.1.3. *Selección de la bomba sumergible*

Si se desea seleccionar una bomba se requieren dos parámetros imprescindibles, el caudal de trasiego y la altura que debe aportar al fluido. Estos valores serán introducidos en las plataformas de selección online de cada fabricante. Después de realizar un balance de energía entre la captación de los pozos y la entrada del bastidor de membranas se obtiene el punto de operación de la bomba ($Q=47,58$ l/s; $H= 49,74$ m).

Consultando fabricantes como KSB, Grundfos, Lowara o Wilo, y utilizando sus herramientas de selección online, se obtienen los siguientes modelos:

<i>BOMBAS DE CAPTACIÓN</i>		
<i>Marca</i>	<i>Modelo</i>	<i>Rendimiento</i>
<i>Wilo</i>	<i>K10 170</i>	<i>84,20%</i>
<i>KSB</i>	<i>UPA 250C 150</i>	<i>79%</i>
<i>Lowara</i>	<i>Z10 275</i>	<i>77%</i>
<i>Grundfos</i>	<i>SP160-3</i>	<i>74,2%</i>

Tabla 5. Selección de bombas de captación. Fuente: Elaboración propia

8.2. Pretratamiento fisicoquímico

Para evitar el deterioro prematuro de las membranas y reducir el coste de mantenimiento de los equipos se decide instalar un sistema de pretratamiento.

El uso de sistemas de captación por toma cerrada mejora significativamente la calidad del agua, reduciendo el coste del sistema de pretratamiento. No obstante, cabe la posibilidad de encontrar concentraciones de elementos que produzcan atascamientos o un deterioro acelerado de las membranas de OI.

Entre el amplio abanico de posibilidades que brinda esta tecnología se decide hacer uso de los siguientes procesos.

1. *Pretratamiento físico*: Se hará uso de filtros. Primero se instalará un filtro de arena capaces de retener partículas de hasta 0,1 mm. Aún así, se requiere de una segunda etapa que reduzca el tamaño de las partículas hasta 5 micras. Se instalará en este caso una batería de filtros de cartuchos con una selectividad de 2 a 5 micras.
2. *Pretratamiento químico*. Además de eliminar las partículas sólidas también se deben reducir ciertos componentes químicos que pueden producir un desgaste avanzado en las membranas. Se instalará un *sistema de dosificación hipoclorito sódico* para evitar la proliferación o crecimiento bacteriano se suele dosificar cloro. También una dosificación de ácido clorhídrico (HCl) para la regulación de pH.

Por último, una acidificación y dosificación de inhibidores de la incrustación. para evitar la precipitación de elementos cálcicos en la superficie de las membranas.

El sistema de pretratamiento, además de evitar la disminución de la efectividad de las membranas, también producen un efecto negativo en la presión del fluido. Siguiendo la bibliografía recomendada y los consejos facilitados por el tutor académico el valor de pérdidas de carga en el sistema de pretratamiento se establece en 2 bar de presión.

8.3. Núcleo de desalación

El núcleo de desalación se compone, fundamentalmente, de cuatro elementos: el bastidor de membranas, el recuperador de energía, la bomba de alta presión y la bomba Booster. Se detallará, punto a punto, el análisis realizado hasta seleccionar cada uno de los equipos instalados. No obstante, no se describirán las características técnicas de las tuberías.

Los valores obtenidos se encuentran desarrollados en los Anexos II y III.

8.3.1. Bastidor de membranas

Las membranas se agrupan en lo que se denomina bastidor de membranas. Esta formado por una serie de tubos portamembranas en los que se alojan las membranas. Para conocer el número de membranas y tubos que se deben almacenar en el bastidor se debe realizar un dimensionado previo. Se utiliza para ello un software informático.

El mercado actual cuenta con un amplio abanico de fabricantes dedicados a las OI. Por ejemplo, LG Water Solutions, Toray, Hydranautics entre muchos. Si bien, la elección de uno de ellos ha seguido una pauta impuesta por el tutor académico, deben existir alternancia entre los compañeros que realizan un proyecto similar al presente.

Analizando las diferentes opciones se ha elegido el fabricante Hydranautics que cuenta con un programa informático para el dimensionado de membranas, IMSDesing.

Para obtener una solución del programa se deben seguir los siguientes pasos:

1. *Introducir los datos de partida.* Se completa la información necesaria para el dimensionado de membranas. En este caso son, la temperatura del agua (21°C), la composición fisicoquímica del agua y el tipo de captación utilizado.
2. *Diseñar el bastidor de membranas.* Se determinan las condiciones de funcionamiento de las membranas. Primero se introduce el número de trenes deseado y se definen sus características técnicas. Entre ellas, *el pH (7), la*

conversión (45%), la producción de permeado (1850 m³/día), edad de la membrana (3,5 años), disminución del flujo por año (5%) y el incremento de paso de sales por año (7%).

Trenes		Paso 1		Paso 1	
pH alimentación			7,00	Producto químico	HCl
Conversión	%		45,00	Concentración de la solución,%	100
Flujo/tren de permeado,	m ³ /d		1850,0	Tasa de dosificación de productos químico	mg/l
Flujo promedio	lmh		16,5	Edad membrana	años
Caudal de alimentación,	m ³ /d		4111,1	Disminución Fluj por año	
Caudal de rechazo	m ³ /d		2261,1	Factor de ensuciamiento	0,831
				Incremento de paso de sales/año, %	7,0

Figura 39. Interfaz de trenes. Fuente: IMSDesing

- Especificación del sistema.** Se debe definir la membrana elegida. El número de tubos y membranas se puede calcular de forma automática o manual. Entre las diferentes posibilidades que brinda el fabricante, se ha realizado un estudio comparativo entre dos tipos de membrana. El modelo SWC4 MAX y el modelo SWC5 MAX. Se han consultado los consumos específicos, las condiciones de funcionamiento y las propiedades del agua producto bajo las mismas condiciones de trabajo para la elección de una de ellas.

Finalmente, se ha determinado la construcción del bastidor de membranas con 19 tubos de presión y 7 membranas, modelo SWC5 MAX, por tubo. La conversión de operación es del 45%. Las concentraciones del agua producto cumplen con las exigencias necesarias.

8.3.2. *Dispositivo de recuperación de energía*

Una reducción en el consumo específico, por mínima que sea, puede suponer un ahorro económico importante. Este ha sido el criterio seguido para la elección del recuperador de energía.

Entre la tecnología existente para esta aplicación se ha seleccionado el intercambiador de presión de tipo rotativo. Posee los mejores parámetros de rendimiento y funcionamiento en comparativa con sus competidores.

Al igual que para casos anteriores, se han investigado diferentes fabricantes para este servicio. Se ha elegido la marca Energy Recovery Inc. Esta compañía proporciona soluciones con una eficiencia notorias que hacen que lideren este sector industrial. No obstante, se ha decidido comparar, bajo las mismas condiciones de funcionamiento, con los recuperadores de energía del fabricante Danfoss.

Ambas empresas facilitan un documento Excel para el dimensionado del recuperador de energía. Introduciendo los valores necesarios, extraídos de IMSDesing, en el interfaz del programa se han obtenido las siguientes conclusiones.

1. Respecto al consumo específico, se establece en 2,17 kWh/m³ para el modelo PX-Q300 de Energy Recovery y 2,26 kWh/m³ para el modelo iSave50 de Danfoss. Ambos estudios utilizaron la membrana SWC5 MAX.
2. Desde otra perspectiva, los rendimientos del recuperador de energía son, aunque de forma escasa, más elevados en el modelo de Energy Recovery Inc. Se tendrá un 98% en el modelo PX-Q300 frente a un 94% en el modelo iSave50.

Por tanto, observando la información recogida con cada uno de los intercambiadores de presión, el modelo que más se ajusta a este proyecto es el PX-Q300 de la empresa Energy Recovery Inc. En este caso se instalarán 2 equipos en el sistema de ósmosis inversa.

PX Technology Performance	
PX unitary flow	47,1 m ³ /hr
Salinity Increase at membranes	2,8%
Volumetric mixing VM	5,9%
Lubrication flow (LF) per PX array	0,9 m ³ /hr
LF as % of concentrate flow	1,0%
HP DP	0,5 bar
LP DP	0,5 bar
RO Specific Energy **	2,17 kWh/m ³
Brine Recovery Efficiency	98,30%
Overall PX Efficiency	97,67%

Figura 40. Parámetros de funcionamiento ERD. Fuente: Energy Recovery Inc

8.3.3. Selección de la bomba de alta presión

Las bombas de alta presión (BAP o HPP), serán las encargadas de aumentar la presión del fluido hasta los niveles máximos del sistema de desalación. A consecuencia, las bombas tendrán un peso bastante significativo en el consumo específico de la planta. La elección se debe hacer de forma razonada priorizando los aspectos técnicos que brinden mejores parámetros de funcionamiento.

De mismo modo que en la captación, se debe conocer el punto de funcionamiento de la bomba. De esta forma, se podrá seleccionar el modelo que mejor se ajuste a los requisitos de diseño. Realizando las operaciones pertinentes se obtiene que la bomba de alta presión debe suministrar un caudal de 78 m³/h y proporcionar al fluido una altura de 575,44 metros.

Después de consultar los diferentes fabricantes, se comprueba que estos no poseen o no disponen en la plataforma de una bomba que permita alcanzar este punto de funcionamiento. En consecuencia, se decide contactar directamente con los mismos, obteniendo respuesta únicamente del fabricante KSB. Esta empresa proporciona el modelo *MultitecROA65/11A-6.1* con una eficiencia del 69,1% y un coste de 72317 €.

8.3.4. Selección de la bomba Booster

La bomba Booster es la encargada de igualar el salto de presión entre el fluido de alta presión y el fluido de recirculación del recuperador de energía. Dado el pequeño impulso que debe suministrar, 1,9 bar, el consumo específico será significativamente menor que para el caso de la BAP. El punto de operación de este equipo se establece en Q= 93,4 m³/h y H=18,8 metros. Los modelos consultados y seleccionados para cada fabricante son los siguientes:

BOMBAS BOOSTER		
Marca	Modelo	Rendimiento
<i>Wilo</i>	<i>MVIE 9501-3</i>	70,93%
<i>KSB</i>	<i>Etaline 80-80-160</i>	78,7%
<i>Lowara</i>	<i>LNEE 80-125</i>	78,83%
<i>Grundfos</i>	<i>NBGE 80-65-125</i>	77,6%

Tabla 6. Selección de bombas Booster. Fuente: Elaboración propia.

8.4. Postratamiento de acondicionamiento

Después de realizar el proceso de desalinización se obtiene el agua producto. El sector agrícola no cuenta con una normativa que restrinja las concentraciones fisicoquímicas en el agua desalada. No obstante, los valores más determinantes suelen ser el boro (0-2 miligramo por litro) y el pH (6-8,5).

La concentración de boro y pH para el agua desalada se establece en 1,491 mg/l y 5,48 respectivamente. Consultando los valores comunes para aguas de regadío, Tabla 4, se determina que el pH se encuentra fuera de los límites. En este caso se debe aumentar. Será el único pretratamiento que se le de al agua dado el uso que tendrá.

Entre los diversos postratamientos existentes se ha elegido la dosificación de un componente químico. El programa de membranas IMSDesing permite introducir el valor deseado de pH y automáticamente el software determinaba la cantidad de compuesto que se debe dosificar. En este caso se selecciona la sosa caustica (NaOH) aumentando hasta 6,77 el nivel de acidez.

El proceso de estabilización del agua producto se hace a la salida del núcleo de membranas. Se deben instalar unos equipos de bombeo que hagan circular el agua para su correcta mezcla en unos depósitos de mezclado.

8.4.1. Selección de la bomba de postratamiento

Siguiendo las consideraciones anteriores, la bomba de postratamiento debe impulsar el fluido para su correcta disolución con los componentes químicos añadidos. En este caso, y al igual que la bomba Booster, el consumo específico representará una minúscula parte del consumo total.

El punto de operación de la bomba de postratamiento es el siguiente: $Q= 77,1 \text{ m}^3/\text{h}$ y $H=19,76$ metros. Los modelos elegidos son los siguientes:

BOMBAS DE POSTRATAMIENTO		
Marca	Modelo	Rendimiento
<i>Wilo</i>	<i>MVIE 9503-3</i>	<i>74,58% %</i>
<i>KSB</i>	<i>Etanorm 100-080-250</i>	<i>78,5%</i>

<i>Lowara</i>	<i>ESHE 80-250</i>	<i>76,5%</i>
<i>Grundfos</i>	<i>NBE 50-125</i>	<i>78,7%</i>

Tabla 7. Selección de bomba de postratamiento. Fuente: Elaboración propia

8.5. Distribución y rechazo de salmuera

Una vez se tiene el agua producto en condiciones de consumo se debe distribuir por la red de abastecimiento. De igual forma, el agua de rechazo o salmuera debe ser desechada hacia el mar para su correcta disolución. Se buscará producir el menor impacto posible en el ecosistema marino.

8.5.1. Distribución de agua producto

En el *Anexo I, Necesidades hídricas de los cultivos*, se determina que dos ubicaciones agrícolas serán provistas de agua. En total, 25,6 hectáreas de cultivo. La primera de ellas requerirá el 35% del agua total. Esta superficie se encuentra en muy próxima a la EDAM. El resto del agua deberá ser enviada a la zona alta del municipio. Se debe alcanzar una cota de 1269 metros. Aparece aquí uno de los grandes desafíos de este proyecto. Aunque ambos estudios presentan las mismas características en el desarrollo, se ha decidido separar en dos bloques la distribución del agua: distribución inferior y distribución superior.

8.5.1.1. Distribución inferior

La superficie de cultivo inferior se ubica en Playa Santiago, junto a la desaladora. Como se mencionó en el punto 7, la parada por tres meses de la EDAM provocará el uso de una infraestructura de almacenamiento. Para evitar asumir un sobrecoste en la construcción de un tanque de grandes dimensiones se ha decidido utilizar las infraestructuras hídricas existentes.

El almacenamiento mínimo inferior debe ser de 32276 metros cúbicos. Analizando los tanques existentes en la zona se consigue un volumen de 19808 m³. A consecuencia, se deberá construir un tanque de 12800 m³ (40x40x8m). No se ha contemplado la obra civil del mismo. Únicamente su ubicación. Después de analizar varias hipótesis se decide construir el tanque a una cota superior. Se trasvasará el agua a este último y posteriormente, por gravedad, se distribuirá al resto de tanques permitiendo, además, el llenado de los mismos. Las bombas elegidas para esta labor son las siguientes (Q=27 m³/h y H=31,63 metros):

BOMBAS DE DISTRIBUCIÓN INFERIOR		
Marca	Modelo	Rendimiento
<i>Wilo</i>	<i>Helix VE3602</i>	<i>71,85%</i>
<i>KSB</i>	<i>Movitec VF060</i>	<i>78,5%</i>
<i>Lowara</i>	<i>LNEE 50-160</i>	<i>62,42%</i>
<i>Grundfos</i>	<i>CRE 20-3</i>	<i>67%</i>

Tabla 8. Selección de bombas de distribución inferior. Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, también hará falta de un pequeño equipo de bombeo para salvar una de las cotas entre tanques. La bomba que mejor prestación tiene es el modelo RESIBOOST MMW09DE de Lowara. Proporciona un rendimiento del 44,65%.

Las tuberías de distribución entre tanques presentan las siguientes dimensiones:

CLASIFICACIÓN DE TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN INFERIOR				
Tubería	Longitud estudio	Diámetro final	Caudal	Altura
Tubería 7-1	<i>65 m</i>	<i>100 mm</i>	<i>16,40</i>	<i>-1,65</i>
Tubería 1-2	<i>150 m</i>	<i>100 mm</i>	<i>13,73</i>	<i>-1,56</i>
Tubería 2-4	<i>85 m</i>	<i>65 mm</i>	<i>3,74</i>	<i>-2,39</i>
Tubería 4-6	<i>115 m</i>	<i>50 mm</i>	<i>2,07</i>	<i>-3,69</i>
Tubería 2-3	<i>80 m</i>	<i>85 mm</i>	<i>6,78</i>	<i>17</i>
Tubería 3-5	<i>85 m</i>	<i>50 mm</i>	<i>1,89</i>	<i>-2,8</i>

Tabla 9. Clasificación de tuberías de la distribución inferior. Fuente: Elaboración propia

El proceso de trasvase y las características estructurales de la distribución se detallan con más profundidad en el *Anexo III, Dimensionado de almacenamiento, bombas, tuberías y tratamientos*.

Se muestra a continuación una imagen ilustrativa de las tuberías y tanques de la distribución inferior.



Figura 41. Distribución inferior. Fuente: Google Earth

8.5.1.2. Distribución superior

Se presenta en este apartado el desafío ingenieril más destacado del proyecto. Se deben bombear $50 \text{ m}^3/\text{h}$ hasta una cota de 1268 metros. A esta altitud se encuentra el almacenamiento superior. Se habla de la presa de Acanabre (conocida también como Canabria), que cuenta con 90000 metros cúbicos de agua, capacidad más que suficiente para el almacenamiento mínimo requerido (59940 m^3). No obstante, no se ha elegido este emplazamiento de forma aleatoria. Esta presa cuenta con una red de tuberías que permite el suministro de agua por todas las superficies agrícolas del casco de Alajeró. Desde hace años en desuso dada la escasez de precipitaciones en la zona y la mala gestión del mantenimiento de la red. Aplicando esta medida se reducen los costes relacionados con la construcción de un nuevo depósito y de una nueva red de tuberías.

El inconveniente de este proceso es el excesivo consumo energético que tendrán los equipos de bombeo. Analizando la orografía, el caudal de trasvase y la distancia entre puntos, se ha decidido realizar el bombeo en dos etapas. La red de tuberías se construirá conjunto a una existente que trasvasa agua potable de municipio en municipio (Proyecto “Anillo Insular”).

El primer bombeo (Tramo 1) irá desde la desaladora hasta una cota de 669 metros. Se construirá, a esa altitud, una pequeña estación que albergue la bomba. La longitud de la tubería

será de 5500 metros y el diámetro de 150 mm. La altura que debe suministrarse al fluido se establece en 696 metros. El caudal por su parte será de 50 m³/h. La única empresa en proporcionar un equipo capaz de cumplir con el objetivo ha sido Lowara. En este caso se hará uso de una bomba axial modelo MPAE65A/13. En pros de su alto coste, presenta un 71,7% de rendimiento.

El segundo bombeo (Tramo 2) se realiza desde la estación de bombeo hasta la presa de Canabria (1268 metros). En total, 6600 metros de tubería. El caudal de trasvase y el diámetro de la tubería serán los mismos. La altura, en este caso, será de 623 metros. De igual forma el modelo MPAE65A/12 de la compañía Lowara será el utilizado.

La siguiente ilustración representa la totalidad de la distribución superior. En azul y en verde el Tramo 1 y 2 respectivamente.



Figura 42. Recorrido distribución superior. Fuente: Google Earth

8.5.2. Rechazo de salmuera

Será el encargado de liberar al medio el material desechable del proceso. Se deberá realizar una instalación que permita una correcta disolución de las sales en el medio submarino y afecte, en la menor medida posible, a la composición química del agua marina de la zona.

Se construirá un emisario submarino con una longitud y una profundidad determinada. Se debe estudiar la orografía del fondo marino. Haciendo uso de la barimetría se puede conocer la profundidad existente en el mar.

Se ha establecido que para una correcta disolución de la salmuera se necesita una longitud de tubería de 558 metros. La profundidad final se establece en 20 metros. Las buenas condiciones marinas (constante movimiento de agua producto de las mareas) permiten acortar las dimensiones del mismo. Siguiendo el criterio de Bonnet, el diámetro de tubería debe ser de 200 milímetros.

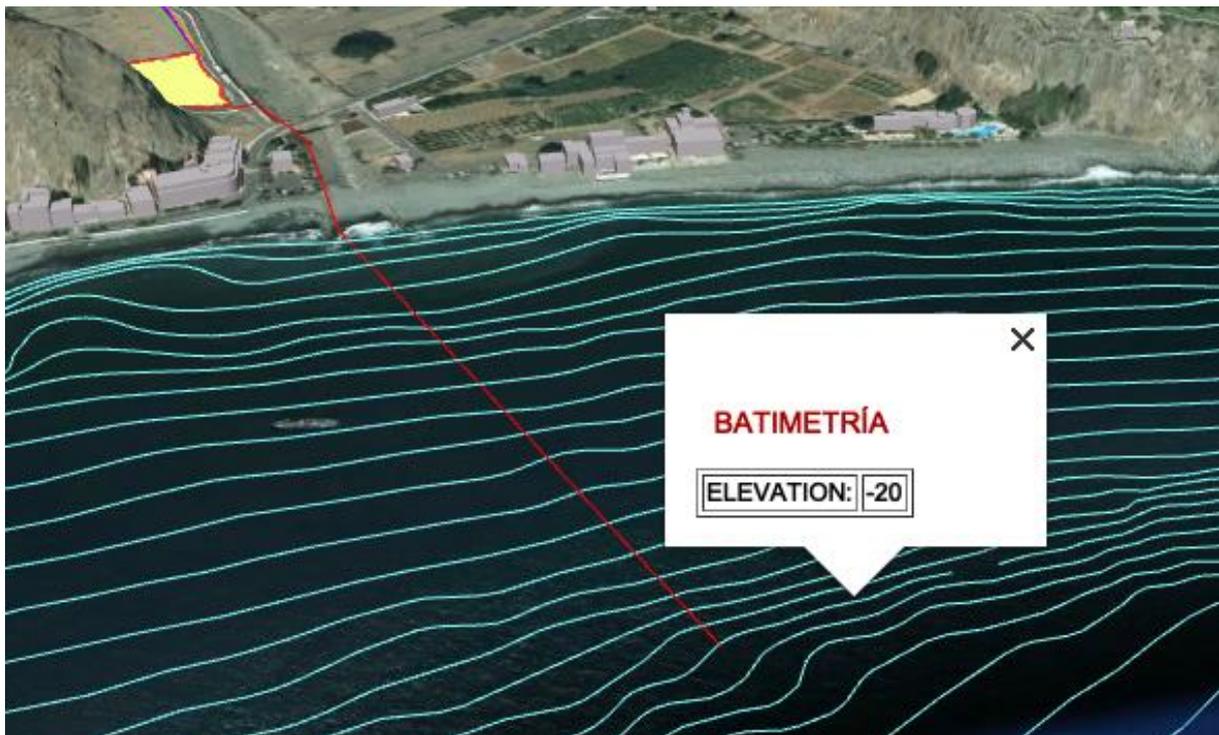


Figura 43. Emisario submarino. Fuente: Google Earth

Después de realizar el balance de energía para determinar la altura de la bomba se obtiene un resultado de -22,86 metros. Este valor se traduce de forma positiva. La diferencia de

cota permite una correcta circulación del fluido por la tubería de rechazo evitando el uso equipo de bombeo en esta aplicación.

8.6. Consumo total y consumo específico

Para calcular la energía mínima que debe producir la fuente renovable se han tenido en cuenta los consumos de las bombas. Se ha obtenido la demanda de tres formas diferentes, a través de la ficha técnica del equipo, con el software informático de membranas y con el software del recuperador de energía.

Se adjunta una tabla resumen con los resultados obtenidos:

<i>CONSUMO TOTAL Y ESPECÍFICO CON PORCENTAJES</i>			
<i>Equipo</i>	<i>Consumo real (kW)</i>	<i>Consumo específico real (kWh/m³)</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Captación</i>	34,60	0,45	7,03%
<i>Total captación</i>	34,60	0,45	7,03%
<i>Alta presión</i>	183,41	2,38	37,27%
<i>Booster</i>	6,07	0,08	1,23%
<i>Total núcleo</i>	189,48	2,46	38,51%
<i>Postratamiento</i>	5,27	0,07	1,07%
<i>Distribución inferior</i>	3,12	0,04	0,63%
<i>Bomba tanque</i>	0,70	0,01	0,14%
<i>Bomba tramo 1</i>	134,30	1,74	27,29%
<i>Bomba tramo 2</i>	124,60	1,62	25,32%
<i>Total distribución</i>	267,99	3,48	54,46%
<i>Total planta</i>	492,068	6,38	100,00%

Tabla 10. Consumo total y específico de desalación. Fuente: Elaboración propia

Se comprueba que la fuente de energía renovable debe producir, como mínimo 492,068 kW/día. El consumo específico de la planta se establece en 6,384 kWh/m³. No obstante, el referido a la desalación de agua se reduce hasta los 2,46 kWh/m³ (se establece dentro de los rangos comunes para este tipo de plantas).

Por el contrario, los equipos de bombeo que mayor consumo presentan son los de distribución superior, 3,48 kWh/m³. Representan el 54,46% del consumo total.

8.7. Sistema de producción de energía

El consumo de la planta de desalación será asumido por una fuente renovable, en este caso, la energía eólica. Se instalará un parque eólico que producirá la energía suficiente para permitir la producción de energía.

Los aspectos analizados para alcanzar el objetivo han sido: la ubicación del parque eólico, el estudio del recurso eólico de la zona y la selección del aerogenerador.

Si se desea obtener una información más detallada de los procedimientos de cálculo se recomienda visualizar el *Anexo IV, Dimensionado del sistema eólico. Abastecimiento de energía.*

8.7.1. Ubicación del parque eólico

Como se determino en uno de los requisitos de diseño (apartado 7.2.1), el parque eólico estará ubicado a las afueras del núcleo poblacional de Playa de Santiago. Dos son las razones de tomar esta decisión. La primera, la legislación vigente. Debe existir una distancia mínima de 400 metros. La segunda, la caracterización del recurso eólico. La ubicación elegida presenta mejores condiciones eólicas para la captación de energía cinética. Para una altura de 80 metros se consiguen velocidades de hasta 8 m/s.

8.7.2. Estudio del recurso eólico

La capacidad de producción de energía de un aerogenerador depende de la curva característica del mismo y de la distribución de la velocidad del viento (distribución de Weibull). Muestra la probabilidad de la velocidad del viento en una zona determinada a lo largo de un año tipo o promedio.

Para determinar esta última se ha hecho uso de la siguiente expresión:

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

Ecuación 1. Ecuación de Weibull

Donde,

- **k**: factor de forma
- **c**: factor de escala (m/s)

- v : velocidad del viento (m/s)
- $f(v)dv$: probabilidad de velocidad de viento en el intervalo $v, v+dv$

Los valores necesarios se han obtenido de la herramienta gráfica Grafcan. Con ayuda de un documento Excel se puede representar la distribución de Weibull del recurso eólico de la zona.

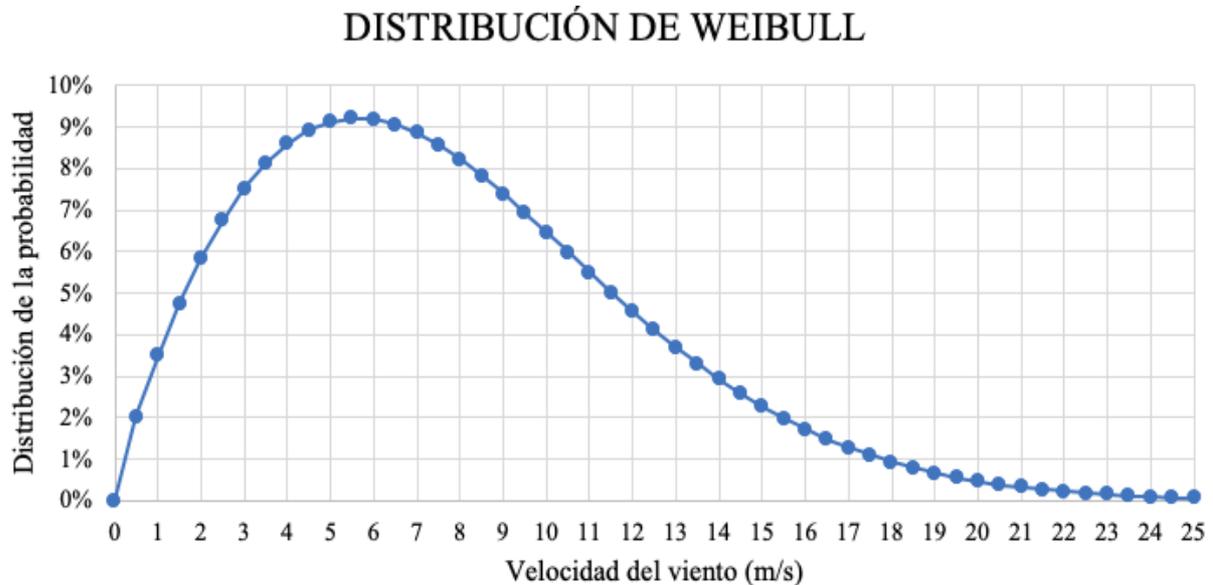


Figura 44. Distribución de Weibull. Fuente: Elaboración propia

El intervalo con mayor probabilidad de viento se encuentra entre 3,5 y 8 m/s siendo 5,5 m/s la más hipotética con una predisposición en la dirección NNE.

8.7.3. Selección del aerogenerador

El aerogenerador elegido debe producir, como mínimo, el consumo anual de la planta. La EDAM consume anualmente (275 días de funcionamiento) 3247 MWh de energía.

La capacidad de producción de un sistema eólico se calcula según la siguiente expresión:

$$P(g) = \int_{v_a}^{v_p} f(v) * P_{AG}(v) dv$$

Ecuación 2. Potencia eólica estimada

Esta expresión define la potencia estimada relacionando la curva característica de potencia del aerogenerador con la curva de distribución de Weibull. Los parámetros que se deben considerar son los siguientes:

- **PG:** Potencia promedio generada (W)
- **$f(v)$:** Distribución de probabilidad de velocidades de viento
- **PAG (v):** Curva de potencia (W)
- **va:** velocidad de arranque (m/s). Será la velocidad de movimiento de las aspas del aerogenerador.
- **vp:** velocidad de parada (m/s). Por seguridad, se establece una velocidad que desconecta el rotor evitando daños en el sistema. Se presenta en condiciones de velocidades de viento muy elevadas.

Sin embargo, en el estudio se ha hecho uso de un recurso informático, disponible en la web del ITC, que estima el valor de la producción de energía de forma automática.

El programa calcula de forma automática la producción de energía estimada y abre una ventana informativa con los valores obtenidos.

Para obtener el valor estimado de energía producida por un aerogenerador se deben seguir los siguientes pasos.

1. *Introducir las coordenadas UTM de la ubicación del aerogenerador.* En este caso, con la ayuda del visor Grafcan, *la posición X es 283650 mientras que la posición Y es 3105050.*
2. *Seleccionar el aerogenerador.* Se han estudiado los aerogeneradores que se encuentran disponibles actualmente y que no superan una potencia máxima de 1500 kW.
3. *Determinar la altura de estudio.* El primer dimensionado se realiza a 80 metros de altitud. Sin embargo, una vez seleccionado el aerogenerador se reajusta el valor a la altura de la góndola.

La siguiente tabla muestra los valores obtenidos de potencia estimada para cada aerogenerador.

POTENCIA ESTIMADA				
Fabricante	Modelo	Energía estimada	Potencia media anual	Horas anuales equivalentes
DEWIND	<i>D4 46</i>	<i>2.030 MWh</i>	<i>231,77 kW</i>	<i>3383,8</i>
DEWIND	<i>D6 60</i>	<i>3.752 MWh</i>	<i>428,332 kW</i>	<i>3001,8</i>

DEWIND	<i>D6 62</i>	<i>3.897 MWh</i>	<i>444,885 kW</i>	<i>3117,8</i>
ENECORN	<i>E 44</i>	<i>2.690 MWh</i>	<i>307,139 kW</i>	<i>2989,5</i>
ENECORN	<i>E 48</i>	<i>2.850 MWh</i>	<i>325,358 kW</i>	<i>3562,7</i>

Tabla 11. Potencia estimada aerogenerador. Fuente: Elaboración propia a partir de datos ITC

El aerogenerador elegido es el modelo Dewind D6 62. Estableciendo en 66 metros la altura del aerogenerador, se genera una energía estimada de 3.881 MWh, una potencia anual de 443,1 kW y mantiene su producción durante 3105 horas anuales. El balance de energía, entre la producción estimada anual y el consumo de la planta de desalación brinda un exceso del 16%. El factor de carga (relaciona la energía generada por el aerogenerador durante un tiempo determinado y la energía generada si hubiese trabajado a plena carga ese mismo tiempo) es del 36%, dentro del rango común para los aerogeneradores.

El exceso energético producido será vendido a la red eléctrica según el *Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos*.

8.8. Análisis de coste económico e impacto medioambiental

La posible implantación de un proyecto de esta dimensión pasa, entre otros factores, por el coste económico de inversión.

Se ha realizado un estudio del capital de inversión inicial y de rentabilidad económica. Además, se ha valorado el impacto medioambiental que producen los equipos.

8.8.1. Viabilidad económica

Para conocer si un proyecto es viable económicamente, el capital de inversión se debe recuperar durante la vida útil de los equipos. Se requieren tres factores que determinan este aspecto: el coste de inversión, los costes variables y los costes de desmantelación.

Siguiendo la bibliografía estudiada se desarrolla un breve estudio sobre la viabilidad económica del aerogenerador y de la EDAM. Si se desea conocer más acerca de las operaciones realizadas se recomienda visualizar el *Anexo V, Análisis de coste económico e impacto medioambiental*.

- *Coste de inversión.* En el caso del aerogenerador, el coste de inversión de esta tecnología ha sufrido una reducción con el paso de los años. Actualmente, la instalación de 1 MW de potencia eólica se establece entre 900 y 1100 €/kW. El modelo elegido, Dewind D6/1250 kW contempla una inversión de 1.250.000 €. Por otro lado, el coste fijo de la EDAM se ha calculado siguiendo el precio de compra de los equipos. En total, se requiere de un desembolso de 517.860,18 €.
- *Costes variables.* Están relacionados con el coste de operación y mantenimiento. Los valores orientativos se sitúan entre 10 y 20 €/MWh. Se ha establecido 20 €/MWh en este estudio. De igual forma, el coste anual de producción de la EDAM se sitúa en 625.172,39 € (1,23 €/m³).

Considerando estos valores y utilizando como herramienta de apoyo el Ejemplo 11.7 del libro, Ingeniería de la Energía Eólica se define la rentabilidad económica del proyecto (Villarrubia López M., “Aspectos económicos y medioambientales” en Ingeniería de la Energía Eólica, Barcelona, Marcombo S.A., Primera Edición, 2012, 272-273):

- *Rentabilidad aerogenerador.* Suponiendo un precio de venta de la energía producida (125 €/MWh), la inversión del aerogenerador se recupera en 3,5 años. El beneficio final se establece en 4.838.030,08 €. Un 387% respecto al capital invertido en el inicio.
- *Rentabilidad desaladora.* Si el precio de venta del agua desalada se establece en 1,3 €/m³, la inversión se recupera en 19,5 años. Casi al final de la vida útil de la EDAM. Se deben correr más riesgos sobre la inversión. La Tasa de Rentabilidad se sitúa en un 7% aproximadamente.
- *Rentabilidad conjunta.* Si se combinan ambas tecnologías, el coste de venta del agua desalada se puede reducir hasta 0,66 €/m³, siendo más atractivo para el usuario. No obstante, la rentabilidad y el beneficio final se ven afectados, 17 años y 74.575,45 € respectivamente.

8.8.2. Aspectos medioambientales

Se han relatado las ventajas y desventajas de usar este tipo de tecnologías. Sin embargo, se ha decidido realizar una comparación entre los sistemas de producción de energía existentes en la isla de La Gomera. Se estudia el ahorro de combustible fósil y la reducción de gases contaminantes a la atmósfera.

La energía eléctrica de la isla se obtiene gracias a la central diésel de El Palmar. Considerando un rendimiento del 33%, cada tonelada de gasóleo produce 13,02 MWh.

Multiplicando estos valores por la potencia producida por el aerogenerador se obtiene el ahorro de combustibles fósiles por parte del aerogenerador.

$$\text{Producción de 1 MWh} = \frac{1 \text{ MWh}}{0,33} * \frac{1 \text{ tep}}{13,02 \text{ MWh}} = 0,218 \text{ tep}$$

$$\text{Ahorro anual} = 3117,8 \left(\frac{\text{MWh}}{\text{MW}} \right) * \frac{0,218 \text{ tep}}{\text{MWh}} = 679,60 \frac{\text{tep}}{\text{MW}}$$

Para una potencia instalada de 1,25 MW, el aerogenerador produce un ahorro anual de 850 toneladas equivalentes de petróleo.

Por otro lado, los gases que dejan de emitirse cuando se usa la energía eólica se calculan en función del indicador específico de emisión (t/MWh). Considerando los valores publicados por Endesa para la central de El Palmar, la instalación de un aerogenerador con estas características produce las siguientes reducciones:

- El ahorro de dióxido de carbono (CO₂) se establece en 2673,51 t/MWh.
- Para dióxido de azufre (SO₂) se reducen 177,74 t/MWh de emisiones.
- Las emisiones de óxidos de nitrógeno se reducen en 84,80 t/MWh.

9. Resultados finales

Para finalizar, se detallarán las medidas adoptadas para el desarrollo de la planta de desalación por ósmosis inversa. El suministro de energía eléctrica será a través de una fuente renovable.

Todos los valores obtenidos se han desarrollado en los Anexos del proyecto. La estructuración de este documento seguirá el orden establecido en los mismos.

9.1. Ubicación y capacidad de producción

La EDAM estará ubicada en la isla de La Gomera. Más concretamente al sur de la misma. Se situará en la comarca de Playa de Santiago, municipio de Alajeró, en un lugar estratégico para la captación y la distribución del agua.

La capacidad de producción se establece en 1850 m³/día. El agua desalada servirá de abastecimiento a los cultivos agrícolas del municipio y a una pequeña superficie colindante con la desaladora. En total, 25,6 hectáreas podrán beneficiarse del suministro hídrico.

9.2. Sistema de captación

La captación del agua de alimentación se realiza mediante toma cerrada. La construcción de dos pozos de 40 metros de profundidad permite obtener un agua con óptimas condiciones fisicoquímicas. Existirán 30 metros de separación entre ambos.

El proceso de extracción será alterno. Mientras se capta agua de un pozo el otro permanece de reserva. Se aumenta la vida útil de los equipos y se reduce la sobreexplotación de los pozos. En el interior de cada perforación se instalará una bomba sumergible del fabricante Wilo modelo K10 170 con un rendimiento del 84,20%.

Este equipo hará posible la distribución del agua desde el pozo hasta la planta de desalación. Para ello se necesitarán 270 metros de tubería con un diámetro de 250 mm. El material elegido será PRFV. Su suministro vendrá a cargo de la empresa Ollearis.

9.3. Pretratamiento fisicoquímico

Con el fin de acondicionar el agua de alimentación se instalará un sistema de pretratamiento. Este puede diferenciarse, según el tipo de tecnología, en físico o químico. En el primer caso, se instalará un filtro de arena y una batería de filtros de cartuchos. Por el contrario, el pretratamiento constará un sistema de dosificación hipoclorito sódico para evitar la proliferación o crecimiento bacteriano. También, una dosificación de ácido clorhídrico (HCl) para la regulación del pH y por último una dosificación de inhibidores de la incrustación para evitar la precipitación de elementos cálcicos en la superficie de las membranas.

9.4. Núcleo de desalación

9.4.1. Bastidor de membranas

La capacidad de producción de la planta requiere de un bastidor de membranas compuesto por 19 tubos de presión. Cada uno de estos estará provisto de 7 membranas de arrollamiento espiral. El modelo elegido es el SWC5 MAX de la empresa Hydranautics. En total, 133 membranas serán capaces de desalar agua con un 45% de conversión.

9.4.2. Dispositivo de recuperación de energía

Para reducir el consumo de la planta de desalación y, después de haber estudiado las diferentes posibilidades, se ha decidido instalar un intercambiador de presión. En este caso, el fabricante Energy Recovery proporcionará el modelo PX-Q300 para su implantación en el núcleo de membranas. Se requerirán dos equipos dada la capacidad de la planta.

9.4.3. Bomba de alta presión

Para elevar la presión del fluido de alimentación hasta la requerida por las membranas se ha elegido el modelo Multitec RO A65 del fabricante KSB. El consumo real del equipo se establece en 183,41 kW. Proporciona un rendimiento del 69,1% y tiene un coste de 72.317 €.

9.4.4. Bomba Booster

Entre los diferentes modelos estudiados, se ha decidido seleccionar el fabricante KSB y su modelo Etaline 80-80-160. Suministra un rendimiento del 78,7% para el punto de funcionamiento analizado. El consumo real se sitúa en 6,07 kW.

9.5. Postratamiento de acondicionamiento

Con el fin de producir un permeado con unas propiedades fisicoquímicas idóneas para el uso agrícola se ha decidido instalar un sistema de postratamiento. Se dispondrá de una dosificación de sosa caustica (NaOH). Se consigue un valor de acidez de 6,77. Para permitir una correcta disolución se requiere de una bomba de pequeñas dimensiones. Se instalará el modelo NBE 50-125 de la compañía Grundfos. Presenta un rendimiento del 78,7%.

9.6. Sistema de distribución

9.6.1. Distribución inferior

La distribución de agua inferior (35% de la producción total) se realiza a una serie de infraestructuras hídricas cercanas a la EDAM. En total se consigue una capacidad de almacenamiento de 19808 m³, si bien, se requiere la construcción de un depósito abierto con capacidad de 12800 m³. Se trasvasa agua hasta el nuevo depósito (mayor cota) y por gravedad se distribuye por los tanques mencionados. Para posibilitar esta acción se requiere de una bomba de distribución, modelo Movitec VF060 de la compañía KSB (78,5% de rendimiento). Para salvar la altura entre dos tanques se necesita un pequeño equipo de bombeo, modelo Resiboost MMW09DE del fabricante Lowara (44,65%).

La tubería de distribución será de PRFV y contará con diferentes diámetros y longitudes dada la variación de caudales.

CLASIFICACIÓN DE TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN INFERIOR			
Tubería	Longitud estudio	Diámetro final	Caudal
Tubería 7-1	65 m	100 mm	16,40
Tubería 1-2	150 m	100 mm	13,73
Tubería 2-4	85 m	65 mm	3,74
Tubería 4-6	115 m	50 mm	2,07
Tubería 2-3	80 m	85 mm	6,78
Tubería 3-5	85 m	50 mm	1,89

Tabla 12. Tuberías de distribución inferior. Fuente: Elaboración propia

9.6.2. Distribución superior

La distribución superior trasvasará el agua restante (65% de la producción total) a la zona alta del municipio. Lo hará hasta la presa de Canabria (1268 metros de altitud) que cuenta con 90000 m³ de capacidad.

El recorrido de la tubería se ha diferenciado en dos tramos, separados por la instalación de una estación de bombeo intermedia. Será necesaria para salvar la orografía y la diferencia de cotas existente.

El primer tramo (desaladora – estación de bombeo) contará con 5500 metros de tubería y un diámetro de 150 mm. La bomba elegida para trasvasar el agua esta distancia es el modelo MPA E65A/13 del fabricante Lowara. Será una bomba de tipo axial con un rendimiento del 71,7%.

Por otro lado, el Tramo 2 (estación de bombeo – presa de Canabria) tendrá una longitud de 6600 metros y un diámetro de 150 mm. De igual forma, el modelo MPAE65A/12 de la compañía Lowara será el utilizado. No obstante, proporciona un rendimiento 3 decimas superior (72%).

9.7. Sistema de rechazo

El sistema de rechazo no requerirá de un equipo de bombeo. La diferencia de cota favorece el trasvase por gravedad. Instalando un emisario submarino de 558 metros de longitud a una profundidad final de 20 metros se posibilita una correcta disolución de la salmuera. Esta tubería será de PRFV y tendrá un diámetro de 200 mm.

9.8. Sistema de producción de energía

El sistema de producción de energía eléctrica que satisfaga el consumo de la EDAM será una fuente renovable. En este caso se instalará un aerogenerador modelo D6 62 de 1250 kW de potencia. Este equipo pertenece al fabricante Dewind. Para una altura de góndola de 66 metros será capaz de producir, de forma estimada, una energía anual de 3.881 MWh. Con este valor se supera el consumo anual de la EDAM, no obstante, existirán periodos de producción que requieran un aporte de red local. Por tanto, el suministro de la desaladora será de tipo mixto.

El exceso energético (16% de la producción total) será vendido a la compañía eléctrica pertinente. Si bien, se han estudiado otras alternativas interesantes:

- Bombeo de agua en altura.
- Estación de carga para vehículos eléctricos.
- Almacenamiento de energía.

9.9. Análisis de coste económico e impacto medioambiental

Para finalizar, después de realizar un estudio de coste económico e impacto medioambiental se obtiene las siguientes deducciones.

9.9.1. Aspectos económicos

El sistema eólico requiere de un capital de inversión de 1.250.000 €. Por el contrario, el desembolso de la EDAD se establece en 517.860,18 €.

El aerogenerador, transcurrida su vida útil, ofrece un beneficio final de 4.838.030,08 € y una rentabilidad notoria. Por el contrario, la planta de desalación únicamente logra un beneficio final de 12.839,13 € y la recuperación del capital de inversión se sitúa en los últimos años de vida útil. Se deben asumir ciertos riesgos económicos si se establece el precio de venta del m³ en 1,3 €.

No obstante, unificando ambas instalaciones se consiguen mejores resultados. Se reduce el precio de venta del metro cúbico de agua con un *coste mínimo de 0,66 €/m³* pero se empeora el beneficio económico final. El sector de la empresa ejecutará, público o privado, determinará las condiciones finales de explotación siguiendo su filosofía de trabajo.

9.9.2. Aspectos medioambientales

Con la instalación de una fuente renovable de 1,25 MW, se consigue un ahorro anual de 850 toneladas equivalentes de petróleo en la central diésel de la isla. Considerando el precio actual del barril, se traduce un ahorro económico anual de 337.679,09 €.

Por el contrario, se evita la emisión de las siguientes cantidades de gases contaminantes:

- El ahorro de dióxido de carbono (CO₂) se establece en 2673,51 t/MWh.
- Para dióxido de azufre (SO₂) se reducen 177,74 t/MWh de emisiones.
- Las emisiones de óxidos de nitrógeno se reducen en 84,80 t/MWh.

10. Conclusiones

El desarrollo de un estudio de estas características se puede enmarcar en dos vertientes significativas, la académica y la técnico-profesional.

En primera instancia, la elaboración de este proyecto ha exigido una serie de conocimientos técnicos. Estos se han adquirido a lo largo del Grado de Ingeniería Mecánica, aunque el mayor peso del trabajo (cálculo y análisis) ha sido competencia de asignaturas como Organización y Gestión Empresarial, Ingeniería Fluidomecánica, Instalaciones y Máquinas Hidráulicas u Oficina Técnica y Proyectos.

No obstante, con la realización de este proyecto también se han adquirido nuevos conocimientos y competencias. Es el caso de las energías renovables o el uso de la desalación de agua de mar que habían sido, técnicamente, desconocidos hasta este momento.

Por otro lado, en el ámbito técnico-profesional, el desarrollo de este proyecto ha minimizado, en cierta medida, uno de los principales problemas que sufre el archipiélago canario, la disminución de los recursos hídricos de sus islas.

Con el diseño de una instalación por ósmosis inversa alimentada por energías renovables se podrá abastecer de agua desalada al sector agrícola del municipio de Alajeró, gravemente perjudicado por la escasez de precipitaciones en la zona.

Tecnológicamente se han conocido los equipos y las instalaciones que posibilitan el proceso de desalación, así como los elevados costes de operación que presentan, principalmente relacionados con la notoria demanda energética.

En búsqueda de ahorro económico, se han comenzado a enlazar las técnicas de desalación con un suministro energético renovable. Las Islas Canarias cuentan, además, con grandes condiciones para la aplicación de esta combinación tecnológica.

Las energías renovables han pasado a jugar un papel fundamental en el desarrollo energético de las islas. Más si se tiene en cuenta que la mayor parte de la energía que abastece a la población proviene de una fuente no renovable (derivados del petróleo).

Por ello, se cree oportuno que combinando la tecnología de desalación con un abastecimiento mediante energías renovables se puede reducir el impacto sociocultural y medioambiental de esta técnica.

10.1. Conclusions

The development of a study of these characteristics can be framed in two significant tracks, the academic and the technical-professional.

In the first place, the elaboration of this project has required a series of technical knowledge. This knowledge was acquired along the Bachelor of Mechanical Engineering, although the major weight of the project (calculation and analysis) has been an outcome of courses such as Business Organisation and Management, Fluid Mechanics Engineering, Installation and Hydraulic Machinery and Technical and Project Offices.

However, with the completion of this project, new knowledge and competences were also acquired. This is the case of renewable energies or the use of the desalination of sea water which had been, technically, unknown until this moment.

On the other hand, in the technical-professional area, the development of this project has minimized, to some extent, one of the major issues that the Canarian Archipelago is facing, the reduction of the hydrological resources of its islands.

The design of an inverse osmosis installation, fed by renewable energies, could equip the agricultural sector of the locality of Alajeró, gravely affected by the scarcity of precipitation, with desalinated water

Technologically, the machinery and the installations that allow the salination process has been known, as well as the high operational cost that they signify, mainly related with the important energetic demand.

In the search of economic savings, the desalination techniques have started to be connected with a renewable energetic supply. The Canary Islands have, in addition, great conditions for the application of this technological combination.

Renewable energies have come to play a fundamental role in the energetical development of the islands. Specially if it is considered that most of the energy that provide the population originates from a non-renewable energy (petrol derivatives).

For this reason, it is proper to believe that combining the desalination technology with a provisioning through renewable energies, the sociocultural and environmental impact of this technique could be reduced.

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA,
TITULACIONES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

ANEXO I

DIMENSIONADO DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

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

AUTOR: Alberto Meneses Moreno

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE ANEXO I

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MÉTODO DE CÁLCULO	1
2.1. MÉTODO BLANEY-CRIDDLE	1
2.2. MÉTODO ICIA.....	6
3. ANÁLISIS DEL TERRENO	8
4. CONSUMO DIARIO	10
4.1. CONSUMO MÉTODO BLANEY-CRIDDLE	10
4.2. CONSUMO MÉTODO ICIA.....	11
4.3. COMPARACIÓN.....	12
5. PRODUCCIÓN DIARIA	13
6. CONCLUSIONES	16

ÍNDICE TABLAS ANEXO I

Tabla 1. 1 Situación geográfica. Fuente: Wikipedia	2
Tabla 1. 2. Temperatura media. Fuente: Elaboración propia	3
Tabla 1. 3. Horas de luz por día. Fuente: Técnicas de Riego, José Luis Fuentes Yagüe	4
Tabla 1. 4. Evapotranspiración. Fuente: Elaboración propia	4
Tabla 1. 5. Coeficientes de cultivos. Fuente: Técnicas de riego. José Luis Fuentes Yagüe.	5
Tabla 1. 6. Evapotranspiración. Fuente: Elaboración propia	5
Tabla 1. 7. Caudal de agua. Fuente: Elaboración propia.....	6
Tabla 1. 8. Evapotranspiración mensual. Fuente: eportal.mapama.gob.es.....	7
Tabla 1. 9. Precipitación mensual. Fuente: eportal.mapama.gob.es.....	7
Tabla 1. 10. Consumo diario. Fuente: Elaboración propia.....	8
Tabla 1. 11. Mapa de cultivo. Fuente: Gobierno de Canarias	9
Tabla 1. 12. Consumo diario según Blaney-Criddle. Fuente: Elaboración propia.....	10
Tabla 1. 13. Consumo medio diario. Fuente: Elaboración propia.....	11
Tabla 1. 14. Consumo diario. Fuente: Elaboración propia.....	11
Tabla 1. 15. Consumo medio. Fuente: Elaboración propia	12
Tabla 1. 16. Consumo medio estimado. Fuente: Elaboración propia.....	12
Tabla 1. 17. Consumo medio final. Fuente: Elaboración propia.....	12
Tabla 1. 18. Producción estimada. Fuente: Elaboración propia	14
Tabla 1. 19. Producción final diaria. Fuente: Elaboración propia.....	14
Tabla 1. 20. Necesidades hídricas y almacenamiento. Fuente: Elaboración propia.....	15

ÍNDICE FIGURAS ANEXO I

Figura 1. 1 Temperaturas máximas y mínimas. Fuente: eportal.mapama.gob.es	3
Figura 1. 2. Coeficiente de cultivo. Fuente: Agrocabildo	8
Figura 1. 3. Superficie de cultivo. Fuente: Granfcan	9
Figura 1. 4. Gráfica de precipitaciones anuales (2008-2018). Fuente: eportal.mapama.gob.es.....	14

1. Introducción

Uno de los factores que determinan el desarrollo de un cultivo es la humedad del suelo. Es trabajo del agricultor mantener estos niveles en unos rangos de humedad considerados. Sin embargo, el ingeniero puede encontrar una labor característica en este campo. Calcular y aportar el suministro de agua necesario al agricultor para el correcto desarrollo de su tarea.

En este anexo se llevará a cabo el dimensionamiento de las necesidades hídricas de los cultivos. Se calculará el consumo de agua destinada a regadío siguiendo la metodología especializada.

Se realizará un estudio superficial para determinar las hectáreas de terreno que están destinadas a cultivo en el municipio de Alajeró.

Los resultados obtenidos tendrán una relación directa con los aspectos de funcionamiento de la planta de desalación.

2. Método de cálculo

Para mantener el suelo en sus condiciones óptimas se debe cumplir una ecuación básica. El agua de aporte, tanto de riego o lluvia, debe ser igual a la pérdida de agua por evapotranspiración o por filtración a superficies inferiores del terreno. Se conoce como evapotranspiración a la cantidad de agua transpirada por el cultivo y evaporada desde la superficie del suelo en donde se asienta el cultivo. Siguiendo esta consideración, se calcula el volumen de agua necesario por dos métodos diferentes.

2.1. Método Blaney-Criddle

Para determinar la necesidad hídrica del cultivo se apoyará la metodología seguida por el ingeniero agrónomo, don José Luis Fuentes Yagüe en el libro *Técnicas de Riego*, publicado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Se muestran diversas maneras de calcular el consumo diario que requiere una gran variedad de flora, sin embargo, dada la escasa experiencia en el tema, se limitará a interpolar, de manera orientativa, un ejemplo resuelto por el autor. (José Luis Fuentes Yagüe, “Necesidades hídricas de los cultivos” en *Técnicas de Riego*, Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi-Prensa, 1996, 45-69).

Para obtener el valor de consumo diario, se seguirá el método de Blaney-Criddle. El proceso consiste en:

1. Determinar los coeficientes que guardan relación directa con las condiciones climáticas de la zona.
2. Calcular el coeficiente de evapotranspiración de referencia (ET_o).
3. Concretar el tipo de cultivo a estudiar. Se define el coeficiente de cultivo (K_c) que expresa la variación de la capacidad de la planta para extraer agua del suelo durante su periodo vegetativo. Este último refleja la duración aproximada de las etapas en el ciclo vegetativo de los cultivos. Generalmente se divide en cuatro etapas, siendo la tercera fase la que presenta un mayor índice de cultivo, por tanto, será la etapa de consumo más considerable.
4. Determinar el coeficiente de evapotranspiración de un cultivo determinado (ET) siguiendo una expresión matemática que relaciona los factores descritos en los puntos 2 y 3.

Siguiendo el método descrito anteriormente, se requieren una serie de datos para el cálculo de la evapotranspiración de un cultivo:

1. **Fecha de estudio:** Se realizará un estudio anual de los requerimientos hídricos de cada mes. Así se podrán analizar los meses de mayor consumo de agua.
2. **Duración del periodo vegetativo en la localidad donde se cultiva:** Se debe especificar el tipo de cultivo a estudiar. Se elige un sembrado de papas al ser el más cultivado en la región. No obstante, el consumo no dista demasiado de otros tipos de plantíos, por ejemplo, lechugas, zanahorias o incluso árboles frutales. El periodo vegetativo de la papa, según los datos facilitados en la bibliografía, es de aproximadamente de unos cinco meses existiendo diferentes épocas de siembra. Se estudiará en las condiciones más extremas, de mayo a agosto, debido a la escasez de precipitaciones.
3. **Situación:** Se muestra en la Tabla 1.1. la situación geográfica del municipio.

<i>SITUACIÓN GEOGRÁFICA MUNICIPIO DE ALAJERÓ</i>	
<i>Longitud</i>	<i>17 grados Oeste</i>
<i>Latitud</i>	<i>28 grados Norte</i>

Tabla 1. 1 Situación geográfica. Fuente: Wikipedia

4. Las temperaturas máximas y mínimas, expresadas en grados centígrados, en la ubicación del cultivo:

Para obtener las temperaturas máximas y mínimas se visita la Agencia Estatal de Meteorología-AEMET, sin embargo, no se facilitan históricos del municipio de Alajeró. Se decide interpolar los valores de la estación meteorológica del municipio de San Sebastián de La Gomera, de la web *Mapama, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación*. La época estival es más significativa en el consumo de agua. Los valores representan el año 2018.

Mes	Nº Días	Temp Max (°C)	Temp Min (°C)
1	31	28,30	13,41
2	28	25,43	11,77
3	31	28,62	14,00
4	30	29,87	13,80
5	31	26,33	16,08
6	30	29,02	17,00
7	31	36,47	19,43
8	31	34,83	19,37
9	30	35,23	19,89
10	31	30,44	16,87
11	30	26,13	13,87
12	31	28,76	14,00

Figura 1. 1 Temperaturas máximas y mínimas.
Fuente: eportal.mapama.gob.es

Determinados los parámetros característicos se desarrolla el procedimiento de cálculo.

1. Cálculo de ETo (evapotranspiración de referencia).

Se parte de la fórmula de Blaney-Criddle:

$$f = ETo = p(0,46t + 8,13)$$

Donde:

- *t* es la temperatura media mensual.
- *p* son las horas de luz por día expresadas como porcentajes del total anual.

Se obtienen los valores de temperatura media de los datos de la figura 1.1.

TEMPERATURA MEDIA			
Mes	Grados centígrados	Mes	Grados centígrados
Enero	18,40	Julio	23,56
Febrero	17,33	Agosto	24,70
Marzo	18,96	Septiembre	24,86
Abril	19,01	Octubre	22,67
Mayo	19,54	Noviembre	20,05
Junio	21,58	Diciembre	19,96

Tabla 1. 2. Temperatura media. Fuente: Elaboración propia

El valor de las horas de luz se obtiene en función de la latitud de la zona de estudio. Siguiendo la Tabla 1.1., se extraen los datos establecidos en la bibliografía recomendada para dicha latitud.

<i>HORAS DE LUZ POR DÍA EN PORCENTAJE ANUAL (p)</i>	
<i>Mes</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Enero</i>	0,24
<i>Febrero</i>	0,25
<i>Marzo</i>	0,27
<i>Abril</i>	0,29
<i>Mayo</i>	0,31
<i>Junio</i>	0,32
<i>Julio</i>	0,31
<i>Agosto</i>	0,30
<i>Septiembre</i>	0,28
<i>Octubre</i>	0,26
<i>Noviembre</i>	0,24
<i>Diciembre</i>	0,23

Tabla 1. 3. Horas de luz por día. Fuente: Técnicas de Riego, José Luis Fuentes Yagüe

Calculados los valores de temperatura media y porcentaje de horas de luz correspondientes a cada mes del año, se realiza una tabla que muestra el Índice de evapotranspiración de referencia en milímetros de agua por día.

<i>EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET_o)</i>	
<i>Mes</i>	<i>mm/día</i>
<i>Enero</i>	3,98
<i>Febrero</i>	4,03
<i>Marzo</i>	4,55
<i>Abril</i>	4,89
<i>Mayo</i>	5,31
<i>Junio</i>	5,78
<i>Julio</i>	5,88
<i>Agosto</i>	5,85
<i>Septiembre</i>	5,48
<i>Octubre</i>	4,83
<i>Noviembre</i>	4,16
<i>Diciembre</i>	3,98

Tabla 1. 4. Evapotranspiración. Fuente: Elaboración propia

2. Determinación del coeficiente de cultivo anual (K_c).

Como ya se mencionó, el desarrollo máximo de un cultivo se encuentra en la tercera etapa del periodo vegetativo. Estará relacionada, por tanto, con el pico máximo de consumo de agua de regadío.

El coeficiente de cultivo (K_c) de la papa no difiere respecto a otro tipo de vegetales. En este caso, se muestra en la Tabla 1.5 los valores de los coeficientes de cultivo anuales de la papa, extraídos de la bibliografía consultada. (José Luis Fuentes Yagüe, *Técnicas de Riego*, Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi-Prensa, 1996, 65).

COEFICIENTE DE CULTIVOS (K_c) ANUALES				
Cultivo	Primera etapa	Segunda etapa	Tercera etapa	Cuarta etapa
Papas	0,45	0,75	1,15	0,85

Tabla 1. 5. Coeficientes de cultivos. Fuente: *Técnicas de riego*. José Luis Fuentes Yagüe.

3. Cálculo de ET (evapotranspiración de un cultivo determinado).

A continuación, se sustituyen los valores hallados de E_{To} y K_c en la fórmula siguiente, que será la que determine la evapotranspiración total de agua en función del cultivo elegido.

$$ET (\text{cultivo}) = E_{To} \times K_c$$

EVAPOTRANSPIRACIÓN (E_{Tc})	
Mes	mm/día
Enero	4,58
Febrero	4,63
Marzo	5,23
Abril	5,63
Mayo	6,10
Junio	6,64
Julio	6,76
Agosto	6,72
Septiembre	6,30
Octubre	5,55
Noviembre	4,79
Diciembre	4,58

Tabla 1. 6. Evapotranspiración. Fuente: *Elaboración propia*

4. Caudal de agua de riego en metros cúbicos por hectárea:

Por último, se realiza una conversión de milímetros días a metros cúbicos por hectárea de cultivo para obtener la producción de agua por parte de la desaladora.

$$1 \text{ mm de agua} = 1 \frac{\text{litro}}{\text{m}^2} = 10 \frac{\text{m}^3}{\text{Ha}}$$

<i>CAUDAL DE AGUA POR HECTÁREA</i>	
<i>Mes</i>	<i>m³/Ha día</i>
<i>Enero</i>	52,67
<i>Febrero</i>	53,24
<i>Marzo</i>	60,17
<i>Abril</i>	64,72
<i>Mayo</i>	70,18
<i>Junio</i>	76,42
<i>Julio</i>	77,76
<i>Agosto</i>	77,33
<i>Septiembre</i>	72,45
<i>Octubre</i>	63,81
<i>Noviembre</i>	55,08
<i>Diciembre</i>	52,66

Tabla 1. 7. Caudal de agua. Fuente: Elaboración propia

2.2. Método ICIA

Además, se ha querido corroborar estos valores utilizando otro método diferente. Se basa en una asesoría de riego que se encuentra dentro de la página web del *Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA)*, desarrollado por el Gobierno de Canarias. Detalla una serie de pautas que determinan el consumo, en litros por metro cuadrado, que necesita un cultivo en una semana, pudiendo extrapolarse a valores mensuales.

La técnica para seguir es similar a la descrita anteriormente, se define una fórmula matemática y se obtienen los factores que la componen.

La dosis de riego mensual (DRM):

$$DRM = \frac{(ET_o \times K_c) - P_{ef}}{0,85} \frac{l}{m^2} \text{ y mes}$$

Donde:

- ETo es la evapotranspiración de referencia.
- Kc es el coeficiente de cultivo.
- Pef es la precipitación efectiva

Los valores de evapotranspiración se obtienen de la web eportal.mapama.gob.es, estando en función del mes. Se muestran en la Tabla 1.8. los valores de evapotranspiración mensuales de la estación climatológica de San Sebastián de La Gomera.

EVAPOTRANSPIRACIÓN (Eto)	
Mes	mm/mes
Enero	102,54
Febrero	92,65
Marzo	125,3
Abril	142
Mayo	155,57
Junio	168,52
Julio	208,51
Agosto	190,84
Septiembre	163,09
Octubre	112,76
Noviembre	83,9
Diciembre	88,13

Tabla 1. 8. Evapotranspiración mensual. Fuente: eportal.mapama.gob.es

Siguiendo el mismo procedimiento se obtienen las precipitaciones. Además, se hace un inciso en el estudio:

- Si (Pp) es menor de 1 mm, $Pef=0$
- Si (Pp) está comprendida entre 1 y 20 mm, utilice $Pef=0,8*Pp$
- Si (Pp) es mayor de 20 mm, tome $Pef=0,6*Pp$.

PRECIPITACIÓN MENSUAL ESPECÍFICA			
Mes	mm/mes	Mes	mm/mes
Enero	10,22	Julio	0
Febrero	47,14	Agosto	0
Marzo	8,88	Septiembre	0
Abril	1,35	Octubre	9,48
Mayo	0	Noviembre	39,98
Junio	0	Diciembre	0

Tabla 1. 9. Precipitación mensual. Fuente: eportal.mapama.gob.es

Por último, se facilita el índice de cultivo, en este caso de la web de *Agrocabildo*, considerando la papa como plantío de estudio y la tercera etapa de periodo vegetativo. Se muestra en la figura de la derecha.

Tabla de coeficientes de cultivo, Kc, hortalizas			
Cultivo	Periodo		
	2	3	4
Papa	0,5 a 1,1	1,1	0,7
Cebolla	0,5 a 1	1	0,8
Col	0,5 a 1	1	0,8
Tomate Local	0,6 a 1,1	1,1	0,6
Judía Verde	0,6 a 1	1	0,9
Lechuga	0,7 a 1	1	0,9
Zanahoria	0,5 a 1	1	0,7

Figura 1. 2. Coeficiente de cultivo. Fuente: *Agrocabildo*

Consultados los valores se sustituyen en la fórmula expresada anteriormente. Se muestran en la Tabla 1.10. Se realiza una conversión de litros por metro cuadrado a metros cúbicos por hectáreas.

CONSUMO DIARIO			
Mes	litros/ m ² mes	litros/ m ² día	m ³ /Ha día
Enero	120,68	3,89	38,93
Febrero	64,44	2,30	23,01
Marzo	151,71	4,89	48,94
Abril	182,18	6,07	60,73
Mayo	201,33	6,49	64,94
Junio	218,08	7,27	72,69
Julio	269,84	8,70	87,04
Agosto	246,97	7,97	79,67
Septiembre	211,06	7,04	70,35
Octubre	134,77	4,35	43,47
Noviembre	61,54	2,05	20,51
Diciembre	114,05	3,68	36,79

Tabla 1. 10. Consumo diario. Fuente: *Elaboración propia*.

3. Análisis del terreno

A continuación, se realiza un estudio para determinar el total de hectáreas destinadas a cultivo en la comarca sur de la Isla de La Gomera. Obtenido este valor, el caudal diario de agua para riego quedará únicamente en función de los metros cúbicos diarios.

Mapas de Cultivos, documentos de información geográfica gestionados por la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas, muestran una serie de valores característicos sobre las condiciones del terreno del municipio.

Según datos estadísticos, facilitados en el informe anual de 2018, el municipio de Alajeró cuenta con un total de 1061,86 hectáreas de superficie agrícola. Sin embargo, sólo una pequeña porción de dicha superficie está destinada a cultivo.

La superficie de cultivo total es de **21,94 hectáreas**, encontrándose gran diversidad en las plantaciones existentes, aunque las destinadas a regadío son, únicamente, **16,60 hectáreas**. Se facilita en la Tabla 1.11 una serie de valores destacables.

MAPA DE CULTIVO DEL MUNICIPIO DE ALAJERÓ			
Categoría	Superficie total (ha)	Categoría	Superficie total (ha)
Frutales	3,31	Platanera	0,13
Huertas	10,05	Tomate	6,84
Ornamentales	1,57	Otros	0,04
Superficie total (ha)		21,94	
Superficie total regadío (ha)		16,60	

Tabla 1. 11. Mapa de cultivo. Fuente: Gobierno de Canarias

Además, se aportará agua a una serie de cultivos que no pertenecen al municipio de Alajeró, pero se encuentran próximos a la planta de desalación y que se consideran factibles para realizarles un suministro de agua. Realizando una medición sobre plano mediante el programa informático, *Grafcan*, desarrollado por el Gobierno de Canarias, se obtienen las hectáreas de cultivo que cubren esta nueva ubicación.



Figura 1. 3. Superficie de cultivo. Fuente: Grafcan

Se comprueba en la Figura 1.3. que la nueva superficie de cultivo tiene 119.980 metros cuadrados, equivalentes a 12 hectáreas aproximadamente. **25,60 hectáreas** se deberán cubrir con la planta de desalación donde, las existentes en el municipio de Alajeró, representan un 64,84% y las colindantes un 35,16%.

A partir del valor obtenido se pueden calcular los metros cúbicos que se deben producir al día por parte de la planta de desalación.

4. Consumo diario

Para finalizar se obtienen los valores de caudales diarios que debe producir la planta de desalación. Al realizar el cálculo de evapotranspiración por dos métodos diferentes, se analizan por separado y se escoge el método más realista para el proyecto.

4.1. Consumo método Blaney-Criddle

Los valores obtenidos por el método de Blaney-Criddle se muestran en la siguiente tabla. Simplemente se han multiplicado los valores de la Tabla 1.7. por la superficie total, en hectáreas.

<i>CONSUMO DIARIO</i>	
<i>Mes</i>	<i>m³/día</i>
<i>Enero</i>	1348,34
<i>Febrero</i>	1362,86
<i>Marzo</i>	1540,42
<i>Abril</i>	1656,79
<i>Mayo</i>	1796,64
<i>Junio</i>	1956,26
<i>Julio</i>	1990,72
<i>Agosto</i>	1979,76
<i>Septiembre</i>	1854,76
<i>Octubre</i>	1633,60
<i>Noviembre</i>	1410,01
<i>Diciembre</i>	1348,03

Tabla 1. 12. Consumo diario según Blaney-Criddle. Fuente: Elaboración propia.

Comparando mes a mes cada valor se comprueba que existen diferencias bastante notorias en los caudales. Los consumos máximos se encuentran en la época estival (julio) reduciéndose en la época invernal (diciembre).

Si el dimensionado de la central debe tener un caudal fijo se nos presenta el primer inconveniente. Se debe obtener un valor medio de consumo diario. A partir de este, se estudian los meses en los que existe excedencia o escasas hídrica. Se estudiará la posibilidad de implantar depósitos de almacenamiento para subsanar este problema.

CONSUMO MEDIO	1656,51 m³/día
----------------------	----------------------------------

Tabla 1. 13. Consumo medio diario. Fuente: Elaboración propia

El valor de la Tabla 1.13. será el consumo medio diario que debe producir la desaladora cada día por el método de Blaney-Criddle.

4.2. Consumo método ICIA

Por otro lado, se calcula el valor de caudal mensual por el método descrito en el Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. Quedan reflejados en la siguiente tabla:

CONSUMO DIARIO	
Mes	m³/día
Enero	996,54
Febrero	589,18
Marzo	1252,80
Abril	1554,57
Mayo	1662,56
Junio	1860,99
Julio	2228,33
Agosto	2039,49
Septiembre	1801,03
Octubre	1112,95
Noviembre	525,15
Diciembre	941,84

Tabla 1. 14. Consumo diario. Fuente: Elaboración propia

Repitiendo el proceso anterior para obtener el consumo medio diario de agua, el valor será:

CONSUMO MEDIO	1380,45 $m^3/día$
----------------------	-------------------

Tabla 1. 15. Consumo medio. Fuente: Elaboración propia

4.3. Comparación

Analizando los resultados se comprueba que existe una diferencia entre ambos caudales. Lo idóneo es estimar un valor medio entre ellos.

CONSUMO MEDIO ESTIMADO	1518,5 $m^3/día$
-------------------------------	------------------

Tabla 1. 16. Consumo medio estimado. Fuente: Elaboración propia

Se ajusta el valor teniendo en cuenta las consideraciones que se han tomado para el cálculo anteriormente:

- Se contempla durante todo el año el desarrollo máximo de las plantas. Esto dista en cierta medida de la realidad, no siempre se requerirá de esas necesidades hídricas por parte del cultivo.
- Se considera el riego del plantío todos los días del año. De igual forma que el caso anterior, existe un cierto error si se considera este criterio como acertado. En la práctica no se aplica esta medida. Dependiendo del tipo de climatología y terreno se realiza con mayor o menor frecuencia.
- Por último, las precipitaciones obtenidas para el estudio son del año 2018. Cabe la posibilidad de tener años que difieran de este último, más si se tiene en cuenta la meteorología como una ciencia impredecible.

Por ello, se ha decidido considerar como valor de necesidades hídricas:

CONSUMO MEDIO FINAL	1500 $m^3/día$
----------------------------	----------------

Tabla 1. 17. Consumo medio final. Fuente: Elaboración propia.

Se deberán instalar depósitos de almacenamiento para los meses de excedencia y escasez. No obstante, se muestran una serie de medidas que pueden producir un reajuste de este valor.

5. Producción diaria

El caudal mínimo que debe producir la planta de desalación, de forma teórica, durante todo el año es de 1500 m³/día coincidiendo con el valor de necesidades hídricas diarias, reflejado en la Tabla 1.17.

Sin embargo, en la práctica se recomienda seguir una serie de pautas para la correcta conservación de la desaladora y de sus componentes.

Por ejemplo, se aconseja realizar una serie de paradas para llevar a cabo las operaciones de mantenimiento o limpieza de la planta. De esta forma, el número de días de funcionamiento disminuye aumentando así la producción de agua necesaria. Siguiendo esto, existirán días donde la producción supere la demanda necesaria o viceversa. En este caso, se requerirá de una serie de depósitos para almacenar el excedente de agua producida. Además, suministrarán el agua en los meses de producción nula o en los periodos de escasez hídrica.

De esta forma se propone realizar una parada, siguiendo los criterios establecidos en la guía de desalación publicada por el *Ministerio de Sanidad y Política Social*, de larga duración. Prevalecen estas características antes que detenciones cortas y repetitivas en el tiempo que pueden producir un deterioro acelerado en los componentes de la planta de desalación.

La escasa demanda de agua para riego, procedente de la planta de desalación, que presentan los meses invernales frente a los meses estivales los hacen idóneos para llevar a cabo esta operación. Todo ello favorecido por la diferencia de precipitaciones que presentan cada una de las épocas del año.

Por tanto, se decide realizar una parada en los meses con mayor aporte de agua en forma de precipitación. Se muestra en la Figura 1.4. los valores anuales (2008-2018) de precipitación de la estación climatológica de la isla de La Gomera facilitados en la web *eportal.mapama.gob.es*

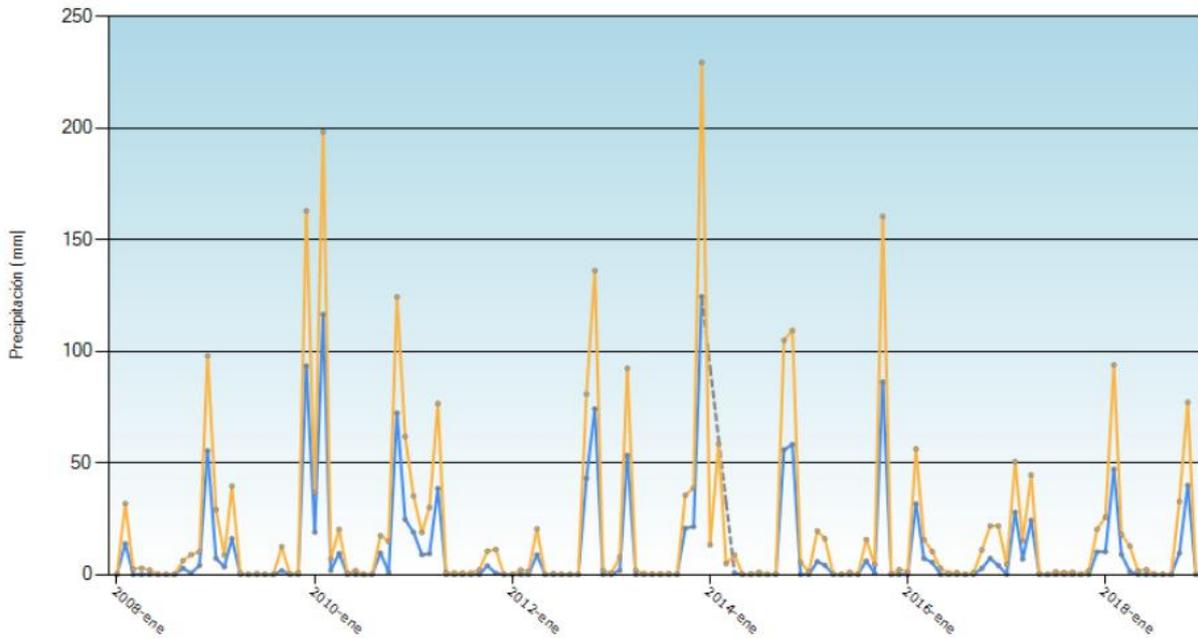


Figura 1. 4. Gráfica de precipitaciones anuales (2008-2018). Fuente: eportal.mapama.gob.es

Observando el gráfico, se analiza la producción diaria de la planta realizando una parada de tres meses. El intervalo de tiempo será de noviembre a marzo, eligiendo el consumo óptimo que suministre las necesidades hídricas durante todo el año.

Recalculando los valores para un total de 275 días al año se obtiene el valor estimado de producción diario. Se facilita el valor en la Tabla 1.18.

PRODUCCIÓN ESTIMADA	2024,6 m ³ /día
----------------------------	----------------------------

Tabla 1. 18. Producción estimada. Fuente: Elaboración propia

Se comprueba que se trata de un valor inusual para una planta de desalación. Realizando una serie de iteraciones, variando los caudales, los meses de parada y los depósitos de almacenamiento, se obtiene un valor más idóneo. El caudal que se debe producir al día para cumplir con los requisitos hídricos y que permita realizar una parada de larga duración es de 1850 m³/día.

PRODUCCIÓN DIARIA FINAL	1850,00 m ³ /día
--------------------------------	-----------------------------

Tabla 1. 19. Producción final diaria. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra una tabla resumen con todos los valores cálculos, expresados en m³ por mes así como los volúmenes de agua que deberán tener los depósitos.

RESUMEN NECESIDADES HÍDRICAS ANUALES Y ALMACENAMIENTO DE AGUA				
Mes	Necesidades hídricas	Producción	Volumen aportado	Volumen almacenado
Enero	30892,88	0	-30892,88	61323,30
Febrero	16496,94	0	-16496,94	44826,36
Marzo	38836,71	0	-38836,71	5989,66
Abril	46637,18	55500	8862,82	14852,48
Mayo	51539,43	57350	5810,57	20663,05
Junio	55829,68	55500	-329,68	20333,37
Julio	69078,14	57350	-11728,14	8605,23
Agosto	63224,17	57350	-5874,17	2731,06
Septiembre	54030,76	55500	1469,24	1469,24
Octubre	34501,57	57350	22848,43	24317,67
Noviembre	15754,54	55500	39745,46	64063,13
Diciembre	29196,95	57350	28153,05	92216,18

Tabla 1. 20. Necesidades hídricas y almacenamiento. Fuente: Elaboración propia

Los valores obtenidos en la Tabla 1.20 se han obtenido de:

1. **Las necesidades hídricas mensuales de los cultivos.** Serán los valores facilitados en la Tabla 1.14 multiplicados por la cantidad de días de cada mes.
2. **La producción mensual de la planta de desalación.** Será el caudal de producción diario multiplicado por la cantidad de días de cada mes. En este caso, los valores nulos representan los meses de paro en la producción.
3. **El volumen aportado al depósito.** Se refleja la cantidad de agua que se almacena en los depósitos. Será la diferencia entre producción mensual y necesidades hídricas mensuales.
4. **Volumen almacenado.** También se ilustran los niveles de almacenamiento durante el año, siendo el mes de diciembre el que presenta mayor volumen. Será el mes que precede al cese de producción.

Para finalizar, se deben diseñar los periodos de producción y de parada por parte de la planta con el fin de asegurar el almacenamiento de agua para los meses de producción nula.

Comenzarían las labores de producción en el mes de septiembre, almacenando agua en los depósitos pertinentes. A finales de año se tendrá un total de **92216,18 metros cúbicos de agua almacenada**. Con esta cantidad se asegura el suministro en los meses de parada. Este valor no representa el tamaño mínimo que debe tener el depósito de almacenamiento. Se debe distribuir agua a dos ubicaciones diferentes siguiendo los porcentajes calculados anteriormente.

Se pararía la producción en enero, siguiendo las pautas necesarias para la correcta conservación de los equipos. El suministro al cultivo se realizaría gracias a los depósitos de almacenamiento.

En abril se reanuda la producción para asegurar el aporte de agua (conjunto con los depósitos) en los meses de verano. Al finalizar el año natural (agosto) se tendrá un excedente acumulado de 2731,06 metros cúbicos de agua. Esta cantidad es equivalente a dos días de producción.

Realizando esta práctica, en el balance de agosto, se evita un aumento paulatino de la capacidad de almacenamiento año tras año.

6. Conclusiones

Analizando los valores obtenidos a lo largo del estudio:

1. El consumo anual medio que tendrá nuestra superficie de cultivo será de 1500 m³/día.
2. La producción diaria de la planta se establece en 1850 m³/día. Es superior al valor de consumo porque se necesita producir un excedente de agua.
3. Es acertado realizar una parada de larga duración para labores de mantenimiento y limpieza. En este caso, se realizará en los tres primeros meses del año (enero, febrero y marzo).
4. Se cuenta con cierta flexibilidad a la hora de diseñar el programa de producción pudiendo adaptar el caudal de producción a las necesidades hídricas anuales que variarán en función de la climatología.
5. Los depósitos de almacenamiento ayudarán a suministrar agua en los meses de parada. Se muestra en el *anexo III, Dimensionado de almacenamiento, bombas, tuberías y tratamiento* la distribución que sigue el agua almacenada.

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA,
TITULACIONES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

ANEXO II

**DIMENSIONADO DEL NÚCLEO DE
MEMBRANAS Y RECUPERADOR DE
ENERGÍA PARA ÓSMOSIS INVERSA**

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

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

AUTOR: Alberto Meneses Moreno

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE ANEXO II

1. INTRODUCCIÓN	1
2. SOFTWARE INFORMÁTICO	1
2.1. DATOS DE PARTIDA.....	2
2.2. ANÁLISIS	2
2.2.1. <i>Temperatura del agua de alimentación</i>	3
2.2.2. <i>Propiedades del agua de alimentación</i>	6
2.2.3. <i>Propiedades del agua producto</i>	7
2.3. DISEÑO	9
2.3.1. <i>Sistema</i>	9
2.3.2. <i>Trenes</i>	10
2.3.3. <i>Especificación del sistema</i>	12
2.4. DISPOSITIVO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA (ERD)	23
2.5. REANÁLISIS MEDIANTE IMSDESING.....	29
3. ELECCIÓN DE LA MEMBRANA	30
4. CONCLUSIONES	31

ÍNDICE FIGURAS ANEXO II

Figura 2. 1. Interfaz del software IMSDesign. Fuente: Hydranautics.....	2
Figura 2. 2. Temperaturas medias mensual (2008-2018). Fuente: Puertos del Estado. .	4
Figura 2. 3. Temperaturas mínimas. Fuente: Puertos del Estado	4
Figura 2. 4. Temperaturas máximas. Fuente: Puertos del Estado	4
Figura 2. 5. Interfaz de análisis de IMSDesing. Fuente: IMSDesing.....	9
Figura 2. 6. Elección de trenes. Fuente: IMSDesing.....	10
Figura 2. 7. Interfaz de trenes. Fuente: IMSDesing	12
Figura 2. 8. Membrana de separación. Fuente: Membranes.....	12
Figura 2. 9. Membrana de ultrafiltración. Fuente: Membranes.....	12
Figura 2. 10. Membrana de nanofiltración. Fuente: Membranes	13
Figura 2. 11. Membrana de ósmosis inversa. Fuente: Membranes	13
Figura 2. 12. Membrana SWC. Fuente: Membranes.....	13
Figura 2. 13. Membrana CPA. Fuente: Membrane	13
Figura 2. 14. Membrana ESPA. Fuente: Membrane	14
Figura 2. 15. Membrana LFC. Fuente: Membrane.....	14
Figura 2. 16. Membranas según tipología de agua. Fuente: IMSDesing	16
Figura 2. 17. Determinación del número de tubos de presión y elementos de presión por tubo SWC5 MAX. Fuente: IMSDesing	17
Figura 2. 18. Determinación del número de tubos de presión y elementos de presión por tubo SWC4 MAX. Fuente: IMSDesing	17
Figura 2. 19. Resultado de cálculo SWC4 MAX. Fuente: IMSDesing.....	19
Figura 2. 20. Resultado de cálculo SWC5 MAX. Fuente: IMSDesing.....	19
Figura 2. 21. Esquema gráfico SWC5 MAX. Fuente: IMSDesing	20
Figura 2. 22. Esquema gráfico SWC4 MAX. Fuente: IMSDesing	20
Figura 2. 23. Cálculo de potencia SWC4 MAX. Fuente: IMSDesing	21

Figura 2. 24. Cálculo de potencia SWC5 MAX. Fuente: IMSDesing	21
Figura 2. 25. Resultado dimensionado ERD SWC4 MAX. Fuente: Energy Recovery	24
Figura 2. 26. Resultado dimensionado ERD SWC5-MAX. Fuente: Energy Recovery	25
Figura 2. 27. Rendimiento PX-Q300. Fuente: Energy Recovery	25
Figura 2. 28. Rendimiento ERD SWC5 MAX. Fuente: Energy Recovery	26
Figura 2. 29. Rendimiento ERD SWC4 MAX. Fuente: Energy Recovery	26
Figura 2. 30. Resultado dimensionado ERD SWC5 MAX. Fuente: Danfoss	28
Figura 2. 31. Resultado dimensionado ERD SWC4 MAX. Fuente: Danfoss	28
Figura 2. 32. Valores reajuste ERD SWC4 MAX y SWC5 MAX. Fuente: IMSDesing	29

ÍNDICE TABLAS ANEXO II

Tabla 2. 1. Composición química del agua de mar. Fuente: Laboratorios Labaqua.	7
Tabla 2. 2. Valores normales de análisis de aguas de riego. Fuente: Técnicas de riego. José Luis Fuentes Yagüe	8
Tabla 2. 3. Tabla comparativa de membranas. Fuente: Elaboración propia.	22
Tabla 2. 4. Valores de dimensionado ERD. Fuente: IMSDesing	24
Tabla 2. 5. Resumen parámetros PX-Q300. Fuente: Elaboración propia.	26
Tabla 2. 6. Condiciones de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.....	27
Tabla 2. 7. Valores de funcionamiento tras reajuste. Fuente: Elaboración propia.....	30
Tabla 2. 8. Parámetros finales. Fuente: Elaboración propia.....	31

1. Introducción

No se comprende la utilización de la tecnología de ósmosis inversa sin el uso de las membranas de filtrado. Por tanto, se estudiará el dimensionado del núcleo de membranas que hacen posible la transformación de un agua altamente salobre, como es la del mar, en agua apta para el consumo agrícola del municipio de Alajeró.

Para conseguirlo, se hace uso de un software informático, que proporcionará las características técnicas que deben tener las membranas en relación con los datos de entrada y de salida introducidos.

Por tanto, se deberán estudiar una serie de propiedades relacionadas con el agua, por ejemplo, la temperatura del pozo o la presión del fluido. De igual forma, se deben estudiar las propiedades del agua producto, asegurándonos que cumplen con los requisitos necesarios para uso agrícola.

Además, se implantará un sistema de recuperación de energía que ayudará a reducir el consumo de energía relacionado con el aumento de presión del fluido.

Por último, se estudiarán diferentes combinaciones variando los parámetros de operación del programa informático (distintos tipos de membrana, números de tubo). Finalmente se elige la relación más apropiada para esta aplicación.

2. Software informático

A continuación, se lleva a cabo el dimensionado del núcleo de membranas y del sistema de recuperación de energía.

El mercado dispone de diferentes desarrolladores informáticos para el cálculo de procesos de ósmosis inversa. Sin embargo, para la elección de uno de ellos se ha seguido una pauta impuesta por el tutor académico, deben existir alternativas entre los compañeros que realizan un proyecto similar al presente.

Por ello, analizando las diferentes opciones encontradas, se ha decidido utilizar el software de dimensionamiento *IMSDesing*, desarrollado por la empresa Hydranautics. Este programa permite obtener el núcleo de membranas y los datos del sistema de recuperación de energía en el mismo dimensionado.



Figura 2. 1. Interfaz del software IMSDesign. Fuente: Hydranautics

Además, será el proveedor de los equipos de ósmosis inversa (membranas). Para seguir un desarrollo estructurado, se describen las secciones presentes en la interfaz del programa desde que se inicia hasta que se obtiene una solución concreta.

2.1. Datos de partida

Iniciado el programa, pide que se configure el idioma, la moneda utilizada y las unidades de medida. Se establece, español, euros y sistema métrico (presión en bar, caudal en m³/día, temperatura en grados centígrados y flujo de permeado en l/h) respectivamente.

El siguiente paso será abrir o crear un proyecto de ósmosis inversa. Se crea “Planta Desalación Alajeró”. Se pasa a la siguiente sección, el análisis.

2.2. Análisis

Seguidamente muestra unas casillas en blanco que se deben rellenar con los valores pedidos. En este caso se debe obtener los siguientes parámetros:

1. *Temperatura del agua de alimentación.*
2. *Tipo de agua de captación*
3. *Propiedades químicas del agua de mar*

A continuación, se describe el proceso que se ha seguido para obtener cada uno de los valores requeridos.

2.2.1. *Temperatura del agua de alimentación*

Un parámetro bastante importante en el dimensionado de la EDAM es la temperatura de alimentación o captación. Se debe aproximar, de forma consecuente, un valor real de temperatura de captación. De no ser así, se relacionan los siguientes inconvenientes:

1. La temperatura del agua en el pozo de captación. Como se mostrará a continuación, se obtendrán los valores de la temperatura superficial del agua del mar, sin embargo, esta dista del valor real del agua en el lugar de captación. Innumerables factores aumentan la dificultad a la hora de definir este valor. Se deberá tomar una decisión en función de la temperatura media de superficie para llevar a cabo el dimensionado de las membranas.
2. Por otro lado, como se sabe, la viscosidad sufre una variación en función de la temperatura del fluido. Por ejemplo, si esta última es baja, aumentará la viscosidad y, a consecuencia, se requerirá de una mayor presión sobre las membranas. Este hecho producirá un aumento en el consumo específico del núcleo de membranas y de la propia planta. Por tanto, se estudiará la viabilidad de implantar un sistema de calentamiento por energía solar para aumentar la temperatura del agua de captación y, por consiguiente, mejorar el rendimiento energético de la instalación en la medida de lo posible.
3. Por último, la temperatura y las propiedades del agua se relacionan de forma directa. Parámetros como la solubilidad de determinadas sales o el crecimiento de la actividad biológica se alteran con la variación de temperaturas.

Siguiendo los factores descritos, se tendrá mero cuidado en determinar, de forma correcta, la temperatura de captación en los pozos.

Para obtener la temperatura del agua de mar se hace uso de la información recogida en la web de *Puertos del Estado*. Se encuentran las medias históricas desde 1998 hasta la actualidad. Se debe obtener información del agua en el lugar de captación, sin embargo, dado que el puerto de Playa de Santiago, ubicación de este proyecto, no facilita las características hídricas en dicha web, se aproximan los valores a la boya más próxima. Estaría situada en el sur de la isla de Tenerife, más concretamente en el Puerto de Los Cristianos.

Desde la web se pueden obtener diversos valores de estudio, encontrándose, por ejemplo, datos de temperaturas máximas o mínimas anuales. En la búsqueda se considerarán

los datos facilitados de la última década para evitar errores relacionados, por ejemplo, con el calentamiento global. Por tanto, el rango de estudio será desde 2008 hasta 2018.

A continuación, se muestra en la Figura 2.2. un gráfico que representa la temperatura media mensual del periodo de estudio.

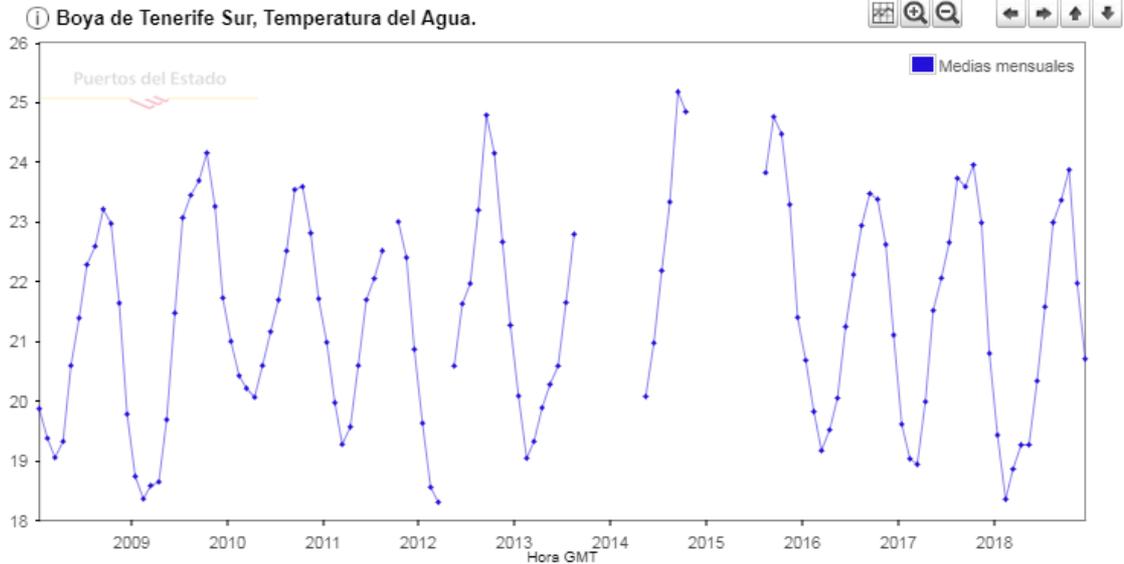


Figura 2. 2. Temperaturas medias mensual (2008-2018). Fuente: Puertos del Estado.

Se comprueba que las temperaturas medias mensuales de la última década se comprenden entre los 18,5°C y los 25°C. Al ser una medición superficial, la climatología afecta de forma directa. En la práctica y a un cierto nivel de profundidad, el agua del mar en Canarias suele mantener una temperatura media estable durante todo el año

Realizando una media anual con los valores máximos y mínimos de cada mes 2018 se obtiene un único valor de temperatura.

Mes/Month	Ts Max./Max. Ts
Enero/January	20.3
Febrero/February	19.0
Febrero/February	19.0
Marzo/March	20.8
Abril/April	20.4
Mayo/May	20.4
Junio/June	22.8
Julio/July	22.4
Agosto/August	25.0
Septiembre/September	24.9
Octubre/October	25.0
Noviembre/November	23.5
Diciembre/December	21.5

Figura 2. 4. Temperaturas máximas.
Fuente: Puertos del Estado

Mes/Month	Ts Min./Min. Ts
Enero/January	18.8
Febrero/February	18.0
Marzo/March	17.8
Abril/April	18.8
Mayo/May	18.9
Mayo/May	18.9
Junio/June	19.3
Julio/July	20.8
Agosto/August	21.9
Septiembre/September	22.6
Septiembre/September	22.6
Octubre/October	23.2
Noviembre/November	21.0
Noviembre/November	21.0
Diciembre/December	20.2

Figura 2. 3. Temperaturas mínimas.
Fuente: Puertos del Estado

Realizando las operaciones pertinentes,

- *Temperatura media máxima: 22,16°C*
- *Temperatura media mínima: 20,11°C*
- *Temperatura media anual: 21, 13°C.*

Por otro lado, es de gran dificultad técnica calcular la variación de temperatura que sufre el agua de mar al filtrarse hacia los pozos de captación. Existen infinidad de factores que influyen en este aspecto. No obstante, se puede conseguir un valor estable con la ayuda de la tecnología. Instalando un sistema de calentamiento se obtiene una temperatura constante durante todo el año.

Si se establece un valor de temperatura más elevado, la viscosidad del fluido disminuirá y consigo, el consumo específico de la planta se reducirá debido a la disminución en la energía de bombeo.

La temperatura idónea para esta práctica se encuentra en un rango que va desde los 30°C hasta los 35°C. Se ha estudiado la viabilidad de implantar un sistema de calentamiento térmico solar que nos permita obtener un valor estable durante todo el año.

Haciendo uso del software (se muestra en el *apartado 2.1. Diseño*, el proceso seguido para obtener este valor) se compara bajo las mismas características de diseño (número de trenes, número de elementos por tubos de presión y tipo de membrana) el consumo específico obtenido para una temperatura de 21°C y otra de 32°C.

Los consumos específicos se establecen en 2,25 kWh/m³ y 2,17 kWh/m³ respectivamente. Se reduce un 4% el consumo del proceso de ósmosis inversa.

Sin embargo, la implantación de un sistema de calentamiento por energía solar térmica implicaría la instalación de numerosos receptores solares. El elevado caudal que se debe calentar de forma diaria hará necesario el suministro de energía eléctrica de red durante la noche. Esto, sumado al coste económico que supondría llevar a cabo esta ampliación hace que sea una opción inviable en este proyecto.

Por tanto, se concluye que, es acertado realizar un calentamiento térmico en la etapa de pretratamiento, pero únicamente si se cuenta con una fuente térmica gratuita o de coste relativamente bajo que permita intercambiar calor con el fluido de trabajo. Este sistema se podría implantar, por ejemplo, en una central de producción de energía eléctrica, donde se

aprovecha la energía térmica existente en los gases de escape para intercambiarla con el fluido de captación.

Siguiendo esta consideración, se ha decidido considerar que la temperatura del agua en los pozos de alimentación será estable durante todo el año y tendrá un valor de 21°C.

2.2.2. Propiedades del agua de alimentación

Otro aspecto necesario para el dimensionado del núcleo de membranas es la composición química del agua de mar. De ello dependerá, por ejemplo, el tipo de membrana que se utilizará.

Para obtenerlo se debe realizar un análisis del agua de mar en la ubicación de los pozos de captación. Sin embargo, dada la imposibilidad de obtener los resultados mediante el Ayuntamiento del municipio u otras fuentes (contactando con laboratorios de análisis privados) se decide recabar la información de otros Trabajos Fin de Grado disponibles en el repositorio de la Universidad de La Laguna.

En la gran mayoría se cita un análisis químico realizado por el laboratorio Labaqua (se contacta para pedir información actualizada acerca del análisis, no obstante, rechazan la petición al tratarse de información privada y sugieren que se contacte con las empresas con las que trabajan. No se obtiene respuesta).

Este análisis se realizó para la desaladora de Santa Cruz de Tenerife. Se estima que las propiedades químicas del agua serán similares a las del puerto de Playa de Santiago.

Se muestran los valores obtenidos.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE AGUA DE MAR	
<i>Iones</i>	<i>mg/L</i>
<i>Sodio</i>	<i>11870</i>
<i>Potasio</i>	<i>451</i>
<i>Magnesio</i>	<i>1470</i>
<i>Calcio</i>	<i>431</i>
<i>Estroncio</i>	<i>10</i>
<i>Bario</i>	<i>0,02</i>
<i>Sulfatos</i>	<i>3148</i>

<i>Fluoruros</i>	0,86
<i>Cloruros</i>	21280
<i>Nitratos</i>	0,70
<i>Bicarbonatos</i>	141,50
<i>Boro</i>	5,23
<i>Bromo</i>	0,50
<i>Sílice</i>	1,10

Tabla 2. 1. Composición química del agua de mar. Fuente: Laboratorios Labaqua.

Además, en este informe se establece el pH del agua en 8. Como se verá, se instalará un sistema de pretratamiento para reducirlo en una unidad.

2.2.3. ***Propiedades del agua producto***

“A medida que aumenta el contenido de sales en la solución del suelo, tanto más se incrementa la tensión osmótica y, por tanto, la planta tiene que hacer mayor esfuerzo de succión para absorber el agua por las raíces. Todo ello se traduce, en última instancia, en una disminución de la cantidad de agua disponible para la planta.”

“Algunos iones, tales como los de sodio, cloro y boro, se pueden acumular en los cultivos en concentraciones suficientemente altas como para reducir el rendimiento de la cosecha.”

(José Luis Fuentes Yagüe, “La calidad del agua de riego” en *Técnicas de Riego*, Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi-Prensa, 1996, 73).

Las definiciones citadas en el libro *Técnicas de Riego* les otorgan un papel principal a las propiedades químicas del agua. Por ello, las propiedades del agua producto deben cumplir una serie de requisitos que la permitan ser apta para el consumo agrícola.

El Real Decreto 140/2003 o el Programa de Vigilancia del Agua de Consumo Humano (PVSACH) de la Comunidad Autónoma de Canarias muestran los valores paramétricos legislados que debe tener, a nivel químico, el agua para consumo humano. Sin embargo, no existe un reglamento específico que determine los parámetros químicos que debe tener el agua para riego.

En este caso, se hará uso de la bibliografía consultada. El autor José Luis Fuentes Yagüe, muestra en el libro *Técnicas de Riego*, unos valores estándares que debe tener el agua producto

para un cultivo genérico, aunque cabe la posibilidad de que cada tipo de planta necesite un agua con características determinadas. No se contemplará esta hipótesis en este estudio.

Se muestra el rango de valores que se deben cumplir para no disminuir el rendimiento del cultivo. (José Luis Fuentes Yagüe, *Técnicas de Riego*, Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi-Prensa, 1996, 98).

Salinidad

<i>Conductividad eléctrica</i>	0-3	dS/m
<i>Total de sólidos en disolución</i>	0-2000	mg/l
<i>Calcio</i>	0-20	meq/l
<i>Magnesio</i>	0-5	meq/l
<i>Sodio</i>	0-40	meq/l
<i>Carbonatos</i>	0-0,1	meq/l
<i>Bicarbonatos</i>	0-10	meq/l
<i>Cloruro</i>	0-30	meq/l
<i>Sulfatos</i>	0-20	meq/l

Nutrientes

<i>Nitrógeno (nitrato)</i>	0-10	mg/l
<i>Nitrógeno (amonio)</i>	0-5	mg/l
<i>Fósforo (fosfato)</i>	0-2	mg/l
<i>Potasio</i>	0-2	mg/l

Varios

<i>Boro</i>	0-2	mg/l
<i>pH</i>	6-8,5	
<i>RAS</i>	0-15	

Tabla 2. 2. Valores normales de análisis de aguas de riego. Fuente: Técnicas de riego. José Luis Fuentes Yagüe

Una vez se ha recabado información sobre los componentes químicos y la temperatura del agua se introducen los valores en las casillas correspondientes.

- Temperatura. La temperatura media anual del agua de mar será de 21°C.
- Tipo de agua. Se pueden elegir diferentes fuentes de captación. En este caso se escoge “Mar Pozo Convencional”.
- pH. La acidez del agua de mar se encuentra en 8. Se deberá reducir por procesos químicos para no disminuir la vida útil de las membranas.
- Cationes y aniones. Las propiedades se introducen siguiendo los valores establecidos en la Tabla 2.1.

Se representa el interfaz del programa con los valores introducidos.



Proyecto: DESALADORA DE ALAJERC Calculado por: ALBERTO MENESES MORE Temperatura: 21,0 °C Tipo de agua: Mar Pozo Convencional

pH: 8,00 CO3: 14,038 mg/l CO2: 0,760 mg/l Conductividad E: 60105,9 µs/cm

Cationes		Aniones	
mg/l	mg/l CaCO3	mg/l	mg/l CaCO3
Calcio	431,00	1077,50	
Mg	1470,00	6024,59	
Na	11870,00	25804,35	
K	451,00	576,76	
NH4	0,00	0,00	
Ba	0,020	0,01	
Sr	10,000	11,41	
	0,000	0,00	
	0,000	0,00	
	0,000	0,00	
Total, meq/l		669,89	
HC03	141,50	115,98	
SO4	3148,00	3279,17	
Cl	21280,00	30014,10	
F	0,86	2,26	
NO3	0,70	0,56	
PO4	0,00	0,00	
SiO2	1,10		
B	5,23		
Br	0,500	0,31	
	0,000	0,00	
Total, meq/l		668,72	

Saturaciones	
TDS Calculado	38824 mg/l
Presión osmótica	27,9 bar
Ca3(PO4)2 SI	0,00
CCPP	33,51 mg/l
CaSO4	24,4 %
BaSO4	85,2 %
SrSO4	35,2 %
CaF2	14,2 %
Silica	0,8 %

Figura 2. 5. Interfaz de análisis de IMSDesing. Fuente: IMSDesing

2.3. Diseño

En esta sección se definirá el “corazón de la ósmosis inversa”. Se especificarán los datos reales de producción, tanto de agua producto como de rechazo. Se establecerán los criterios para la elección de una membrana determinada. Se estudiará instalación de un sistema de recuperación de energía para reducir el consumo específico de la planta de desalación.

La interfaz del programa nos clasifica en cuatro apartados esta sección.

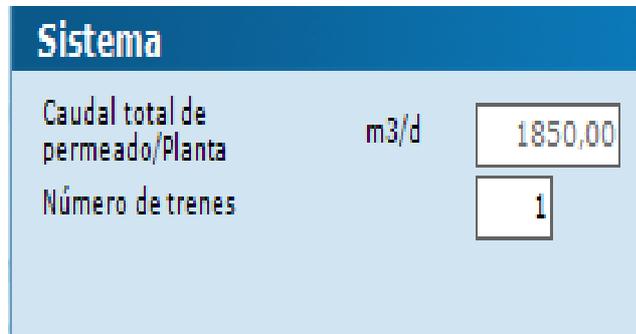
2.3.1. Sistema

Se define el número de trenes del sistema. Este determinará el caudal de producción que tendrá la planta de desalación. Irá en función de las necesidades hídricas diarias calculadas con anterioridad.

El número de trenes define la cantidad de equipos de desalación que se tendrá. Cada tren estará provisto de una serie de tubos de presión en los cuales se albergan las membranas de ósmosis inversa.

Los trenes se suelen definir en función de la capacidad productiva de la planta. Existirá únicamente un tren porque el caudal de esta planta es pequeño en comparación con las plantas de gran capacidad, que suelen tener un número de trenes mayor.

Por tanto, se introduce un 1 en la casilla “Número de trenes”. La figura muestra como quedaría la interfaz del programa en esta sección.



Sistema	
Caudal total de permeado/Planta	m3/d <input type="text" value="1850,00"/>
Número de trenes	<input type="text" value="1"/>

Figura 2. 6. Elección de trenes. Fuente: IMSDesing

2.3.2. *Trenes*

Se debe definir la estructuración del tren de permeado. Los valores solicitados son:

- *pH*. Se tiene que determinar el pH de alimentación. La acidez del agua de mar es 8. Sin embargo, y aunque el programa lo acepte como máximo, se debe tener en cuenta que un valor de acidez con estas características daña las membranas. Según las características técnicas de las membranas del fabricante Hydranautics, el pH de alimentación se debe encontrar en un rango de 6,5 a 7. Para obtenerlo, se debe realizar un tratamiento químico con ácido clorhídrico o ácido sulfúrico. Se tomará el valor de acidez como 7.
- *Tratamiento químico*. Si los pH de captación y alimentación difieren se debe realizar un tratamiento químico. Normalmente para reducir la acidez. Este proceso se automatiza gracias al software. Al introducir un pH de 7 se debe realizar un tratamiento químico con ácido clorhídrico (HCl), por ejemplo, con una concentración en solución del 100% y con una tasa de dosificación de productos químicos de 8,92 mg/l. Parámetro calculado automáticamente por el programa.
- *Conversión*. La conversión determina el porcentaje de agua que será desalada. Será la relación entre alimentación y capacidad. Los valores estándares se encuentran entre 40% y 50%. Se establece 45% como valor estándar, aunque se iterará este parámetro para comprobar las ventajas e inconvenientes que presenta.

- *Flujo de permeado.* Será la cantidad de agua producto que se desea obtener. En este caso será de 1850 m³ por día (*Anexo I. Dimensionado de las necesidades hídricas de los cultivos*). De este parámetro, el software deriva de forma automática:
 - Flujo promedio. Muestra la cantidad de agua que fluye por metro superficial de membrana en una hora (lmh).
 - Caudal de alimentación. Será el agua, en m³/día que debe suministrar el pozo de captación. Estos pozos serán dimensionados a partir de este valor.
 - Caudal de rechazo. Será la cantidad de agua de rechazo (salmuera) que se produce en la operación de desalación. Dependerá del índice de conversión que se utilice.
- *Edad membrana.* La vida útil de una membrana suele rondar los 6 años, aunque dependerá de diversos parámetros de uso. El rendimiento disminuye de forma paulatina con el paso de los años. Por ello, se debe dimensionar con un rendimiento medio. La membrana tendrá 3,6 años de uso (valor comúnmente utilizado en la bibliografía consultada)
- *Disminución del flujo por año.* Se debe determinar el porcentaje de pérdida de flujo que tendrá la membrana por año. Según la bibliografía consultada, un porcentaje común es 5%. La edad de la membrana y la disminución del flujo por año estarán relacionadas con el factor de ensuciamiento.
 - Factor de ensuciamiento. Al igual que con el tratamiento químico, el programa automatiza el factor de ensuciamiento. Será siempre inferior a 1. En este caso es de 0,831.
- *Incremento de paso de sales por año.* La pérdida de rendimiento también se ve afectada por el incremento de paso de sales por año. Suele tener un rango entorno al 10% aunque dependerá del material de la membrana. Se considera 7% en el estudio dado el continuo uso de este valor en la bibliografía consultada.

Se muestra el interfaz del programa una vez se han introducido todos los valores.

Trenes		Paso1	Paso1
pH alimentación		<input type="text" value="7,00"/>	Producto químico <input type="text" value="HCl"/>
Conversión	%	<input type="text" value="45,00"/>	Concentración de la solución,% <input type="text" value="100"/>
Flujo/tren de permeado,	<input type="text" value="m3/d"/>	<input type="text" value="1850,0"/>	Tasa de dosificación de productos químic <input type="text" value="mg/l"/>
Flujo promedio	<input type="text" value="lmh"/>	<input type="text" value="16,5"/>	Edad membrana <input type="text" value="años"/>
Caudal de alimentación,	<input type="text" value="m3/d"/>	<input type="text" value="4111,1"/>	Disminución Fluj <u>por año</u> <input type="text" value="5"/>
Caudal de rechazo	<input type="text" value="m3/d"/>	<input type="text" value="2261,1"/>	<u>Factor de ensuciamiento</u> <input type="text" value="0,831"/>
			Incremento de paso de sales/año, % <input type="text" value="7,0"/>

Figura 2. 7. Interfaz de trenes. Fuente: IMSDesing

2.3.3. Especificación del sistema

En este apartado se define el tipo de membrana a utilizar. Por tanto, se estudian las diferentes ofertas disponibles en la empresa. Entrando a su página web de Hydranautics se encuentra un catálogo de productos.

En función de la tecnología existen diferentes tipos de membrana. La clasificación en función de la aplicación es la siguiente:



Figura 2. 8. Membranas de separación.
Fuente: Membranes



Figura 2. 9. Membrana de ultrafiltración.
Fuente: Membranes

Reverse Osmosis (RO)



*Figura 2. 11. Membrana de ósmosis inversa.
Fuente: Membranes*

Nanofiltration (NF)



*Figura 2. 10. Membrana de nanofiltración.
Fuente: Membranes*

Se elige la serie de ósmosis inversa. Dentro de esta tecnología se presentan cuatro membranas diferentes, especializada cada una de ellas en un sector distinto.

1. *SWC (Sea Water Composite)*.
Membranas específicas para la desalación de agua salada. Dentro de estas se encuentran tres variables. Serán las elegidas para el estudio.



Figura 2. 12. Membrana SWC. Fuente: Membranes



Figura 2. 13. Membrana CPA. Fuente: Membrane

2. *CPA (Composite Polyamide)*. Este tipo de membranas es utilizado en industrias que necesitan una pureza de agua elevada, por ejemplo, la farmacéutica o la eléctrica entre otras.

3. *ESPA (Energy Saving Polyamide)*. Son idóneas para aplicaciones en las que se busca una eficiencia energética debido a la pureza del agua de alimentación, por ejemplo, agua potable o de procesos industriales.



Figura 2. 14. Membrana ESPA. Fuente: Membrane



Figura 2. 15. Membrana LFC. Fuente: Membrane

4. *LFC (Low Fouling Composite)*. Esta membrana proporciona una carga de superficie neutra que reduce las incrustaciones cuando se tratan aguas residuales y aguas superficiales con un alto potencial de contaminación.

Finalmente se elige la serie SWC porque su tecnología encaja perfectamente con este proyecto. Analizando el catálogo se comprueba que existen tres tipos de membranas para esta aplicación: la serie SWC4, la serie SWC5 y la serie SWC6. Estudiándolas por separado.

1. *SWC4*. Son usadas comúnmente para rechazar aguas marinas o altamente salobres. Proporciona además bajos niveles de TDS. Se encuentran dos modelos, SWC4-LD y SWC4 MAX. La versión MAX proporciona 40,9 m² de área activa en comparación con los 37,2 m² que tiene la versión LD. De esta forma se mejora la eficiencia energética y se aumenta el rechazo de sales.
2. *SWC5*. Se eligen cuando se necesitan niveles bajos de TDS y presiones de alimentación más bajas. Las membranas SWC5 ofrecen una mayor eficiencia energética a un menor costo. Son las más comunes en las plantas desaladoras. En este caso existen tres modelos, SWC5 LD, SWC5 MAX y SWC5-LD-4040. Las dos primeras membranas presentan la misma superficie de área activa que los modelos de la serie anterior. Sin embargo, la versión SWC5-LD-4040 reduce sus

dimensiones, tanto estructurales como superficiales. Tan solo 7,43 metros cuadrados de área activa.

3. SWC6. Se prefieren cuando la temperatura del agua de mar alimentación es más baja, lo que requiere altas presiones de alimentación. Presentan los mismos modelos que la serie SWC4. Aparecen la membrana SWC6 LD y la SWC6 MAX con características estructurales iguales a las dos series anteriores.

Dado que las tres presentan unas propiedades idóneas para ser elegidas en un sistema de desalación, se decide indagar más sobre las posibilidades que brinda cada una de ellas. Se consultan las fichas técnicas en la web de la empresa, pero únicamente en su versión MAX al presentar mejores rendimientos.

Para unas condiciones de prueba determinadas e igualitarias las características de cada membrana son:

1. El caudal de permeado varía aun teniendo la misma superficie activa. La serie SWC4 MAX disipa 27,3 m³/día. La serie SWC5 MAX tiene un flujo de permeado de 37,5 m³/día. Por último, la serie SWC6 MAX presenta un rango de valores. El flujo mínimo se establece en 25 m³/día y el máximo en 50 m³/día.
2. En cuanto a la eficiencia en el rechazo de sales, la SWC4 MAX y la SWC5 ofrecen un 99,8% con un valor mínimo de 99,7%. La serie SWC6 aumenta su eficiencia en relación con el caudal. Su rango se encuentra entre 99,6% (99,4%) para los 25 m³/día y 99,8% (99,7%) para los 50 m³/día.
3. Por último, las presiones de uso para la serie SWC6 se encuentran entre 4,1-5,4 MPa.

Siguiendo estas condiciones, a priori, la membrana que presenta mejores condiciones de uso para esta aplicación es la serie SWC5. Sus parámetros de funcionamiento se sitúan entre las series SWC4 y SWC6. Sin embargo, a la hora de dimensionar, el software muestra la posibilidad de escoger todas las membranas idóneas para el agua “Pozo Mar Convencional”.

Para Todas las Membranas (Mar Pozo Convencional)										
Modelo	Producción nominal (GPD)	Rechazo de sal,%	Tipo de elemento	Tamaño (in x in)	Área (Pies Cuadrados)	Espaciador (mil)	Presión de prueba (psi)	Presión de alimentación (bar)	Perm	TD (mg)
C	SWC-2540	625	99,40	SWRO High Rejection	2,0 X 40	26	28	800		
C	SWC5-LD4040	1750	99,70	SWRO High Rejection Low ...	4 X 40	80	34	800		
C	SWC4 MAX	7200	99,80	SWRO Highest Rejection	8 X 40	440	28	800		
C	SWC4-LD	6500	99,80	SWRO High Rejection Low ...	8 X 40	400	34	800		
C	SWC5 MAX	9900	99,80	SWRO High Rejection	8 X 40	440	28	800		
C	SWC5-LD	9000	99,80	SWRO High Rejection Low ...	8 X 40	400	34	800		
C	SWC6 MAX	6600	99,60	SWRO Highest Flow	8 X 40	440	28	600		
C	SWC6-LD	6000	99,60	SWRO High Flow Low Dp	8 X 40	400	34	600		
C	SWC5-1640	35000	99,80	SWRO High Rejection	16 X 40	1670	28	800		

Figura 2. 16. Membranas según tipología de agua. Fuente: IMSDesing

Se comprueba que existe una membrana que atrae la atención, la serie SWC5-1640. Presenta un área activa bastante mayor que el resto de las membranas. La principal ventaja que presentará la utilización de esta serie será la disminución del número de elementos por tubos de presión y elementos de presión.

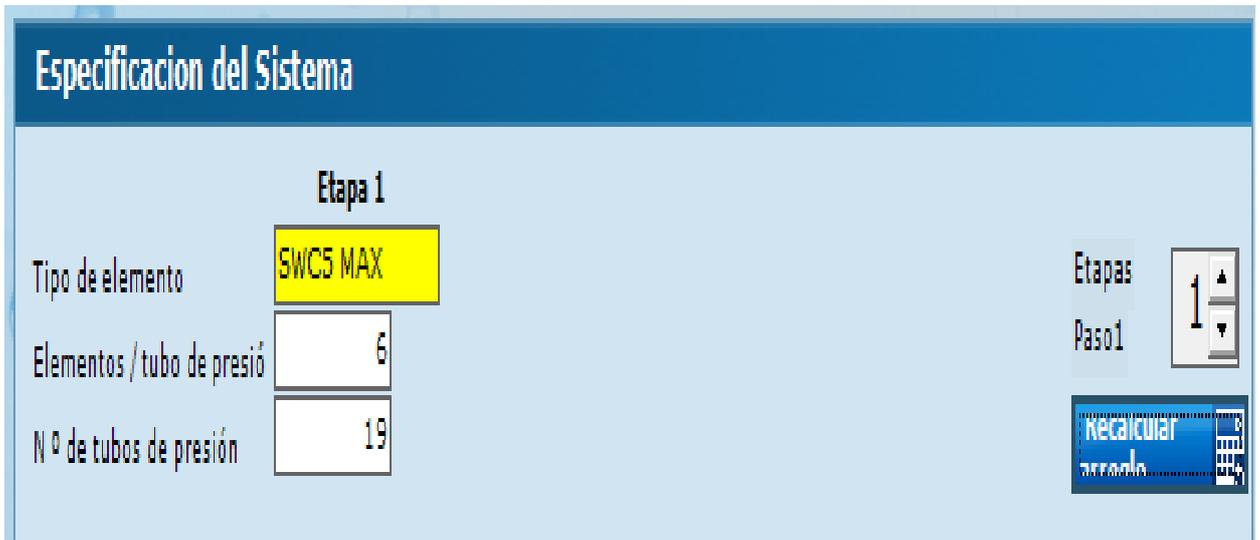
No obstante, después de consultar con el tutor académico y recabar información en diversas fuentes se determina que este tipo de membrana es utilizada en plantas de gran producción. Se observa en la Figura 2.16. como el diámetro se duplica u el flujo de producción nominal aumenta considerablemente en comparación con el resto de las membranas a estudiar.

Se han realizado una serie de simulaciones con esta membrana, siendo la que presenta mejores rendimientos (menor consumo específico en forma de bombeo, menor número de tubos de presión y menor número de elementos por tubo de presión), sin embargo, se estaría desaprovechando parte del potencial que puede brindar este equipo, por ejemplo, en la cantidad de agua producto que puede desalar. Por tanto, se decide descartarla en este proyecto siendo recomendada en plantas con una producción mucho mayor.

En este caso, dado que las membranas SWC4 MAX y SWC5 MAX son las que presentan mejores prestaciones para esta aplicación, se llevará a cabo una comparación en condiciones de estudio equitativas.

El estudio será estructurado en los siguientes pasos. Con ayuda del software de Hydranautics:

1. Se determina el número de tubos de presión y elemento de presión por tubo. Los tubos de presión serán los recipientes que albergarán los módulos de las membranas. Estos dependerán del caudal de permeado y de las características técnicas de las membranas. El programa ajusta las cantidades, tanto de tubos de presión como elementos de presión por tubo de forma automática, aunque para el cálculo final se realizará de forma manual para obtener la configuración más idónea. Únicamente se debe seleccionar la membrana y pulsar el botón de “Recalcular arreglo”. Se muestran los resultados a continuación.



Especificación del Sistema

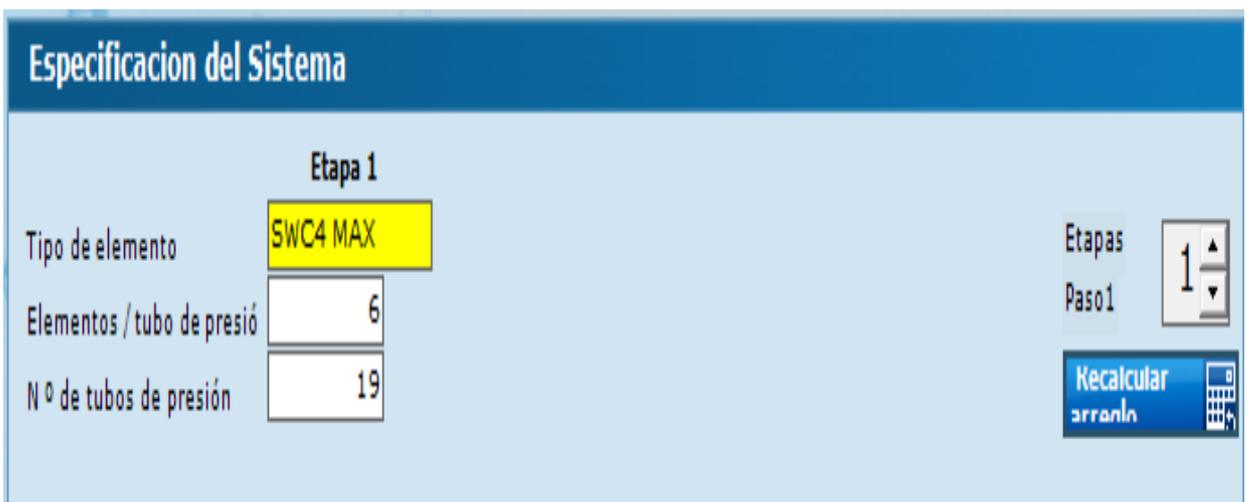
Etapa 1

Tipo de elemento	SWC5 MAX
Elementos / tubo de presión	6
Nº de tubos de presión	19

Etapas Paso1 1

Recalcular arreglo

Figura 2. 17. Determinación del número de tubos de presión y elementos de presión por tubo SWC5 MAX.
Fuente: IMSDesing



Especificación del Sistema

Etapa 1

Tipo de elemento	SWC4 MAX
Elementos / tubo de presión	6
Nº de tubos de presión	19

Etapas Paso1 1

Recalcular arreglo

Figura 2. 18. Determinación del número de tubos de presión y elementos de presión por tubo SWC4 MAX.
Fuente: IMSDesing

2. *Resultados de cálculos de permeado y de rechazo.* Se conocerán las condiciones químicas finales del agua producto y del rechazo para cada membrana. Se debe asegurar que no se superan los parámetros químicos establecidos en la Tabla 2.1. Los más significativos para los cultivos son el boro (0-2 mg/l) y el TDS (0-2000 mg/l). También se muestran los valores de funcionamiento, observando la presión necesaria en el flujo de alimentación, así como la presión del flujo de rechazo que será determinante para el sistema de recuperación de energía. Para obtener los parámetros, una vez recalculada la membrana, se clica sobre la casilla de “Ejecutar” y automáticamente muestra los resultados. Además, si se pulsa la casilla “Diagrama de Flujo” se abre una ventana que contiene una representación gráfica del sistema de ósmosis inversa. Se mostrarán, punto a punto, todos los valores de funcionamiento del proceso. Se podrá analizar, por ejemplo, la información del pozo de captación entre otros. A continuación, se muestran los resultados obtenidos y los esquemas gráficos facilitados.

Resultados de Cálculo (Flows are per vessel)								
Arreglo	Tubo de presión	Alimentación (bar)	Conc (bar)	Alimentación (m3/h)	Conc (m3/h)	Flujo (lmh)	Flujo maximo	Beta maximo
1-1	19	69	67,7	9,01	4,96	16,5	26,5	1,05

Concentración de permeado

Calcio	0,396	K	2,483	Sr	0,009	Cl	84,548	P04	0,000	CO2	7,766
Mg	1,351	NH4	0,000	HCO3	1,032	NO3	0,021	SiO2	0,003	CO3	0,000
Na	52,296	Ba	0,000	SO4	3,128	F	0,009	B	0,772	pH	5,3
						Br	0,003			TDS	146,05 mg/l

Saturaciones del rechazo y parámetros

CaSO4, %	53	SrSO4, %	76	Presión osmotica	52,1 bar	pH	7,3
BaSO4, %	174	SiO2, %	2	CCPP	96,68 mg/l	TDS	72422,0 mg/l
Ca3(PO4)2 SI	0,00	CaF2, %	151				

Figura 2. 19. Resultado de cálculo SWC4 MAX. Fuente: IMSDesing

Resultados de Cálculo (Flows are per vessel)								
Arreglo	Tubo de presión	Alimentación (bar)	Conc (bar)	Alimentación (m3/h)	Conc (m3/h)	Flujo (lmh)	Flujo maximo	Beta maximo
1-1	19	62,3	61,1	9,01	4,96	16,5	29,7	1,05

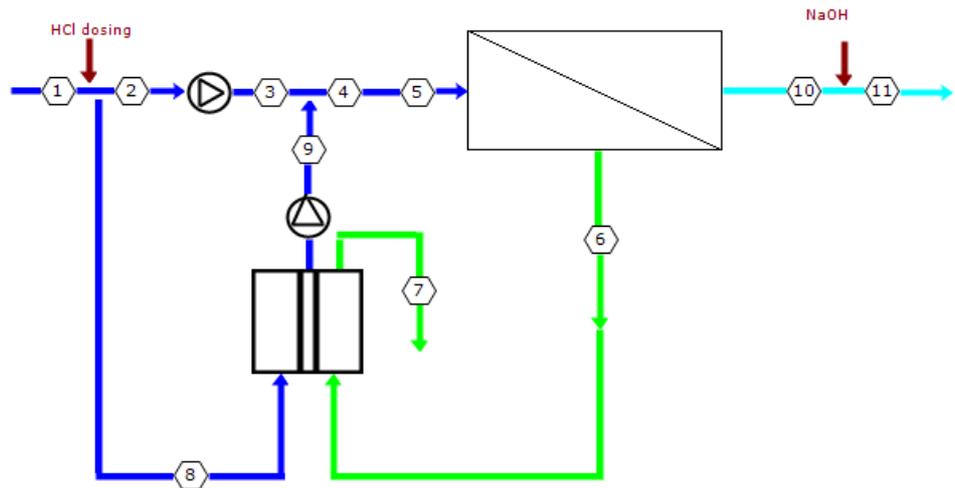
Concentración de permeado

Calcio	0,557	K	3,493	Sr	0,013	Cl	118,967	P04	0,000	CO2	7,766
Mg	1,901	NH4	0,000	HCO3	1,451	NO3	0,029	SiO2	0,005	CO3	0,000
Na	73,584	Ba	0,000	SO4	4,404	F	0,013	B	1,280	pH	5,5
						Br	0,004			TDS	205,70 mg/l

Saturaciones del rechazo y parámetros

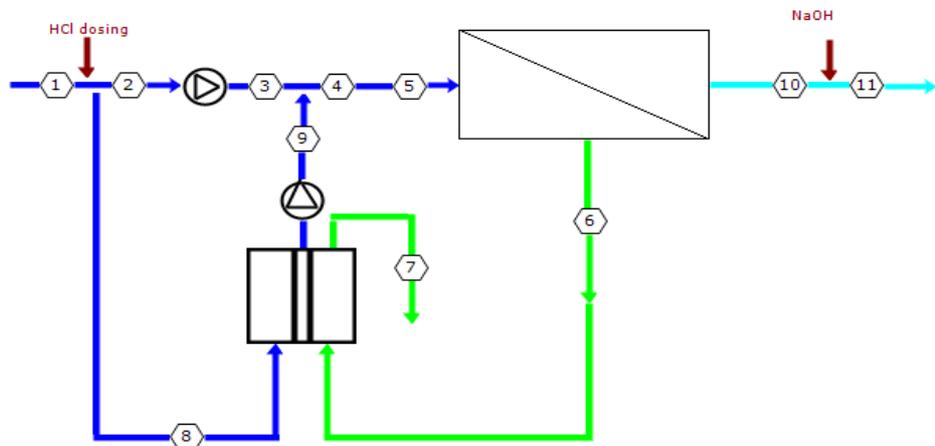
CaSO4, %	53	SrSO4, %	77	Presión osmotica	52,0 bar	pH	7,3
BaSO4, %	174	SiO2, %	2	CCPP	96,49 mg/l	TDS	72384,0 mg/l
Ca3(PO4)2 SI	0,00	CaF2, %	150				

Figura 2. 20. Resultado de cálculo SWC5 MAX. Fuente: IMSDesing



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Caudal (m ³ /h)	171	78,0	78,0	171	171	94,3	94,3	93,3	93,3	77,1	77,1
Presión (bar)	0	0	69,0	69,0	69,0	67,7	0	0	69,0	0	0
TDS (mg/l)	38824	38823	38823	39921	39921	72422	70406	38823	40839	146	156
pH	8,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,28	7,28	7,00	7,00	5,33	6,74
Econd (µs/cm)	60106	60102	60102	61705	61705	108405	105541	60102	63043	315	327

Figura 2. 22. Esquema gráfico SWC4 MAX. Fuente: IMSDesing



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Caudal (m ³ /h)	171	78,0	78,0	171	171	94,2	94,2	93,3	93,3	77,1	77,1
Presión (bar)	0	0	62,3	62,3	62,3	61,1	0	0	62,3	0	0
TDS (mg/l)	38824	38823	38823	39920	39920	72384	70370	38823	40837	206	216
pH	8,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,28	7,28	7,00	7,00	5,48	6,77
Econd (µs/cm)	60106	60102	60102	61703	61703	108354	105493	60102	63040	443	454

Figura 2. 21. Esquema gráfico SWC5 MAX. Fuente: IMSDesing

3. *Análisis del consumo específico.* Un parámetro que determinará el coste de producción del agua será el consumo específico. Aunque no será un dato definitivo porque no se conocen los equipos de bombeo y de recuperación de energía, servirá de ayuda para tener una idea del gasto energético.

Cálculo de potencia		Paso1	ERD Impulsar
Bomba / incremento de presión	bar	69,0	1,8
Caudal de producto	m3/d	1850,0	
Caudal bomba	m3/d	1871,3	2239,8
Rendimiento bomba	%	87,0	87,0
Rendimiento motor	%	95,0	95,0
Eficiencia variador frecuencia	%	97,0	97,0
Potencia/etapa/paso	kw	186,0	5,7
	BHP	249,4	7,6
Potencia total de bombeo	kw	191,7	
Potencia específica de bombeo	kwh/m3	2,49	

Figura 2. 23. Cálculo de potencia SWC4 MAX.
Fuente: IMSDesing

Cálculo de potencia		Paso1	ERD Impulsar
Bomba / incremento de presión	bar	62,3	1,7
Caudal de producto	m3/d	1850,0	
Caudal bomba	m3/d	1871,7	2239,4
Rendimiento bomba	%	87,0	87,0
Rendimiento motor	%	95,0	95,0
Eficiencia variador frecuencia	%	97,0	97,0
Potencia/etapa/paso	kw	168,0	5,6
	BHP	225,2	7,4
Potencia total de bombeo	kw	173,6	

Figura 2. 24. Cálculo de potencia SWC5 MAX.
Fuente: IMSDesing

Se realiza una tabla con los valores obtenidos y se comparan ambas membranas. Después, se dimensiona el recuperador de energía y se recalculan todos los parámetros. Finalmente se obtiene una conclusión con la membrana más idónea para esta planta de desalación.

	SWC4 MAX	SWC5 MAX
Área activa	40,9 m ²	40,9 m ²
Elementos/tubo	6	6
Número de tubos	19	19
Boro	0,772 mg/l	1,280 mg/l
TDS	146,05 mg/l	205,7 mg/l
Presión de alimentación	69 bar	62,3 bar
Presión de rechazo	67,7 bar	61,1 bar
Potencia bombeo	191,7 kW	173,6 kW
Potencia bombeo sin ERD	398,6 kW	359,9 kW
Potencia específica	2,49 kWh/m ³	2,25 kWh/m ³
Potencia específica sin ERD	5,17 kWh/m ³	4,67 kWh/m ³

Tabla 2. 3. Tabla comparativa de membranas. Fuente: Elaboración propia.

Se debe aclarar que estos resultados son productos de un dimensionado predeterminado por parte del programa. Proporciona unos valores de rendimiento, tanto de las bombas como del recuperador de energía, comunes. Estos pueden diferir de los parámetros de funcionamiento de los equipos que se utilicen.

Observando los resultados obtenidos, se comprueba que tanto la membrana SWC4 MAX como la SWC5 MAX poseen la misma área activa con un valor de 40,9 metros cuadrados. Realizando el ajuste automático de número de tubos y elementos por tubos de presión, el software los establece iguales para ambas membranas. Se tendrán 19 tubos de presión con 6 membranas en cada tubo, aunque no serán definitivos.

En cuanto a las propiedades químicas resultantes en el agua producto ambas membranas cumplen con los requisitos mencionados en la Tabla 2.1. Por tanto, se deben estudiar otros aspectos significativos para determinar cuál presenta mejores rendimientos.

Los valores de presión se encuentran en rangos comunes para las plantas de desalación. 69 bar para la serie SWC4 MAX y 62,3 bar para la serie SWC5 MAX. Estos resultados estarán relacionados con la presión de bombeo que deben ejercer las bombas y por consiguiente con el consumo específico de la planta.

El valor de potencia específica se reduce de la serie SWC5 MAX a la serie SWC4 MAX únicamente en 24 décimas. Sin embargo, por pequeña que sea la diferencia puede significar un ahorro en el coste económico de producción.

Se duplican los resultados si se realiza la simulación sin ERD. De 2,49 a 5,17 kWh/m³ para la serie SWC4 MAX y de 2,25 a 4,67 kWh/m³ para la serie SWC5 MAX. Se descarta esta última opción de manera inmediata.

Considerando estos aspectos, se lleva a cabo el dimensionado del sistema de recuperación de energía y, a posteriori, se manifiesta la decisión tomada respecto a la elección definitiva de la membrana.

2.4. Dispositivo de recuperación de energía (ERD)

Una reducción en el consumo específico, por mínima que sea, puede suponer un ahorro económico importante. Si se analiza el flujo de rechazo se comprueba que tiene, prácticamente, la misma presión que el fluido de alta presión. La presión de esta última no se pierde en el interior de las membranas, sino que el flujo de rechazo tiene esa misma presión menos las pérdidas de carga que produce el paso de las membranas. Dado que el flujo de rechazo será devuelto al mar, lo idóneo es transferir esa energía al flujo de alimentación de las membranas reduciendo así el trabajo correspondiente a las bombas. Por esta razón se decide instalar un dispositivo de recuperación de energía.

En la industria existen diferentes tipos de intercambiadores de presión, sin embargo, los sistemas más utilizados son los intercambiadores de presión de tipo rotativo, que proporcionan rendimientos significativamente altos.

Analizando y comparando los fabricantes de estos equipos se comprueba que el principal proveedor es Energy Recovery Inc (ERI). Esta compañía proporciona soluciones con una eficiencia notorias que hacen que lideren este sector industrial. Además, brinda un documento Excel para el dimensionado del recuperador de energía. Se muestra el proceso a seguir para seleccionar el intercambiador de presión adecuado.

1. *Valores necesarios.* Se representan con una celda en color rojo los parámetros que se deben introducir. Estos son obtenidos del software de IMSDesing. Se muestran en la siguiente tabla los datos de las membranas a estudiar.

	SWC4 MAX	SWC5 MAX
Temperatura de alimentación	21°C	21°C
Presión de alimentación	69 bar	62,3 bar
Presión de rechazo	67,7 bar	61,1 bar
Factor de conversión	45%	45%
Salinidad de alimentación	38824 mg/l	38824 mg/l
Salinidad de permeado	146,05 mg/l	205,7 mg/l
Caudal de permeado	77,1 m ³ /h	77,1 m ³ /h

Tabla 2. 4. Valores de dimensionado ERD. Fuente: IMSDesing

2. *Introducción de datos.* La Figura 2.25 y en la Figura 2.26 muestran el interfaz del programa para las membranas SWC5 MAX y SWC5 MAX respectivamente.

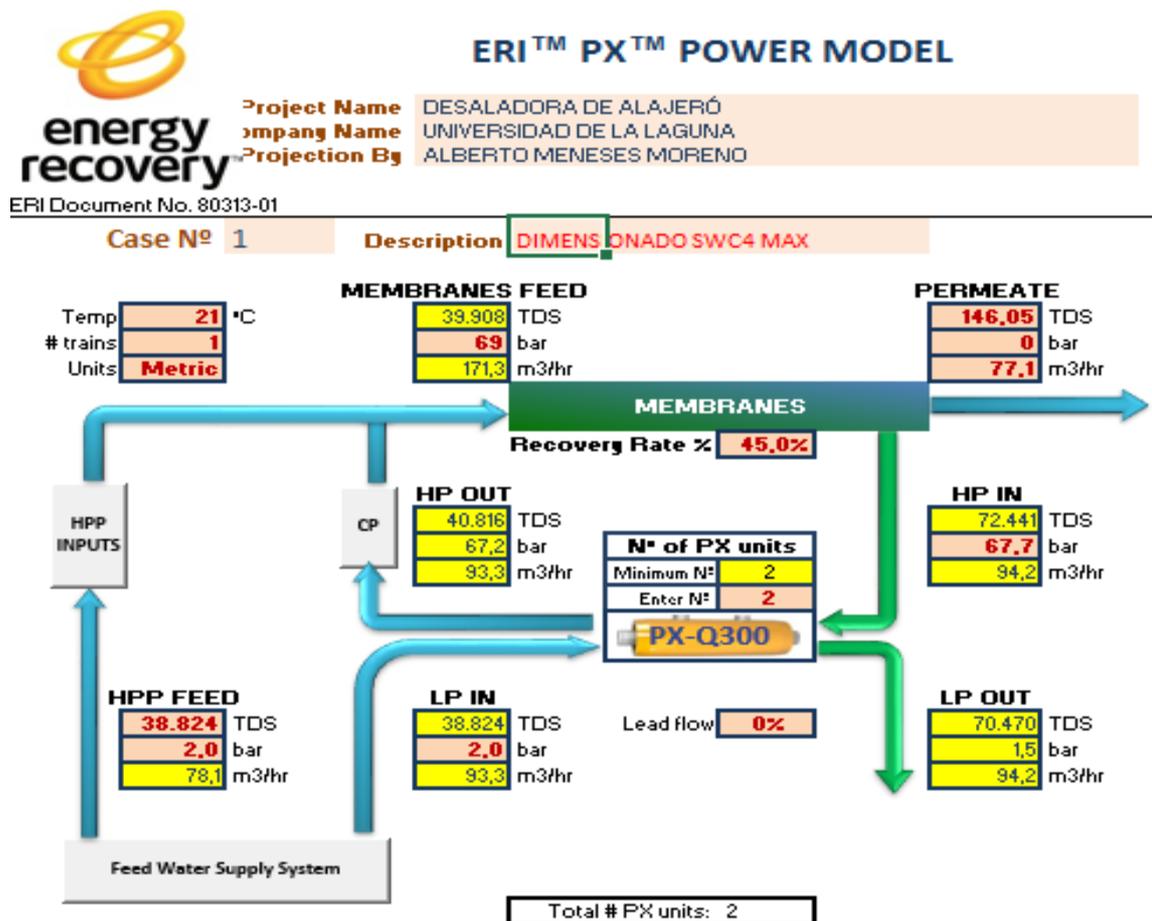


Figura 2. 25. Resultado dimensionado ERD SWC4 MAX. Fuente: Energy Recovery

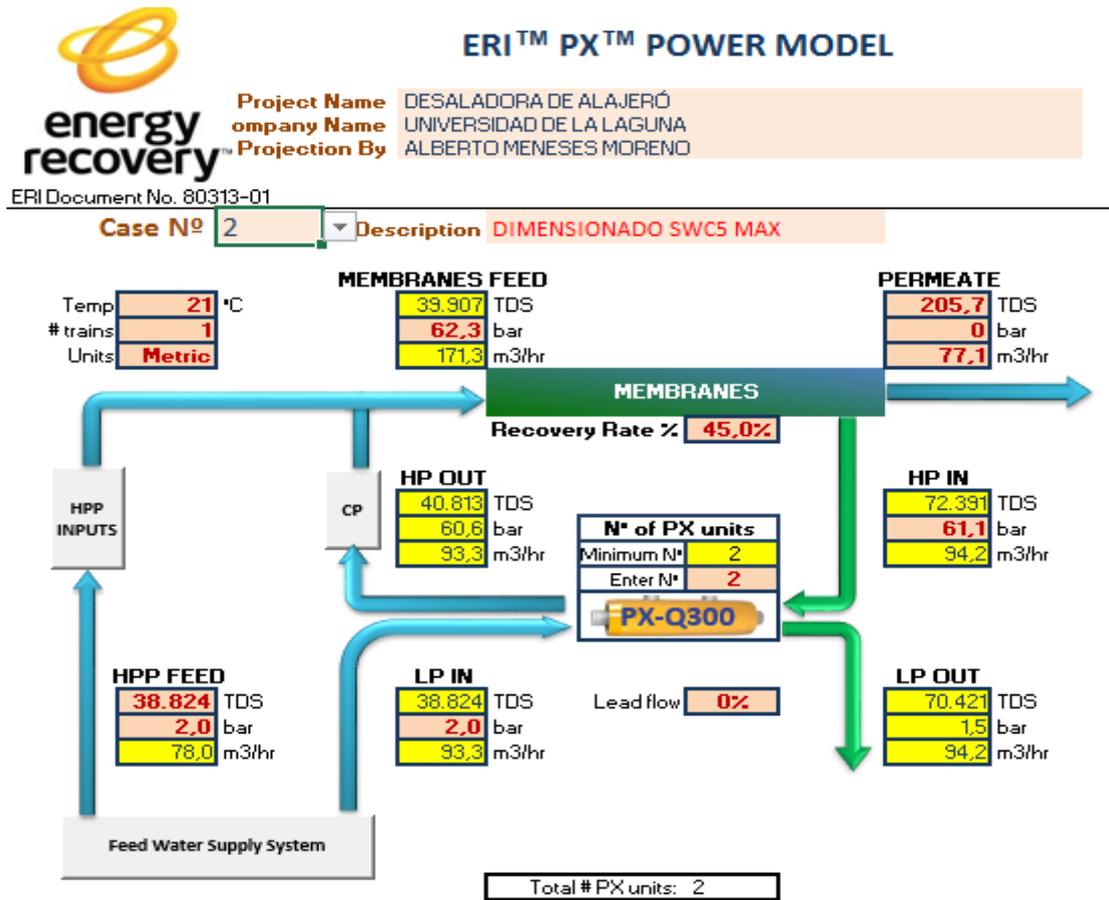


Figura 2. 26. Resultado dimensionado ERD SWC5-MAX. Fuente: Energy Recovery

3. *Análisis de resultado.* Una vez calculado el intercambiador se comprueban los resultados. Para ambas membranas el intercambiador de presión elegido es el modelo PX-Q300. Proporciona los mejores rendimientos dentro de la serie PX. El programa realiza esta elección de forma automática obligando a tener un mínimo de dos intercambiadores de presión para trabajar en los parámetros de rendimiento óptimos.

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 2. 27. Rendimiento PX-Q300. Fuente: Energy Recovery

Imposibilita el uso de un tercero por encontrarse un flujo de rechazo menor a 45,4 m³/h. No obstante, este sistema requiere del uso de una bomba auxiliar que permita aumentar la presión del fluido hasta la requerida por la membrana.

4. *Datos IMSDesing.* Existen valores que los requeridos por el programa de Hydranautics y se relacionan con el recuperador de energía. Estos son, el porcentaje de fuga, la mezcla volumétrica y la diferencia de presiones entre la entrada y la salida del intercambiador. Para obtenerlos se consultan los parámetros de funcionamiento brindados por el programa de Excel.

PX Technology Performance	
PX unitary flow	47,1 m ³ /hr
Salinity Increase at membranes	2,8%
Volumetric mixing VM	5,9%
Lubrication flow (LF) per PX array	1,0 m ³ /hr
LF as % of concentrate flow	1,0%
HP DP	0,5 bar
LP DP	0,5 bar
RO Specific Energy **	2,35 kWh/m ³
Brine Recovery Efficiency	98,28%
Overall PX Efficiency	97,70%

** Does not Include Feedwater Supply Pump Energy consumption

Figura 2. 29. Rendimiento ERD SWC4 MAX.
Fuente: Energy Recovery

PX Technology Performance	
PX unitary flow	47,1 m ³ /hr
Salinity Increase at membranes	2,8%
Volumetric mixing VM	5,9%
Lubrication flow (LF) per PX array	0,9 m ³ /hr
LF as % of concentrate flow	1,0%
HP DP	0,5 bar
LP DP	0,5 bar
RO Specific Energy **	2,17 kWh/m ³
Brine Recovery Efficiency	98,30%
Overall PX Efficiency	97,67%

** Does not Include Feedwater Supply Pump Energy consumption

Figura 2. 28. Rendimiento ERD SWC5 MAX.
Fuente: Energy Recovery

Los parámetros del intercambiador PX-Q300 que deben ser introducidos en la casilla ERD del software IMSDesing son los siguientes.

	SWC4 MAX	SWC5 MAX
Porcentaje de fuga	1%	1%
Mezcla volumétrica	5,9%	5,9%
H.P. diferencial	0,5 bar	0,5 bar

Tabla 2. 5. Resumen parámetros PX-Q300. Fuente: Elaboración propia.

Se ha decidido comparar los resultados obtenidos con otro fabricante de recuperadores de energía. Una empresa que también desarrolla este tipo de equipos es Danfoss.

Este fabricante, a diferencia de Energy Recovery Inc, presenta un equipo de recuperación de energía que tiene una bomba adjunta al bloque del propio intercambiador de presión permitiendo el aumento la transferencia deseada en un único equipo.

Se realizan una serie de simulaciones con el documento Excel que facilita el fabricante. El programa funciona de manera similar al anterior. Se rellenan una serie de casillas con los datos necesarios y se ajustan los parámetros de funcionamiento de forma equitativa para tener las mismas condiciones de trabajo en ambos equipos.

<i>CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO</i>			
<i>Rendimiento bomba</i>	<i>Captación</i>	<i>Alta presión</i>	<i>ERD</i>
<i>Bomba</i>	87	87	87
<i>Motor</i>	95	95	95
<i>VFD</i>	97	97	97

Tabla 2. 6. Condiciones de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia

La configuración del programa selecciona de forma automática el recuperador de energía más apropiado para el caso de estudio. Además, te brinda la opción de sugerirte un modelo de bomba de alta presión desarrollado por la misma empresa.

Se muestran los datos obtenidos para cada membrana, que serán comparados con resultados obtenidos para el recuperador de energía de la otra compañía.

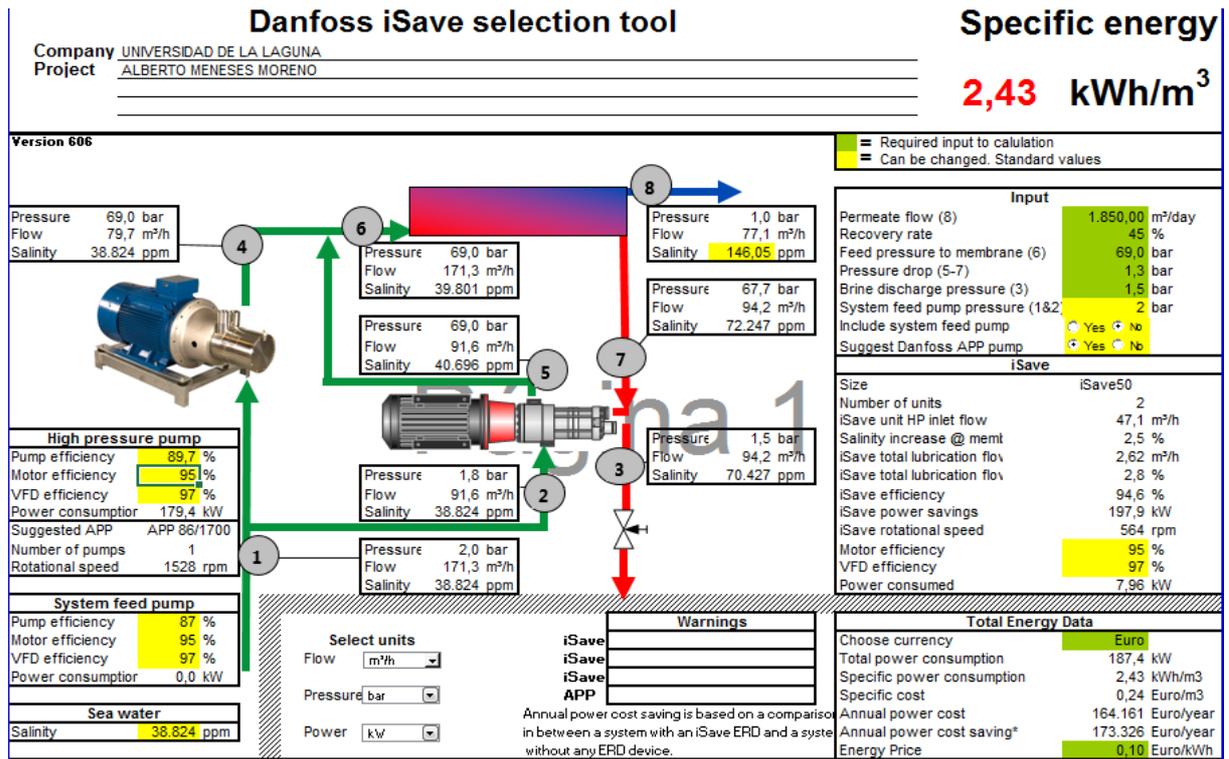


Figura 2. 31.Resultado dimensionado ERD SWC4 MAX. Fuente: Danfoss

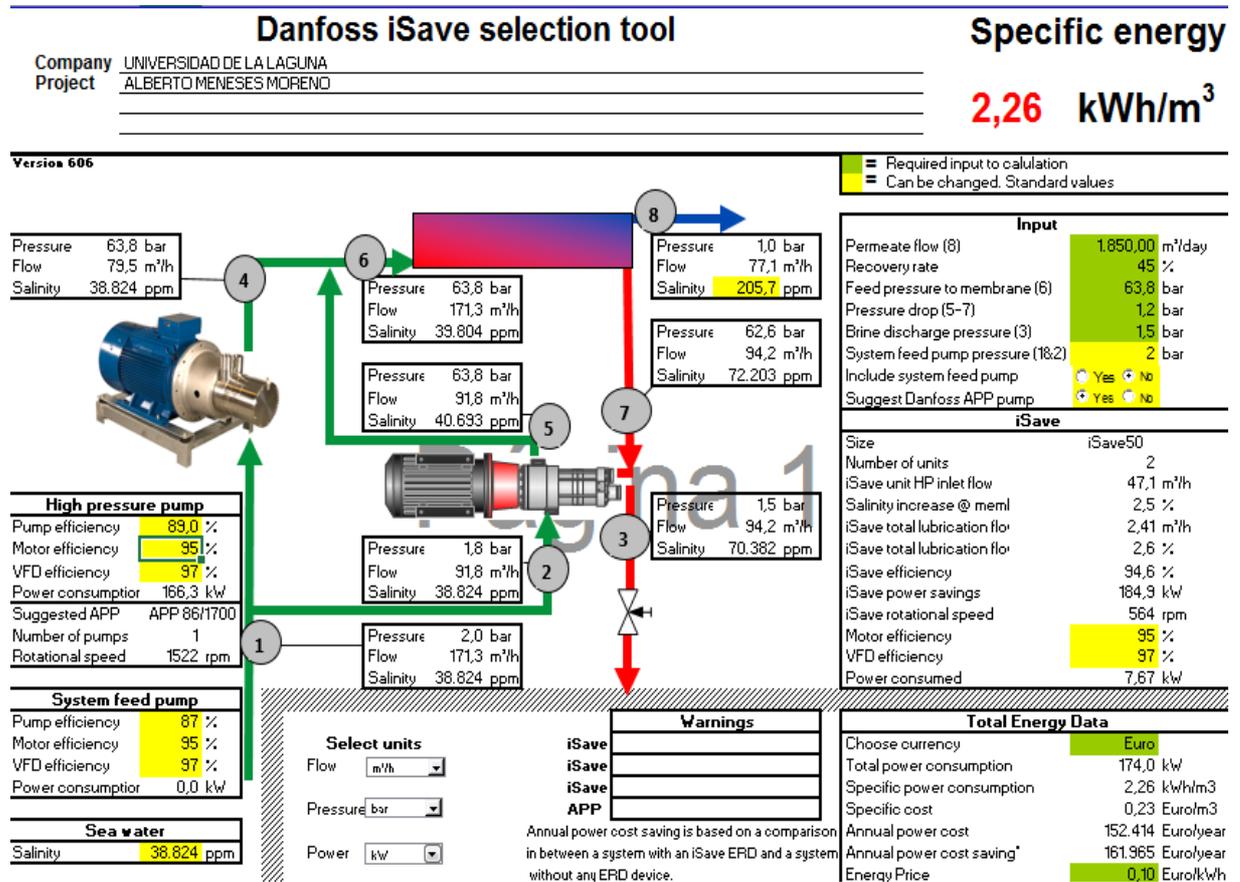


Figura 2. 30.Resultado dimensionado ERD SWC5 MAX. Fuente: Danfoss

Si se analizan los resultados se comprueba que para ambas membranas el recuperador de energía elegido por el programa ha sido iSave50. De igual forma, la bomba de alta presión que se ha obtenido es el modelo APP 86/1700.

Si se comparan ambos fabricantes se obtienen una serie de conclusiones.

1. Los consumos específicos disminuyen para ambos equipos. La membrana SWC5 MAX tiene un menor consumo que la membrana SWC4 MAX como ya sucedió en el dimensionado de IMSDesing. Para el programa de ERI, encontramos valores de 2,17 frente a 2,35 kWh/m³ respectivamente. Por otro lado, el documento de Danfoss nos brinda, 2,26 frente a 2,43 kWh/m³ respectivamente. Será el primero el que tenga un menor consumo específico.
2. Desde otra perspectiva, los rendimientos del recuperador de energía son, aunque de forma escasa, más elevados en el modelo de Energy Recovery Inc. Se tendrá un 98% en el modelo PX-Q300 frente a un 94% en el modelo iSave50.

Por tanto, observando la información recogida con cada uno de los intercambiadores de presión, el modelo que más se ajusta a este proyecto es el PX-Q300 de la empresa Energy Recovery Inc porque brinda un menor consumo específico. Se instalarán 2 equipos en el sistema de ósmosis inversa.

2.5. Reanálisis mediante IMSDesing

A continuación, se realiza una iteración del dimensionado de membranas introduciendo los datos del recuperador de energía en el programa de IMSDesing.



Cálculos ERD		
<input checked="" type="radio"/> Intercambiador de presión <input type="radio"/> Turbo		
Fuga	1,00	%
Mezcla volumétrica	5,90	%
H.P. diferencial	0,50	bar
Bomba booster	1,72	bar

Figura 2. 32. Valores reajuste ERD SWC4 MAX y SWC5 MAX.
 Fuente: IMSDesing

Se ejecuta el dimensionado y se obtienen los nuevos parámetros de funcionamiento.

	<i>SWC4 MAX</i>	<i>SWC5 MAX</i>
<i>Potencia total de bombeo</i>	191,4 kW	173,6 kW
<i>Potencia específica de bombeo</i>	2,48 kWh/m ³	2,25 kWh/m ³

Tabla 2. 7. Valores de funcionamiento tras reajuste. Fuente: Elaboración propia

Se comprueba que a priori los valores de funcionamiento no cambian al introducir los parámetros del recuperador de energía. Esto es porque el programa en el primer dimensionado supuso unos valores estándares para el intercambiador de presión que son muy parecidos a los obtenidos en el modelo PX-Q300.

3. Elección de la membrana

Después de realizar y comparar todos los datos obtenidos en los diferentes dimensionados se concluye que la membrana que presenta mejores condiciones para este proyecto es la **SWC5 MAX**.

En cuanto a propiedades de agua producto, ambas membranas cumplen con los requisitos, siendo en este caso más restrictiva para las partículas sólidas y el boro la membrana SWC4 MAX, sin embargo, como no existe una ley que determine unos máximos de elementos químicos en el agua para cultivo se considera que la membrana SWC5 MAX también cubrirá estas necesidades. (Tabla 2.1.)

Por otro lado, el coste de económico de adquisición es igual para ambas membranas, 813 dólares cada unidad.

No obstante, el parámetro que más peso ha tenido en la decisión ha sido el consumo específico. En este aspecto la balanza se inclina hacia la membrana SWC5 MAX. Este valor determinará, como se ha mencionado reiteradamente, el coste de producción de la planta, así como el aporte energético que deben suministrar la energía eólica.

Por último, se ha realizado un nuevo reajuste en el número de tubos de presión y elementos de tubo de presión en busca de obtener un consumo específico menor. Se ha obtenido un consumo específico de 2,18 kWh/m³ instalando **7 elementos por tubo de presión en un tren con 19 tubos de presión**. En total se aumentan 19 membranas quedando un total de 133 en comparación con las 114 que tenía la configuración anterior. No obstante, se disminuye significativamente el consumo y el coste por metro cúbico de la planta. Se muestran los

parámetros finales del núcleo de membranas. En este caso, el recuperador de energía no sufre ninguna variación con respecto al calculado anteriormente.

	SWC5 MAX
Área activa	40,9 m ²
Elementos/tubo	7
Número de tubos	19
Conversión	45%
Boro	1,491 mg/l
TDS	241,20 mg/l
Presión de alimentación	60 bar
Presión de rechazo	58,6 bar
Potencia bombeo	167,8 kW
Potencia específica	2,18 kWh/m ³
Recuperador de energía	PX-Q300
Número de unidades PX	2

Tabla 2. 8. Parámetros finales. Fuente: Elaboración propia.

Se deberá realizar un último reajuste cuando se conozcan los parámetros de funcionamiento de las bombas. Este cálculo se realizará en el *anexo III, Dimensionado de almacenamiento, bombas, tuberías y tratamientos*.

4. Conclusiones

Analizando los valores obtenidos a lo largo del estudio:

1. Se ha elegido la membrana SWC5 MAX del fabricante Hydranautics después de estudiar las posibilidades que brinda.
2. Se instalarán dos equipos de recuperación de energía. Será el modelo PX-300Q de la marca Energy Recovery Inc.
3. En busca del menor consumo específico posible el tren de permeado constará de 7 elementos por tubo de presión en un tren con 19 tubos de presión. Se tendrán 133 membranas.
4. Los parámetros químicos del agua producto cumplen con los requisitos mínimos establecidos en la bibliografía consultada.

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA,
TITULACIONES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

ANEXO III

**DIMENSIONADO DE
ALMACENAMIENTO, BOMBAS,
TUBERÍAS Y TRATAMIENTOS**

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

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

AUTOR: Alberto Meneses Moreno

TUTOR: Vicente José Romero Ternero.

ÍNDICE ANEXO III

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. SISTEMA DE CAPTACIÓN	2
2.1. TOMAS DE CAPTACIÓN.....	2
2.2. POZOS DE CAPTACIÓN.....	3
2.3. UBICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN.....	3
2.4. PROFUNDIDAD DE CAPTACIÓN.....	6
2.5. TUBERÍAS DE CAPTACIÓN	8
3. PRETRATAMIENTO.....	11
4. BOMBAS SUMERGIBLES DE CAPTACIÓN.....	13
4.1. BALANCE DE ENERGÍA	13
4.2. PÉRDIDAS DE CARGA.....	15
4.3. SELECCIÓN DE BOMBA	22
5. BOMBAS DE ÓSMOSIS INVERSA	27
5.1. BOMBAS DE ALTA PRESIÓN	27
5.1.1. <i>Balace de energía</i>	27
5.1.2. <i>Selección de bomba</i>	30
5.2. BOMBA AUXILIAR TIPO BOOSTER.....	32
5.2.1. <i>Balace de energía</i>	32
5.2.2. <i>Selección de bomba</i>	34
6. POSTRATAMIENTO.....	38
6.1. BOMBA POSTRATAMIENTO.....	39
6.2. BALANCE DE ENERGÍA	39
6.3. SELECCIÓN DE BOMBA	40
7. ALMACENAMIENTO HÍDRICO	44
7.1. ALMACENAMIENTO INFERIOR.....	45
7.2. ALMACENAMIENTO SUPERIOR	46
8. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA	49
8.1. DISTRIBUCIÓN INFERIOR	49
8.1.1. <i>Diseño distribución inferior</i>	49
8.1.2. <i>Tubería de distribución inferior</i>	51

8.1.3.	<i>Balance de energía</i>	52
8.1.4.	<i>Pérdidas de carga</i>	53
8.1.5.	<i>Selección de bomba</i>	53
8.2.	DISTRIBUCIÓN SUPERIOR	60
8.2.1.	<i>Diseño distribución superior</i>	60
8.2.2.	<i>Tubería de distribución superior</i>	63
8.2.3.	<i>Balance de energía Tramo 1</i>	63
8.2.4.	<i>Selección de bomba Tramo 1</i>	64
8.2.5.	<i>Balance de energía Tramo 2</i>	65
8.2.6.	<i>Selección de bomba Tramo 2</i>	66
9.	SISTEMA DE RECHAZO DE SALMUERA	67
9.1.	TUBERÍA DE RECHAZO.....	68
9.2.	BALANCE DE ENERGÍA.....	69
9.3.	PÉRDIDAS DE CARGA.....	69
10.	CONSUMO TOTAL Y ESPECÍFICO	71
10.1.	CONSUMO SISTEMA DE CAPTACIÓN.....	71
10.2.	CONSUMO NÚCLEO DE MEMBRANAS.....	72
10.3.	CONSUMO DISTRIBUCIÓN.....	73
11.	CONCLUSIONES	75

ÍNDICE FIGURAS ANEXO III

Figura 3. 1. Ubicación de planta desaladoras. Fuente: Google Earth.....	4
Figura 3. 2. Distribución pozos de captación. Fuente: Elaboración propia.....	5
Figura 3. 3. Ubicación y distribución de los pozos. Fuente: Elaboración propia en imagen de Google Earth.....	6
Figura 3. 4. Valores de pleamar y bajamar. Fuente: Puertos del Estado.....	7
Figura 3. 5. Diámetros de tubería PRFV. Fuente: Ollearis	10
Figura 3. 6. Procesos de pretratamiento típicos de agua de mar. Fuente: Lenntech	11
Figura 3. 7. Interfaz del programa Excel para cálculo de pérdidas de carga. Fuente: Juan E. González Fariñas.....	17
Figura 3. 8. Viscosidad cinemática del agua de mar. Fuente: MIT.....	18
Figura 3. 9. Accesorios totales en tubería de captación y alimentación. Fuente: Elaboración propia	18
Figura 3. 10. Datos de entrada. Fuente: Documento Excel	19
Figura 3. 11. Pérdidas de carga totales. Fuente: Documento Excel	19
Figura 3. 12. Calculador de densidad del agua. Fuente: Easycalculation	20
Figura 3. 13. Modelo SP 160 3. Fuente: Grunfos.....	22
Figura 3. 14. Curvas características Grundfos SP 160-3. Fuente: Grundfos.....	23
Figura 3. 15. Modelo K10 170. Fuente: Wilo Select.....	23
Figura 3. 16. Curvas características Wilo K10 170. Fuente: Wilo Select.....	24
Figura 3. 17. Modelo UPA 250C 150. Fuente: KSB.....	24
Figura 3. 18. Curvas características UPA 250C-150. Fuente: KSB.....	25
Figura 3. 19. Modelo Z10 275. Fuente: Lowara.....	25
Figura 3. 20. Curvas características Z10 275. Fuente: Lowara.....	26
Figura 3. 21. Bomba KSB Multitec RO. Fuente: KSB	30
Figura 3. 22. Curvas características KSB Multitec RO. Fuente: KSB	31

Figura 3. 23. Parámetros de funcionamiento. Fuente: Energy Recovery Inc.....	32
Figura 3. 24. Lowara LNEE 80 125. Fuente: Lowara	34
Figura 3. 25. Curvas características Lowara LNEE 80 125. Fuente: Lowara	35
Figura 3. 26. Modelo Wilo Movitec 9501. Fuente: Wilo.....	35
Figura 3. 27. Curvas características Wilo Movitec 9501. Fuente: Wilo	¡Error!

Marcador no definido.

Figura 3. 28. Curvas características Wilo Movitec 9501. Fuente: Wilo	36
Figura 3. 29. Modelo KSB Etaline 80. Fuente: KSB ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 3. 30. Curvas características KSB Etaline. Fuente: KSB.....	36
Figura 3. 31. Bomba Grundfos Modelo NGBE 80. Fuente: Grundfos	37
Figura 3. 32. Curvas características Grundfos NGBE 80. Fuente: Grundfos.....	37
Figura 3. 33. Curvas características KSB ETANORM. Fuente: KSB	40
Figura 3. 34. Curvas características Lowara ESHE 80 250. Fuente: Lowara	41
Figura 3. 35. Curvas características Wilo Movitec 9503. Fuente: Wilo	42
Figura 3. 36. Curvas características Grundfos NBE 50 200. Fuente: Grundfos	43
Figura 3. 37. Almacenamiento hídrico de Playa de Santiago. Fuente: Google Earth ..	45
Figura 3. 38. Red de tuberías Alajeró. Fuente: Grafcan.....	47
Figura 3. 39. Almacenamiento hídrico presa de Canabria. Fuente: Google Earth.....	48
Figura 3. 40. Distribución red de tuberías. Fuente: Google Earth.....	50
Figura 3. 41. Diámetros de tubería PRFV. Fuente: Ollearis	51
Figura 3. 42. Perfil de elevación inferior. Fuente: Google Earth	52
Figura 3. 43. Pérdidas de carga distribución inferior. Fuente: Excel	53
Figura 3. 44. Curvas características KSB Movitec V F060. Fuente: KSB.....	54
Figura 3. 45. Curvas características Lowara LNEE 50 160. Fuente: Lowara	55
Figura 3. 46. Curvas características Wilo Helix VE 3602. Fuente: Wilo	56
Figura 3. 47. Curvas características Grundfos Modelo CRE 20-3. Fuente: Grundfos.	57

Figura 3. 48. Distribución final. Fuente: Google Earth.....	58
Figura 3. 49. Bomba Lowara Resiboost. Fuente: Lowara.....	60
Figura 3. 50. Curvas características Lowara RESIBOOST. Fuente: Lowara	60
Figura 3. 51. Recorrido tuberías de distribución superior. Fuente: Google Earth.....	61
Figura 3. 52. Perfil de elevación Tramo 2. Fuente: Google Earth.....	62
Figura 3. 53. Perfil de elevación Tramo 1. Fuente: Google Earth.....	62
Figura 3. 54. Lowara MPAE65A. Fuente: Lowara	64
Figura 3. 55. Curvas características Lowara MPAE65A. Fuente: Lowara	65
Figura 3. 56. Curvas características Lowara MPAE65A. Fuente: Lowara	67
Figura 3. 57. Sistema de rechazo. Fuente: Google Earth	68
Figura 3. 58. Pérdidas de carga sistema de rechazo. Fuente: Excel	69
Figura 3. 59. Cálculo de potencia y consumo. Fuente: IMSDesing	73

ÍNDICE TABLAS ANEXO III

Tabla 3. 1. Valores generales. Fuente: Elaboración propia	17
Tabla 3. 2. Tabla de valores de bomba BAP. Fuente: Elaboración propia.....	28
Tabla 3. 3. Datos para dimensionado de BAP. Fuente: Elaboración propia	30
Tabla 3. 4. Tabla de valores de bomba BAP. Fuente: Elaboración propia.....	33
Tabla 3. 5. Datos para dimensionado de BAP. Fuente: Elaboración propia	34
Tabla 3. 6. Tabla de valores de bomba BAP. Fuente: Elaboración propia.....	39
Tabla 3. 7. Datos para dimensionado de BAP. Fuente: Elaboración propia	40
Tabla 3. 8. Tanques de almacenamiento. Fuente: Elaboración propia.....	46
Tabla 3. 9. Datos para dimensionado de distribución. Fuente: Elaboración propia.....	54
Tabla 3. 10. Clasificación de tuberías de distribución inferior. Fuente: Elaboración propia.....	59
Tabla 3. 11. Datos para dimensionado de bomba. Fuente: Elaboración propia	59
Tabla 3. 12. Datos para dimensionado de distribución superior Tramo 1. Fuente: Elaboración propia	64
Tabla 3. 13. Datos para dimensionado de distribución superior Tramo 2. Fuente: Elaboración propia	66
Tabla 3. 14. Resumen equipos de bombeo. Fuente: Elaboracion propia	70
Tabla 3. 15. Consumo núcleo de membranas de forma manual. Fuente: Elaboración propia.....	72
Tabla 3. 16. Consumo distribución. Fuente: Elaboración propia.....	74
Tabla 3. 17. Consumo total y específico con porcentajes. Fuente: Elaboración propia.	75

1. Introducción

En este Anexo se llevará a cabo el dimensionado del sistema de almacenamiento, la distribución de agua y la elección de las bombas de la planta de desalación.

Se tratará de buscar las soluciones más eficientes para el proyecto. Si se sigue como criterio el recorrido que tiene el fluido desde los pozos de captación hasta el depósito de almacenamiento, se podría clasificar este Anexo en cuatro bloques:

1. *Pozos de captación, sistema de pretratamiento y bombas de impulsión.* Se comienza analizando el sistema de captación. En este caso se diferencia el dimensionado del número de pozos de alimentación, las bombas de impulsión y las tuberías de captación. También se incluirá el sistema de pretratamiento que se utilizará para reducir el pH del agua de alimentación según las recomendaciones del fabricante de membranas o eliminar partículas existentes en el agua.
2. *Bombas de alta presión y auxiliares.* Seguido irá la elección de las bombas de alta presión del núcleo de membranas. También se dimensionará la bomba auxiliar requerida por el recuperador de energía, elegido en *el Anexo II, Dimensionado del núcleo de membranas y recuperador de energía para ósmosis inversa*. Se estudiarán las pérdidas de carga encontradas en el recorrido y se seleccionarán las bombas que proporcionen los mejores parámetros de rendimiento.
3. *Sistema de postratamiento, depósitos de almacenamiento, equipos de distribución y sistema de rechazo.* Se lleva a cabo la distribución del fluido. Se garantizará un agua producto con las condiciones idóneas para regadío, ajustando los parámetros químicos mediante un sistema de postratamiento. Seguido se analiza el sistema de distribución y se dimensiona el tamaño mínimo del sistema de almacenamiento utilizado para abastecer de agua los cultivos en los meses de parada de la planta, programados en el Anexo I, *dimensionado de las necesidades hídricas de los cultivos*. Por último, se describirá el sistema de rechazo para el permeado.
4. *Análisis final de consumo.* Una vez se han elegido los equipos de bombeo se ajustan los parámetros de rendimiento para obtener el consumo final de la planta

de desalación. Este último servirá para dimensionar el sistema de producción eléctrico y comprobar la viabilidad del proyecto en el aspecto económico.

2. Sistema de captación

Se comienza analizando el sistema de captación. Se estudiará el tipo de toma de captación, el dimensionado de los pozos de captación, las bombas de impulsión y el sistema de pretratamiento para:

- Garantizar el caudal de agua de mar necesario para el bastidor de membranas.
- Garantizar unos requisitos mínimos en cuanto a calidad del agua para aumentar la vida útil de los equipos de desalación e impulsión y disminuir los costes económicos relacionados con el mantenimiento de la planta.
- Disminuir al mínimo el impacto ambiental de los pozos de captación, el sistema de distribución y el emisario de rechazo.

2.1. Tomas de captación

Comúnmente, la captación de agua de mar se realiza por dos procesos diferentes, captación abierta o captación cerrada.

El caudal de alimentación está relacionado con el caudal de producción. Dado el pequeño caudal que debe producir la planta de desalación, en comparación con los suministrados por las grandes plantas, el caudal de alimentación no será muy elevado. Por ello, el tipo de captación más recomendado para estas situaciones es la toma cerrada mediante pozos.

El agua, en su recorrido desde el mar hasta el pozo, mejora sus propiedades físicas y químicas mediante un proceso de filtrado natural por parte del terreno costero y marino. Utilizando este tipo de captación se obtiene:

- Disminución de partículas sólidas en suspensión. El terreno hace de filtro eliminando gran parte de los sólidos disueltos que pueden producir un deterioro en los equipos de desalación.
- Mínima actividad biológica y orgánica. Se minimiza la actividad biológica y orgánica aumentando la vida útil de las membranas al ser elementos bastante

perjudiciales para estas. Además, se reducen costes económicos relacionados con procesos de pretratamientos.

- Baja concentración de oxígeno disuelto.
- Temperaturas estables. Una de las ventajas que presentan los pozos de captación es la gran estabilidad física y química que presenta el agua de alimentación. La temperatura se mantiene constante a lo largo del año.

No obstante, también posee una serie de inconvenientes:

- Posible presencia de importantes concentraciones de hierro, manganeso, sílice y aluminio.
- Posible contaminación por nitratos y plaguicidas.
- Composición química bastante estable, aunque sujeta a variaciones temporales o estacionales por contacto con otros acuíferos. Por ejemplo, en nuestro caso, cabe la posibilidad de contaminación de agua dulce en las épocas de mayor precipitación.

Una vez se ha elegido el tipo de captación que tendrá la planta de desalación se deben dimensionar los pozos de captación.

2.2. Pozos de captación.

A continuación, se lleva a cabo el dimensionado de los pozos de captación, estudiando las características más idóneas para la planta de desalación. Después de realizar el dimensionado del núcleo de membranas, el software determinó un caudal mínimo de alimentación. En este caso, los pozos deben suministrar ***4111,11 metros cúbicos de agua al día.***

Por tanto, se debe considerar la ubicación, el número de pozos y la distribución que deben seguir para alcanzar ese valor de caudal.

2.3. Ubicación y distribución

La ubicación de los pozos de captación determina, tanto la calidad del agua como la dimensión de los mismos. Se requiere de un estudio topográfico que determine las condiciones del terreno que se presentan en la zona, sin embargo, no se cuenta con los conocimientos

pertinentes para interpretar este tipo de informes. Por ello, se ha decidido interpolar esta información de otras plantas con parámetros de funcionamiento similares a la nuestra.

Dada la existencia de una desaladora privada que se encuentra próxima a la ubicación del proyecto, se ha decidido extraer información sobre el sistema de captación de esta. Después de consultar los aspectos técnicos con el encargado de la planta se obtiene que:

- La desaladora posee un único pozo de captación.
- El pozo se encuentra ubicado muy próximo al mar.
- El terreno presenta características orográficas y geotécnicas muy similares.
- La profundidad del pozo de captación es de 40 metros, utilizando bombas sumergibles para la impulsión del agua hacia la estación de desalación.

A continuación, se muestra una imagen con la ubicación real de la desaladora privada (circunferencia derecha) y la ubicación propuesta para este proyecto (circunferencia izquierda).



Figura 3. 1. Ubicación de planta desaladoras. Fuente: Google Earth

Por tanto, siguiendo las consideraciones mencionadas se cree correcto aproximar el sistema de captación al existente en la desaladora privada. No obstante, se realizarán una serie de modificaciones.

Se implantarán dos pozos de captación, los cuales estarán provistos de bombas sumergibles. Además, para reducir el riesgo de sobreexplotación tanto de los pozos (causante de la disminución de rendimiento) como de la bomba (disminuye la vida útil del equipo), se

implantará un funcionamiento alternativo, es decir, se impulsa agua desde un pozo mientras el otro se encuentra en reserva o viceversa. Con esta medida se asegura el funcionamiento de la planta de forma continua evitando el cese de producción en caso de avería o mantenimiento por parte de las bombas.

Conocido el número de pozos a construir se debe elegir la ubicación y distribución de estos. Según recomendaciones, tanto del tutor como de la bibliografía consultada, para evitar el tránsito de flujo entre un pozo y otro, debe existir una distancia mínima de unos 30-35 metros. En este caso, se ubicarán con 30 metros de separación y siguiendo una distribución lineal.

La conexión será provista de un colector, en forma de T. Este se colocará encima de la boca del pozo izquierdo evitando de esta forma la colocación de dos accesorios (si no fuese así se debe conectar un colector y un codo de 90°).

En cuanto a longitudes, existirán 240 metros desde los pozos de captación hasta la planta de desalación. La siguiente figura representa gráficamente las dimensiones de la distribución.

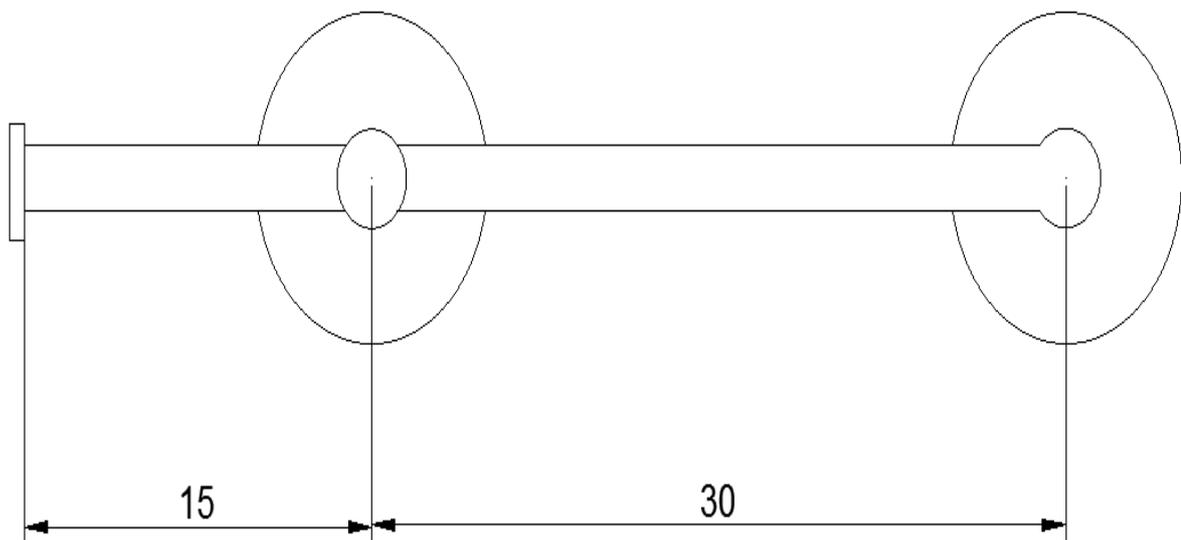


Figura 3. 2. Distribución pozos de captación. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.3. se observa la ubicación real que tendrán los sistemas de captación sobre el terreno. Las circunferencias azules representan los pozos mientras que las líneas describen el recorrido de las tuberías de distribución hasta la planta de desalación.

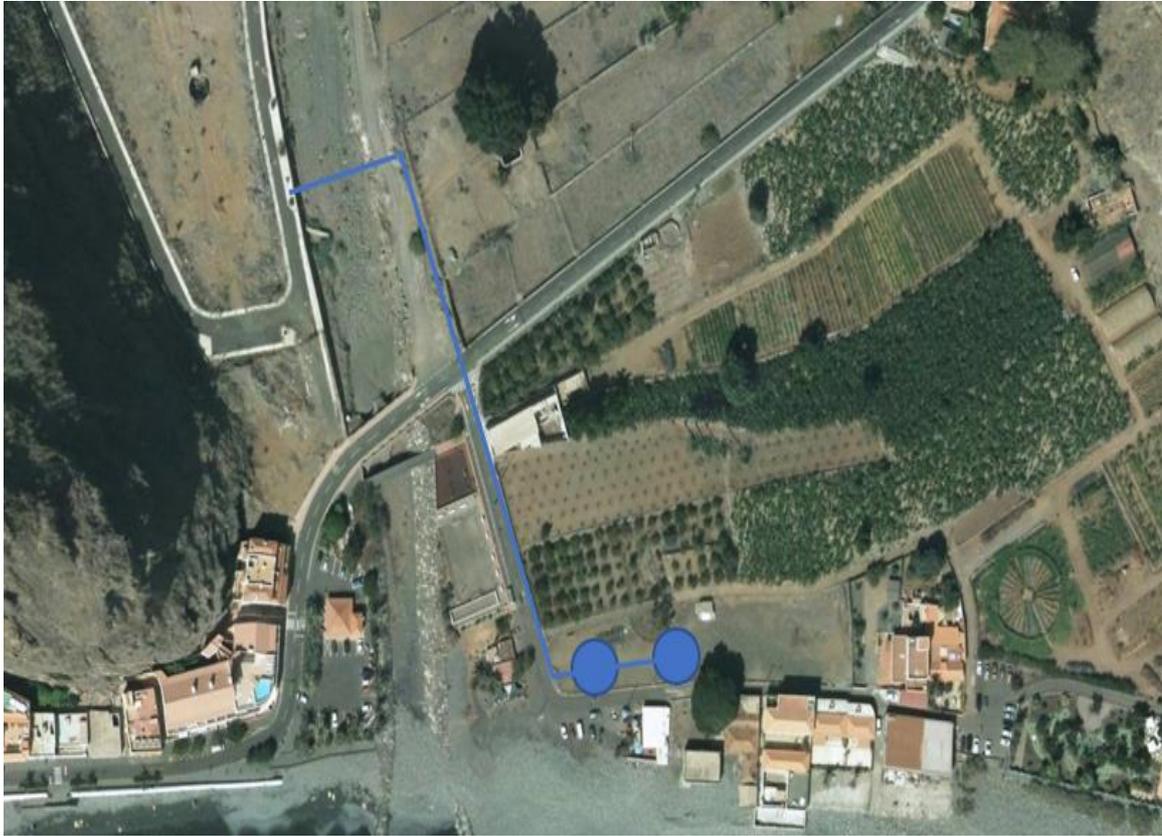


Figura 3. 3. Ubicación y distribución de los pozos. Fuente: Elaboración propia en imagen de Google Earth

2.4. Profundidad de captación

Por otro lado, los pozos tendrán 40 metros de profundidad, siguiendo el criterio establecido en la planta de desalación privada.

No obstante, se debe calcular la ubicación de las bombas dentro de estos para asegurar que se encuentran en todo momento sumergidas. Se evita de esta manera el indeseable efecto de la cavitación, tan perjudicial para los equipos de estas características mecánicas.

Para poder realizar el cálculo se debe conocer:

- La altura sobre el nivel del mar.
- Las pérdidas de carga debida a la filtración del terreno.

- Pérdidas de carga debido al cono de succión.
- La bajamar máxima de la zona.

Se comienza analizando la altura que tendrá el pozo de captación sobre el nivel del mar. Para ello se hace uso de la herramienta gráfica que posee Google Earth. Posicionando el cursor sobre la zona deseada el programa describe las coordenadas geográficas del lugar.

En este caso, las bocas de los pozos de captación estarán a una cota de 4,1 metros aproximadamente.

Por otro lado, las pérdidas de carga debidas a la filtración del terreno y al cono de succión no son posibles de medir. Se considera un metro para cada caso.

Para acabar, la bajamar máxima refleja el nivel de marea más bajo que se tendrá en la zona. Este valor dependerá de las condiciones lunares y se podrá estimar haciendo uso del mareógrafo situado en el Puerto de San Sebastián de La Gomera. Esta información se encuentra disponible en la Red de Mareógrafos existente en la web de *Puertos del Estado*, en el apartado nivel del Mar. Se reflejan en la Figura 3.3. los valores máximos y mínimos históricos generados en el informe estadístico.

	Niveles (cm)							
	Observados				Marea astronómica			
	Máx	Mín	Med	D.E.	Máx	Mín	Med	D.E.
Pleamar	255	128	190	22	249	134	189	21
Bajamar	126	5	65	21	122	10	66	21
Pleamar viva	254	191	222	13	249	196	220	12
Bajamar viva	82	5	38	14	63	10	39	13
Pleamar muerta	204	128	159	12	176	134	156	9
Bajamar muerta	126	72	98	10	122	79	98	9

Figura 3. 4. Valores de pleamar y bajamar. Fuente: Puertos del Estado

Se puede observar que el valor máximo de bajamar que se va a tener en la zona es de 1,26 metros. Se dará por bueno este valor dada la proximidad existente entre ambos puertos.

Obtenidos los valores se comprueba que la profundidad mínima que debe tener la bomba sumergible es de **9,36 metros**. Sin embargo, sabiendo que el pozo tendrá 40 metros de profundidad se decide ubicar la bomba a una profundidad de 25 metros para asegurar que se encuentra sumergida en todo momento.

Conociendo las dimensiones del sistema de captación se procede a estudiar el diámetro de las tuberías. Será necesario para determinar las pérdidas de carga y, por último, elegir un modelo de bomba sumergible que satisfaga nuestras necesidades.

2.5. Tuberías de captación

Como se reflejó en el apartado anterior, se encuentran dos tipos de tuberías. Las tuberías de captación, que tendrán una longitud de 25 metros en vertical y 30 metros en horizontal. Serán las encargadas de trasladar el agua desde el pozo hasta el colector. Y, por otro lado, las tuberías de distribución, que serán las encargadas de trasladar el caudal hacia el núcleo de membranas con una longitud total de 230 metros.

Ambas tuberías se fabricarán del mismo material. Los más utilizados en este tipo de aplicaciones son el polietileno de alta densidad (PEAD) y el poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Aunque ambos materiales cumplen con los requisitos mecánicos se ha decidido utilizar el PRFV porque se ajusta más a las necesidades existentes:

- Los tubos de PRFV están constituidos por distintas capas, cada una de ellas tiene una función específica. Las materias primas básicas con las que se fabrican son resina de poliéster insaturado, fibras de vidrio y cargas inertes. Esta estructuración brinda un material con alta resistencia mecánica aun sin perjudicar su flexibilidad. Considerando que las tuberías serán enterradas en una zona de tránsito de vehículos, serán idóneas para este proyecto.
- Considerando el alto índice de salinidad del agua de mar se debe elegir un material que no sea corrosible. Este tipo de tuberías tiene una larga vida útil. Además, no precisa de revestimientos u otros medios de protección contra la corrosión.
- Es un material muy ligero, siendo la cuarta parte del peso del acero. Abarata los costes de transporte y facilita la manipulación en obra.
- Los costes de bombeo se reducen debido al bajo índice de rugosidad. Las capas interiores presentan una superficie lisa.

Definido el material se calcula el diámetro de la tubería. Para ello se sigue el criterio establecido por Bonnet. Establece que el diámetro mínimo que debe tener la tubería se aproxima a la siguiente expresión:

$$D_{\text{mín}} = 0,835 * Q^{\frac{2}{5}}$$

Ecuación 3 Criterio de Bonnet.

Se debe conocer el caudal en los tramos de tubería. En este caso, el programa de membranas nos refleja un caudal de alimentación de **4111,11 metros cúbicos al día**. Este valor será el requerido, tanto en la tubería de captación como en la de distribución porque se consideró que la extracción será alterna. Por tanto, el caudal de alimentación (Q_a) como el caudal de captación (Q_{cap}) será el mismo. Las unidades requeridas son metros cúbicos por segundo. Convirtiendo el día a segundos queda como:

$$Q_a = Q_{\text{cap}} = 4111,11 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}} = 0,04758 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Si se sustituye en la expresión de Bonnet, el diámetro mínimo será:

$$D_{\text{mín}} = 0,835 * 0,04758^{\frac{2}{5}} = 0,2469 \text{ mm}$$

Además, se ha querido corroborar este valor. Se ha comparado el resultado utilizando un método alternativo existente en el libro Técnicas de Riego de José Luis Fuentes Yagüe, (José Luis Fuentes Yagüe, “Cálculo de tuberías” en “*Técnicas de Riego*, Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi-Prensa, 1996, 163-166). En este caso considera:

$$Q = \frac{3,1416 * D^2 * V}{4}$$

Ecuación 4 Cálculo del diámetro mínimo.

Donde,

- Para diámetros de 150 mm a 350 mm la velocidad óptima esta comprendida entre 1 y 1,5 m/s.
- El caudal se expresa en metros cúbicos por segundo.

Por tanto, si se supone, por ejemplo, una velocidad de 1,25 m/s, el diámetro mínimo necesario se calcula según:

$$0,04758 \frac{m^3}{s} = \frac{3,1416 \times D^2 \times 1,25 \frac{m}{s}}{4}$$

El diámetro mínimo será de 220,14 mm. Se comprueba que guarda relación con el anterior.

Una vez se conocen los diámetros teóricos se debe consultar el catálogo de algún fabricante y seleccionar una tubería que cumpla con los requisitos. Se ha elegido la empresa Ollearis por ser una empresa española con más de 80 años de historia. Como describe en su página web *“Ollearis S.A ha ido adaptando sus productos y servicios a las necesidades de sus clientes, implementando nuevos materiales, nuevas tecnologías y los últimos avances en controles de calidad, para siempre garantizar el mejor servicio.”*

La tubería de PRFV proporciona los siguientes diámetros. Se comprueba en la Figura 3.5. que el diámetro inmediatamente superior al resultado es 250 mm.

DN	L	ESPESOR "E"				
		PN2.5	PN4	PN6	PN10	PN16
25	6000	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
32	6000	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
40	6000	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
50	6000	5.0	5.0	5.0	5.0	6.0
65	6000	5.0	5.0	5.0	5.0	6.5
80	6000	5.0	5.0	5.0	5.0	6.0
100	9000	5.0	5.0	5.0	5.5	7.0
125	10000	5.0	5.0	5.0	6.0	8.0
150	10000	5.0	5.0	5.0	6.5	9.0
200	12000	5.0	5.0	6.0	8.0	10.5
250	12000	5.0	5.0	6.5	9.0	13.0
300	12000	5.0	5.5	7.5	10.5	15.0
350	12000	5.0	6.0	8.0	11.5	17.5
400	12000	5.5	6.5	9.0	13.0	19.5
450	12000	5.5	7.5	10.0	14.5	21.5
500	12000	6.0	8.0	10.5	15.5	23.5
600	12000	6.5	9.0	12.0	18.0	–
700	12000	7.0	10.0	13.5	20.5	–
800	12000	8.0	11.0	15.0	22.5	–
900	12000	8.5	12.0	16.5	26.0	–
1000	12000	9.0	13.0	18.0	28.5	–

Figura 3. 5. Diámetros de tubería PRFV. Fuente: Ollearis

Conocido el diámetro de ambas tuberías se debe seleccionar el equipo de bombeo necesario para impulsar el fluido hasta la planta de desalación. No obstante, se estudiará primero el sistema de pretratamiento para conocer las pérdidas de carga que produce. Deberán ser suplidas las bombas de captación.

3. Pretratamiento

Para aumentar la vida útil de más membranas y reducir el coste de mantenimiento se instalará un sistema de pretratamiento. Al poseer escasos conocimientos en este campo de aplicación se seguirá el asesoramiento de la Guía de Desalación, publicada por el Ministerio de Sanidad y Política Social. Según cita, *“el objeto del pretratamiento en las plantas de desalación es adecuar las características fisicoquímicas y biológicas del agua captada a las necesidades del proceso de desalación, para evitar de ese modo, la corrosión, la formación de incrustaciones y, en definitiva, el deterioro prematuro de los equipos”*.

El fabricante Lennech facilita una tabla explicativa de los pretratamientos más utilizados. Se muestra en la siguiente figura.

Obstrucción	Causa	Pre-tratamiento apropiado
Biológica	Bacteria, microorganismos, virus, protozoos	Cloración
Partículas	arena, arcilla (turbidez, sólidos suspendidos)	Filtración
Coloidal	Compuestos orgánicos e inorgánicos, partículas coloidales, micro-algas	Coagulación + Filtración Opcional: Floculación / sedimentación
Orgánica	Materia Orgánica Natural (en inglés, NOM) : ácidos húmicos y fúlvicos, biopolímeros	Coagulación + Filtración + Absorción por carbón activado Coagulación +Ultra-filtración
Mineral	Calcio, Magnesio, Bario o Estroncio, sulfatos y carbonatos	Dosificación anti-cal Acidificación
Oxidación	Cloro, Ozono, KMnO4	Dosificación neutralizador oxidante: Meta-bisulfito sódico, Carbón activado granular

Figura 3. 6. Procesos de pretratamiento típicos de agua de mar. Fuente: Lenntech

Seguindo este criterio, se cree conveniente instalar dos tipos de pretratamiento:

1. *Pretratamiento físico.* Este sistema se encarga de eliminar las partículas sólidas existentes en el agua de captación. Aunque el agua del pozo de captación se considera como adecuada, se debe realizar un tratamiento mínimo para reducir el riesgo de ensuciamiento de las membranas. En este caso se usarán filtros. Para explicar el proceso se hará uso del documento elaborado por el EOI, *Introducción a la Desalación por ósmosis inversa. Conceptos Básicos* publicación del profesor Carlos Tejero. En el informe se describe el proceso del pretratamiento físico. *“El agua se hace pasar por filtros de arena desilex de granulometría media de 0,5 mm. Estos filtros son capaces de retener partículas de hasta 0,1 mm. La forma de filtrado es a equicorriente, es decir, de arriba hacia abajo del lecho, con lo que las partículas quedan en la parte superior [...] Cuando los filtros se colmatan, lo que se detecta por la pérdida de carga a su través, deben lavarse para eliminar la suciedad acumulada y devolverlos a su estado de máxima eficacia”.* Seguidamente, se realiza un segundo filtrado antes de introducir el fluido al núcleo de membranas. En este caso se instalará una batería de filtros de cartucho con una selectividad de 2 a 5 micras.
2. *Pretratamiento químico.* Además de eliminar las partículas sólidas también se deben reducir ciertos componentes químicos que pueden producir un desgaste avanzado en las membranas. Como norma general, los pretratamientos químicos se llevan a cabo con la dosificación de algún componente químico. Los más comunes son:
 - *La dosificación.* Para evitar la proliferación o crecimiento bacteriano se suele dosificar cloro. El producto más empleado es el hipoclorito sódico, que se almacena en un depósito.
 - *Regulación del pH.* El agua de mar suele contener niveles elevados de acidez. En este caso, el software de membranas sugiere utilizar una dosificación de ácido clorhídrico (HCl) con una concentración del 100% y una tasa de dosificación de 8,92 mg/l.
 - *Acidificación y dosificación de inhibidores de la incrustación.* Otras medidas que se pueden tomar para evitar la precipitación de elementos cálcicos son la acidificación del agua o la dosificación de antiincrustantes. De esta forma se previene la formación y acumulación de óxidos metálicos en la superficie de las membranas.

El sistema de pretratamiento, además de evitar la disminución de la efectividad de las membranas, también producen un efecto negativo en la presión del fluido. Equipos como los

filtros producen una disminución de la presión del fluido aumentando las pérdidas de carga. Por esta razón, se deben considerar en el estudio de las bombas de captación.

Sin embargo, no se pueden determinar de forma exacta estos valores. Cada equipo produce un efecto singular. Por ello, se ha decidido considerar los criterios establecidos en la bibliografía recomendada y los consejos facilitados por el tutor académico. El valor de pérdidas de carga en el sistema de pretratamiento se establece en 2 bar de presión.

Obtenidos todos los valores necesarios en el sistema de captación se pasa a elegir los equipos de bombeo.

4. Bombas sumergibles de captación

Se comienza el estudio para la selección de las bombas de captación ubicadas en el interior de los pozos. En este caso, al no existir una simetría en la tubería de captación se tendría que calcular por separado. Sin embargo, como los cálculos no sufrirán cambios significativos se estudiará el caso más desfavorable, el pozo más alejado, con una longitud total de 285 metros. Además, se propone que la presión de la bomba permita realizar el recorrido desde el pozo de captación hasta la planta de desalación en un único paso. Se incluye el sistema de pretratamiento en el estudio.

4.1. Balance de energía

Para seleccionar la bomba se requieren dos parámetros fundamentales, el caudal de trasiego y la altura que la bomba debe suministrar a este. En este caso se conoce únicamente el caudal de trasiego. La altura de la bomba se calcula mediante un balance de energía, entre el punto inicial y el punto final, siguiendo la ecuación 3:

$$H_1 + H_B - H_{r,1-2} = H_2$$

Ecuación 5 Balance de energía según Bernoulli

Donde,

- H_1 y H_2 son las alturas del fluido en el inicio y final respectivamente.
- H_B es la altura que suministra la bomba.

- $H_{r,1-2}$ son las pérdidas de carga existentes entre los puntos. En este caso será un sumatorio de las pérdidas de carga primarias (tubería) y las secundarias (accesorios).

Despejando el valor de la altura de la bomba y definiendo las componentes de la energía para cada punto, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$H_B = \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2 * g} \right) + (Z_2 - Z_1) + \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right) + H_{r,1-2}$$

Ecuación 6. Altura de la bomba

Donde,

- V_1 y V_2 son las velocidades del fluido en el inicio y final respectivamente. Representan la energía cinética y se calculan según la ecuación,

$$V = \left(\frac{4 * Q}{\pi * D^2} \right)$$

Ecuación 7. Velocidad de un fluido

- Z_1 y Z_2 representan la energía potencial del fluido. Sus valores muestran el nivel del agua respecto al cero establecido.
- Por último, la energía de presión del fluido se calcula gracias a las presiones. En este caso, P_1 es la presión del agua y P_2 es la presión de entrada a la planta de desalación.
- γ es el peso específico del fluido.

Se define un volumen de control para obtener los valores correspondientes al inicio (1) y final (2) del balance. En este caso, se tendrá:

- *Punto 1. Nivel mínimo de agua en el pozo de captación.*

V_1 se supone como cero porque el agua del pozo se mantiene estable y su volumen descenderá de manera paulatina.

Z_1 se establece en el nivel mínimo de agua. En este caso será de **-9,36 metros**.

P_1 corresponde a la presión del agua de mar. Utilizando presiones relativas, si se establece la presión atmosférica en el pozo de captación, la presión del fluido será de **0 bar**.

- *Punto 2. Entrada al núcleo de ósmosis inversa.*

V_2 se calcula según la ecuación 5, desarrollada anteriormente, siendo **0,9693 m/s**.

Z_2 será la cota existente en la planta de desalación. Volviendo a utilizar la herramienta de Google Earth, la altura de la planta de desalación será de 6 metros. Por tanto, restando los 4,1 metros del nivel de la boca del pozo (cero de referencia) la altura que debe alcanzar el fluido es de **1,9 metros**.

P_2 corresponde a la presión de funcionamiento de la planta. Si se accede al documento Excel del recuperador de energía se comprueba que la presión de entrada en las bombas de alta presión se establece en 2 bar. Considerando, además, que las pérdidas de carga en el sistema de pretratamiento se suponen en 2 bar, la presión del punto 2 se establece en **4 bares**.

Únicamente queda obtener las pérdidas de carga correspondientes a las tuberías y a los accesorios.

4.2. Pérdidas de carga

Para calcular las pérdidas de carga se diferencian las relacionadas con las tuberías (primarias) y las relacionadas con los accesorios (secundarias). Las pérdidas de carga totales se definen como el sumatorio de las anteriores, por tanto, se estudian por separado.

➤ *Pérdidas de carga en las tuberías.*

Para obtener las pérdidas de carga en la tubería de captación y distribución se considerarán las siguientes ecuaciones

$$H_{r,prim} = \left(\frac{f * L * V^2}{2 * D * g} \right) = \left(\frac{8 * f * L * Q^2}{\pi^2 * D^5 * g} \right)$$

Ecuación 8. Ecuación de Darcy-Weisbach

Donde, los valores desconocidos hasta el momento son:

- f es el coeficiente de fricción.
- g es la fuerza de la gravedad. Sera de 9,81 metros por segundo al cuadrado.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left(\frac{K/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re_D * \sqrt{f}} \right)$$

Ecuación 9. Ecuación de Colebrook

Donde,

- k es el coeficiente de rugosidad de la tubería.

$$Re_D = \left(\frac{D * V}{\vartheta} \right) = \left(\frac{4 * Q}{\pi * D * \vartheta} \right)$$

Ecuación 10. Número de Reynolds

Donde,

- Re_D es el número de Reynolds que nos determinará el régimen del fluido.
- ϑ es la viscosidad cinemática del fluido.

Si se quieren obtener las pérdidas de carga se debe realizar un proceso iterativo (Ecuación 7) hasta obtener un coeficiente de fricción estable. Previamente se calcula el número de Reynolds con la Ecuación 8 y se define el régimen del fluido. Finalmente se sustituyen los valores obtenidos en la Ecuación 6 hasta obtener el valor de las pérdidas de carga.

➤ *Pérdidas de carga en los accesorios.*

El proceso de resolución es similar al anterior. En este caso las pérdidas de carga secundarias se presentan en los accesorios instalados en las tuberías, por ejemplo, codos o válvulas, que producen una disminución en la altura del fluido. Se hace uso de la siguiente ecuación para su cálculo:

$$H_{r,sec} = \sum k \left(\frac{V^2}{2 * g} \right) = \sum k \left(\frac{8 * Q^2}{\pi^2 * D^4 * g} \right)$$

Ecuación 11. Pérdidas de carga secundarias.

Donde,

- k será el coeficiente de pérdida correspondiente a cada accesorio. Se lleva a cabo un sumatorio de todos los accesorios instalados en la tubería.

Para calcular las pérdidas de carga únicamente se deben definir los coeficientes de pérdida para cada accesorio y sustituir los valores de caudal y diámetro en la ecuación.

Sin embargo, se ha utilizado una herramienta informática que calcula las pérdidas de carga totales a través de un documento Excel. Se puede descargar del Campus Virtual de La Universidad de La Laguna. El documento *OCW TUBERÍAS*, desarrollado por *Juan E. González Fariña*, agiliza los cálculos del proceso iterativo necesitando únicamente los valores constructivos y los parámetros del fluido. La Figura 3.7 muestra el interfaz del programa utilizado.

input data	PROGRAMA DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA EN UNA TUBERÍA RECTA, REAL O EQUIVALENTE					
output data	AUTOR: Juan E. González Fariñas (jgfarina@ull.edu.)					
ENTRADA DE DATOS:						
Q =	41,23	l/s	Accesorios de diám. Constant	Número	K accesorios	equiv. Accesorios (m)
L recta total =	65,00	m	Codos rectos (radio largo)		0,60	0,00
D interior =	250,00	mm	Codos rectos (radio medio)	1	0,80	12,76
			Codos rectos (radio corto)	2	0,90	28,70
s =	0,003	mm	Codos de 45°		0,36	0,00
Temperatura =	21,0	(°C)	Válvulas compuerta	1	0,19	3,03
v =	0,0101	cm ² /s	Válvulas de globo		10,00	0,00
Ver tabla de viscosidades del agua			Válvulas de ángulo		5,00	0,00
VERIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD			Válvulas de mariposa			0,00
			Válvulas de retención		2,50	0,00
	0,84	m/s	Entrada desde depósito		0,50	0,00
	0,01		Salida de la tubería		1,00	0,00
			Enzanchamiento brusco			0,00
			Estrechamiento brusco			0,00
			Otros		0,15	28,70
			Otros	1	1,80	28,70
					equiv. accesorios total l (m):	101,90
CÁLCULOS:						
V =	0,84	m/s				
v² / 2g =	0,04	m				
R_s =	203,669	adim.				
f =	0,0157	adim.				
FUNCION-OBJ.	0,000					
equiv. acc. total =	101,90	m				
L equiv. Total =	166,90	m				
Σh_f =	0,38	m				

Figura 3. 7. Interfaz del programa Excel para cálculo de pérdidas de carga. Fuente: Juan E. González Fariñas

El proceso que seguir para obtener las pérdidas de carga totales es el siguiente:

1. Introducir los parámetros generales de estudio. Estos son los datos del fluido y las características de la tubería en las casillas grises. Se expone en la siguiente tabla los valores correspondientes.

VALORES GENERALES	
Caudal (Q)	47,58 l/s
Longitud de la recta (total)	285 m
Diámetro interior de la tubería	250 mm
Temperatura del fluido	21°C

Tabla 3. 1. Valores generales. Fuente: Elaboración propia

El programa calcula la viscosidad cinemática del agua de forma automática. Sin embargo, puede existir una pequeña diferencia entre el agua dulce y el agua salada. Por tanto, se cree correcto modificar dicho valor. Si se buscan las propiedades físicas del agua salada para 21°C y una salinidad de 38824 mg/l (aproximadamente 38,8 g/kg) en el Instituto Técnico de Massachusetts se obtiene la siguiente tabla.

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

Figura 3. 8. Viscosidad cinemática del agua de mar. Fuente: MIT

Realizando las iteraciones pertinentes, el valor de viscosidad cinemática obtenido, y, convertido a las unidades del documento Excel es de 0,0103 cm²/s.

2. A continuación, se definen los valores correspondientes a las pérdidas de carga primarias. El coeficiente de fricción (k) para la tubería de PRFV se establece en 0,029.
3. Por último, se determinan los valores de pérdidas correspondientes a los accesorios. Se debe mencionar que el coeficiente se define en función del diámetro, no obstante, el estudio se realiza utilizando los valores estándares para cada elemento.

ACCESORIOS TUBERÍA DE CAPTACIÓN Y ALIMENTACIÓN		
Elemento	Nº de elementos	k
Codo 90° con radio corto	2	0,9
Codo 90° con radio largo	2	0,6
Válvula compuerta	2	0,19
Válvula de pie con colador	1	0,8
Empalme en T	1	1,8

Figura 3. 9. Accesorios totales en tubería de captación y alimentación. Fuente: Elaboración propia

4. Una vez se han introducido los valores correspondientes, el documento pide que se realice el proceso iterativo de forma manual. Se siguen las instrucciones facilitadas por el autor. Simplemente se debe realizar la búsqueda de un objetivo. La hipótesis de estudio consiste en obtener un coeficiente de fricción estable. Se introduce el valor 0 en la casilla emergente.

Se detallan los resultados obtenidos en las siguientes imágenes. Se corresponden con el interfaz del programa una vez calculado.

ENTRADA DE DATOS:						
Q =	47,58	l / s	Accesorios de diám. Constante	Número	K_{accesorio}	l_{equiv. Accesorio (m)}
L_{recta total} =	285,00	m	Codos rectos (radio largo)	2	0,60	19,66
D_{interior} =	250,00	mm	Codos rectos (radio medio)		0,80	0,00
			Codos rectos (radio corto)	2	0,90	29,49
ε =	0,003	mm	Codos de 45°		0,36	0,00
Temperatura =	21,0	(°C)	Válvulas compuerta	2	0,19	6,23
v =	0,0101	cm ² / s	Válvulas de globo		10,00	0,00
Ver tabla de viscosidades del agua			Válvulas de ángulo		5,00	0,00
VERIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD			Válvulas de mariposa			0,00
	0,9693	m / s	Válvulas de retención		2,50	0,00
			Entrada desde depósito		0,50	0,00
			Salida de la tubería		1,00	0,00
	0,01		Ensanchamiento brusco			0,00
			Estrechamiento brusco			13,11
			Válvula de pie con colador	1	0,80	29,49
			Empalme en T	1	1,80	29,49
					l_{equiv. accesorio total} (m):	127,46

Figura 3. 10. Datos de entrada. Fuente: Documento Excel

V =	0,97	m / s
v² / 2g =	0,05	m
R_e =	235.037	adim.
f =	0,0153	adim.
FUNCION-OBJ.	0,000	
l_{equiv. acc. total} =	127,46	m
L_{equiv. Total} =	412,46	m
Σh_f =	1,21	m

Figura 3. 11. Pérdidas de carga totales. Fuente: Documento Excel

El tramo de tubería desde el pozo de captación hasta el núcleo de desalación tendrá unas pérdidas de carga totales de **1,21 metros**. Además, el fluido se encontrará en **régimen turbulento** y su velocidad será de **0,97 m/s**.

Conocidas las pérdidas de carga se calcula la altura que deben suministrar las bombas. Refrescando los cálculos, la Ecuación 4 quedaba de la siguiente forma.

$$H_B = \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2 * g} \right) + (Z_2 - Z_1) + \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right) + H_{r,1-2}$$

Se debe determinar el valor del peso específico, γ . Este se calcula multiplicando la densidad y la fuerza gravitatoria. El fluido de trabajo posee un nivel de salinidad determinado. Se deben estudiar las propiedades químicas que posee. Para ello, se hace uso de una herramienta online, facilitada en la página web *Easycalculation*. Permite introducir el valor de temperatura y salinidad, devolviendo la densidad del fluido.

Calculador de densidad de agua

Calcular densidad de agua:

Temperatura:

Salinidad de agua (Sólidos totales disueltos en agua):

Resultados:

Densidad de agua:

Figura 3. 12. Calculador de densidad del agua. Fuente: Easycalculation

Sustituyendo,

$$H_B = \left(\frac{(0,9693^2 - 0^2) \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) + (1,9 - -(9,36))m + \left(\frac{(4 - 0)bar * 10^5 \frac{Pa}{bar}}{1027,44 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) + 1,21 m$$

La altura que debe suministrar la bomba es de **49,74 metros**. A partir de este resultado se selecciona una bomba para cumplir con el objetivo.

No obstante, se debe calcular el valor de NPSH, acrónimo de Net Positive Suction Head, también conocido como ANPA (Altura Neta Positiva en la Aspiración) que determinará el correcto funcionamiento de la bomba. Para asegurar que el equipo de bombeo no cavita se debe cumplir que el NPSH_r (requerido) de la bomba sea menor que el NPSH_d (disponible) de la instalación.

Se utiliza la siguiente ecuación para su comprobación.

$$NPSH_d = \left(\frac{V_1^2 - V_e^2}{2 * g} \right) + (Z_1 - Z_e) + \left(\frac{P_1 - P_s}{\gamma} \right) + H_{r,1-e}$$

Ecuación 12 NPSH_d

Se define el volumen de control para obtener los valores correspondientes al inicio (1) y final (e). En este caso:

- *Punto 1. Nivel mínimo de agua en el pozo de captación.*

V_1 , Z_1 y P_1 serán los mismos que para el cálculo anterior, aunque midiendo la presión en escala absoluta, es decir, 101325 Pa.

- *Punto e. Boca de aspiración de la bomba.*

V_e seguirá siendo **0,9693 m/s**.

Z_e será la cota de instalación de la bomba. Estará colocada a **25 metros por debajo del nivel de referencia**.

P_s corresponde a la presión del fluido para una temperatura de 21°C. Tendrá un valor, según herramienta online, TLV Toolbox, de **2,4881 kPa en presión absoluta**.

En este caso, las pérdidas de carga, calculadas a través del documento Excel, producen **0,08 metros** de pérdidas de altura. Una vez se han determinado todos los datos se sustituyen en la Ecuación 10. Quedando:

$$NPSH_d = \frac{(0^2 - 0,9693^2) \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} + (-9,36 - (-25))m + \frac{(101325 - 2488,1)Pa}{1027,44 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2}} + 0,08m$$

La bomba no debe proporcionar más de **25,179 metros** de NPSH requerido.

4.3. Selección de bomba

De la misma forma que se navegó buscando un proveedor de membranas o un proveedor de equipos de recuperación de energía, se hará para las bombas.

Indagando en diferentes páginas web y consultando con personas cercanas a este tipo de equipos, se aconseja estudiar las siguientes marcas, **Grundfos**, **KSB**, **Lowara** y **Wilo**. Se estudiará cada fabricante por separado y se mostrarán la bomba que presentan mejores características técnicas para la instalación. Se tendrá en cuenta para la elección, el rendimiento de la bomba y el consumo específico de la misma como criterio de mayor peso, pero no se descartarán otros parámetros de funcionamiento que pueden decantar la selección. Los motores de búsqueda de cada fabricante proporcionaran varios equipos de bombe. No obstante, para agilizar los resultados se reflejará únicamente el modelo de bomba elegido. También sea adjuntarán los datos de funcionamiento y las gráficas de las curvas características de cada fabricante.

- **Grundfos**. Este fabricante facilita un buscador online, Grundfos Products Center. Simplemente se debe introducir los parámetros de funcionamiento de la bomba. En este caso se utilizará el dimensionamiento rápido. Entre los modelos seleccionados por el buscador se elige el **Modelo SP 160 3**. Este equipo presenta el mejor régimen de rendimiento, un 74,2%. En motor sufre una pequeña disminución en la eficiencia. El rendimiento se establece en un 61,3%. Estos valores los suministra con un caudal de 51,27 l/s para una altura de 49,74 metros.



Figura 3. 13. Modelo SP 160 3.
Fuente: Grundfos

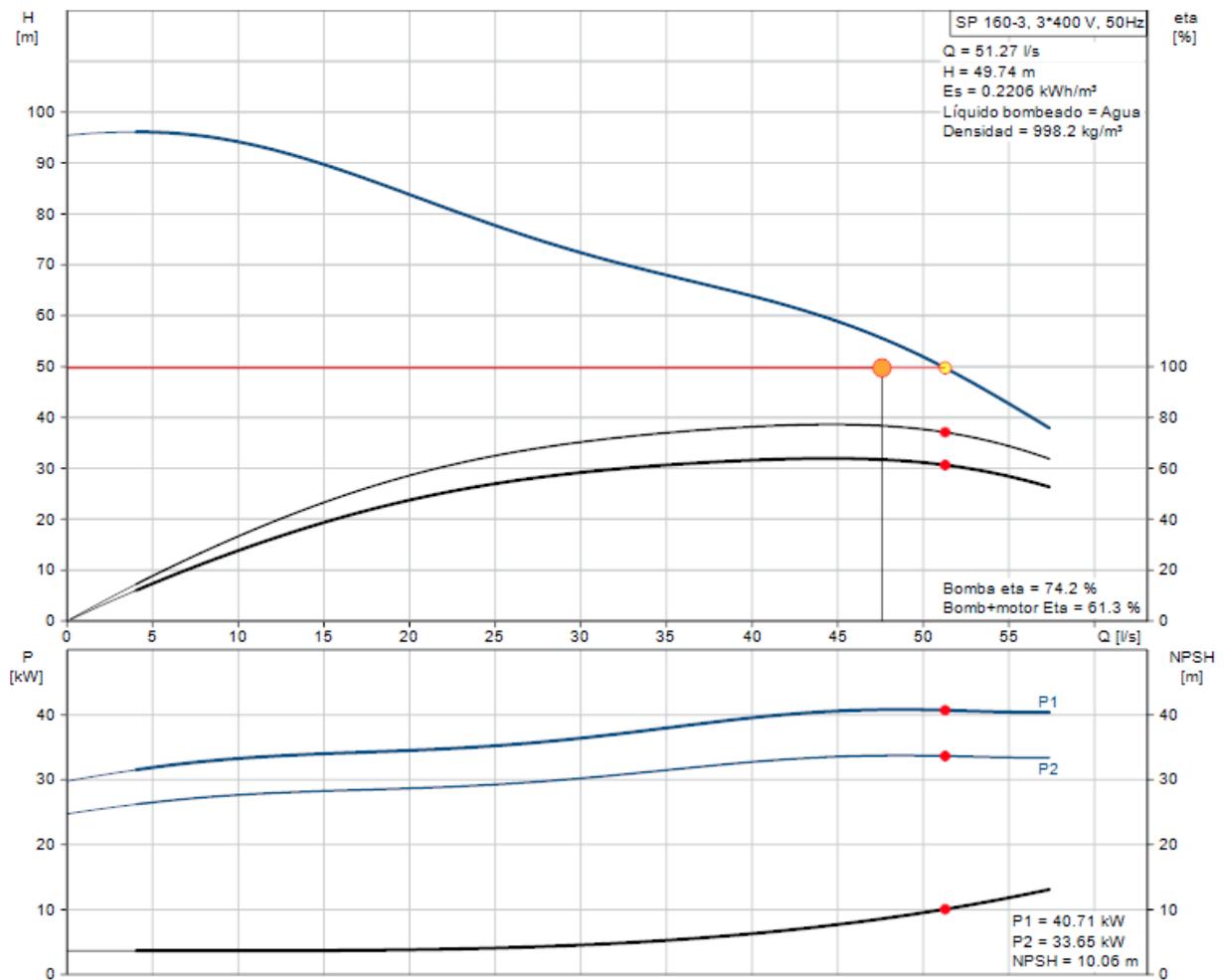


Figura 3. 14. Curvas características Grundfos SP 160-3. Fuente: Grundfos

- **Wilo.** El siguiente fabricante consultado es Wilo. De igual forma que para el caso anterior, la empresa facilita un buscador online de productos. Entre los equipos seleccionados por el buscador se elige *el modelo K10 170*. Presenta el mejor rendimiento de todos. Se establece en un 84,19%, sin embargo, los valores de suministro son más elevados de los requeridos. Se deberá instalar un sistema de regulación de caudal. Proporciona 51,3 l/s de caudal para una altura de 58,02 metros.



Figura 3. 15. Modelo K10 170. Fuente: Wilo Select

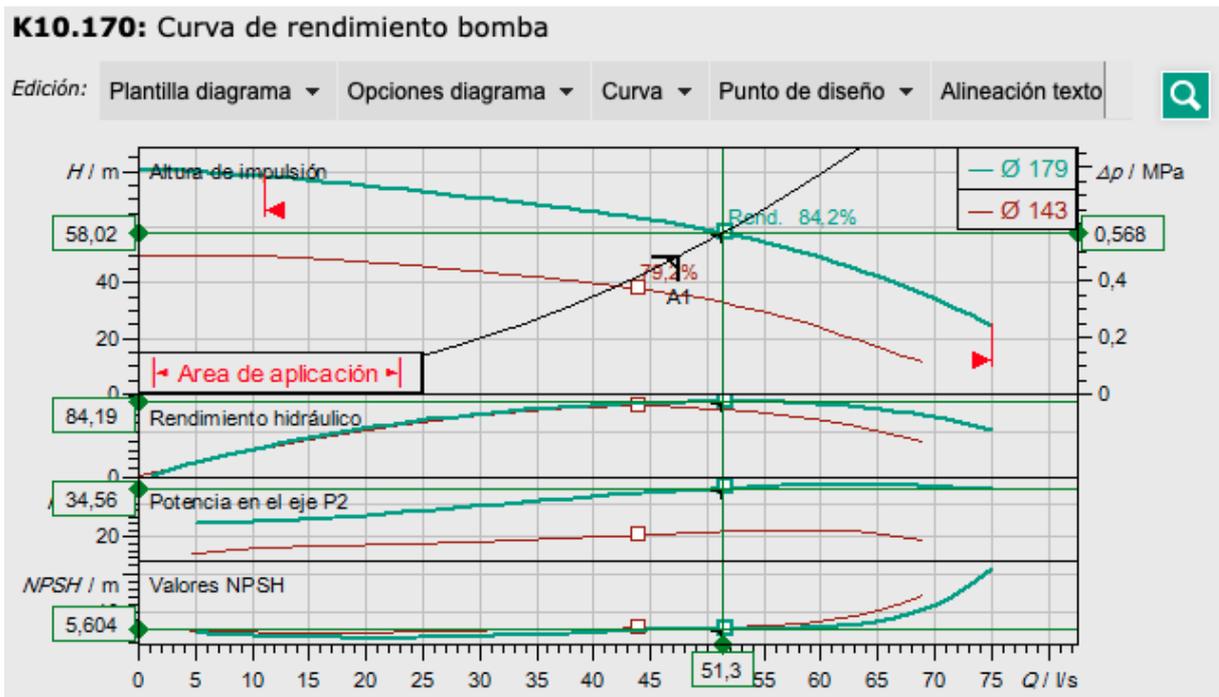


Figura 3. 16. Curvas características Wilo K10 170. Fuente: Wilo Select

- **KSB.** Ahora se consulta el fabricante KSB. Siguiendo la recomendación del selector de bombas hidráulicas se elige el **modelo UPA 250C-150** con las siguientes características, caudal suministrado de 47,5 l/s y rendimiento de funcionamiento, 79%, todo ello para una altura de 50, 43 metros.



Figura 3. 17. Modelo UPA 250C 150. Fuente: KSB

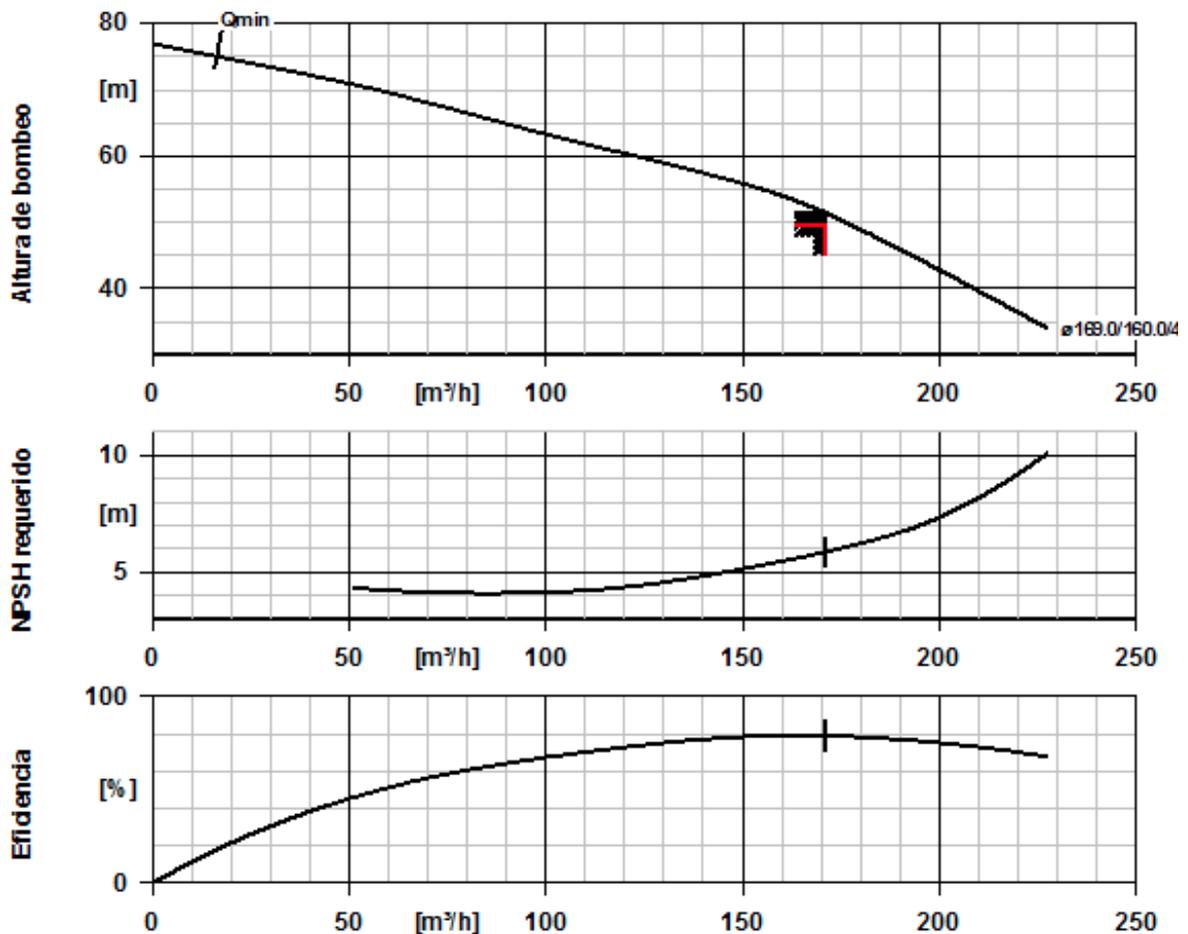


Figura 3. 18. Curvas características UPA 250C-150. Fuente: KSB

- **Lowara.** La última empresa consultada es Lowara. El método de selección, Lowara Xlect, nos permite filtrar la búsqueda por aplicación. Se han seleccionado las aplicaciones de perforación. El programa muestra una serie de modelos de bombas sumergibles. Se ha decidido elegir el **modelo Z10 275 02/2B-L6W**, con un caudal suministrado del 48,64 l/s con un rendimiento del 77%.



Figura 3. 19. Modelo Z10 275.
Fuente: Lowara

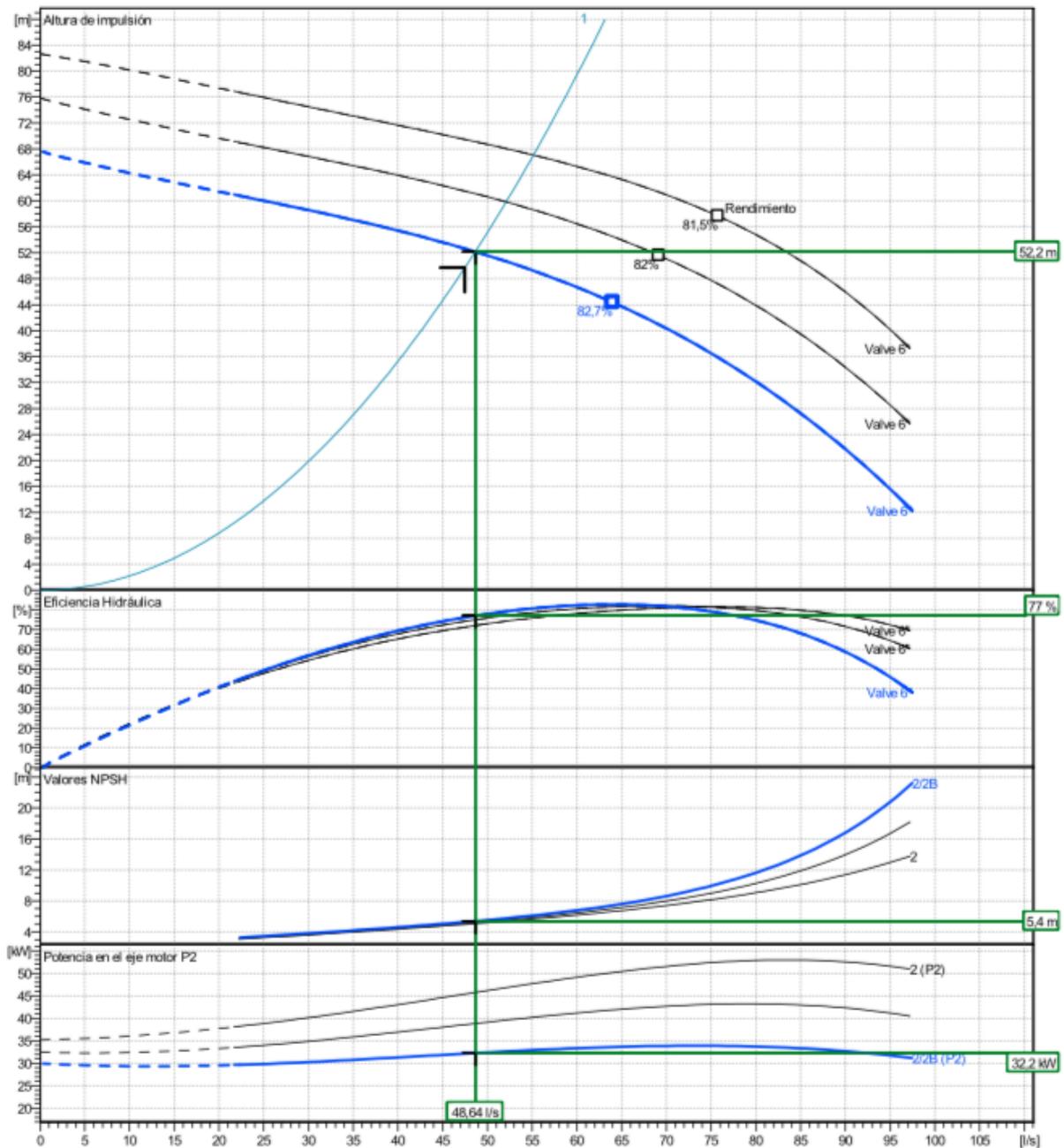


Figura 3. 20. Curvas características Z10 275. Fuente: Lowara

Una vez se han seleccionado las bombas para cada fabricante se debe comparar y escoger la más idónea para la instalación. Al no conocer el coste de los equipos se ha decidido seguir el criterio de máximo rendimiento para la selección. Por tanto, con un 84,2% se elige el **modelo K10 170** del fabricante Wilo.

Se consultará la ficha técnica para extraer los parámetros de funcionamiento. Serán necesarios en el reajuste del cálculo de consumos reales. Se realizará al final del anexo. A continuación, se pasa a estudiar las bombas existentes en el núcleo de membranas.

5. Bombas de ósmosis inversa

Seguidamente se inicia el análisis del sistema de bombeo del núcleo de ósmosis inversa. Se estudiarán las bombas que aumentarán la presión hasta los niveles de funcionamiento de las membranas. De la misma forma, se instalará una bomba auxiliar a la salida del recuperador de energía para igualar las presiones de funcionamiento antes de la entrada al bastidor de membranas.

En este estudio se seguirá el proceso descriptivo realizado en el apartado anterior. Por tanto, habrá algunos cálculos que se darán por supuestos sin desarrollar el método de resolución pertinente.

Se necesitarán una serie de parámetros de funcionamiento que serán obtenidos del software de membranas y del documento Excel de recuperación de energía respectivamente.

Por último, se llevará a cabo el estudio y elección siguiendo la tipología de la bomba. Primero se estudiará, dimensionará y elegirá la bomba de alta presión y, a continuación, se realizará el mismo procedimiento para la bomba auxiliar.

5.1. Bombas de alta presión

Se desarrolla el estudio para seleccionar las bombas de alta presión ubicadas en el interior de la planta de desalación. Serán las encargadas de aumentar la presión del fluido hasta los niveles máximos del sistema de desalación. De esta forma, las bombas tendrán un peso bastante significativo en el consumo específico de la planta. Por ello, la elección se debe hacer de forma razonada priorizando los aspectos técnicos que brinden mejores parámetros de funcionamiento.

5.1.1. *Balance de energía*

Para seleccionar la bomba se realizan los mismos pasos que en el apartado anterior. Se requerirá el caudal de trasiego y la altura que la bomba debe suministrar. Los valores de presiones de entrada y salida se obtienen de los programas de dimensionamiento de las membranas. Se reflejan en la Tabla 3.2. los valores extraídos del documento Excel del fabricante Energy Recovery Inc. Están visibles en la Tabla 2.8. del *Anexo II, Dimensionado del núcleo de membranas y recuperador de energía para ósmosis inversa*

	BOMBA ALTA PRESIÓN
Temperatura de alimentación	21°C
Presión de entrada	2 bar
Presión de salida	60 bar
Caudal de alta presión	78 m ³ /h

Tabla 3. 2. Tabla de valores de bomba BAP. Fuente: Elaboración propia

Se constata que la presión de entrada se establece en 2 bar. Se decide establecer este criterio para asegurar que no se produzca el efecto de la cavitación en la aspiración. Por otro lado, la presión de funcionamiento de las membranas es de 60 bar, objeto de alcance por parte de nuestro equipo de bombeo.

Se debe estudiar la altura mínima de la bomba. Utilizando las expresiones desarrolladas anteriormente, las consideraciones que se toman para este apartado son las siguientes:

$$H_B = \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2 * g} \right) + (Z_2 - Z_1) + \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right) + H_{r,1-2}$$

Donde,

- V_1 y V_2 son las velocidades del fluido en el inicio y final respectivamente. En este caso, el fluido no varía su velocidad y si lo hace, se podría considerar como inapreciable. Por ello, la energía cinética se desprecia.
- De igual forma, Z_1 y Z_2 representan la energía potencial del fluido. Las bombas serán colocadas a la misma altura que el núcleo de membranas, por tanto, la diferencia entre cotas será 0. Se desprecia nuevamente este valor de energía.
- Por otro lado, la energía de presión del fluido vendrá definida por los valores de funcionamiento, representados en la tabla anterior. El peso específico del fluido no será cambiado.
- Por último, dada la proximidad de los equipos y los parámetros de trabajo, las pérdidas de carga representan un valor significativamente minúsculo. En este estudio se despreciarán, tanto de tubería como de accesorios.

Finalmente, si se sustituyen los valores obtenidos y se desprecian las energías mencionadas, la Ecuación 4 nos queda de la siguiente forma.

$$H_B = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right)$$

Siendo,

$$H_B = \left(\frac{(60 - 2) \text{bar} * 10^5 \frac{\text{Pa}}{\text{bar}}}{1027,44 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right) = 575,44 \text{ metros}$$

La altura que debe suministrar la bomba es de **575,44 metros**. A partir de este resultado se escoge un tipo de bomba.

Del mismo modo, se calcula el valor métrico que protege al equipo de la cavitación:

$$NPSH_d = \left(\frac{V_1^2 - V_e^2}{2 * g} \right) + (Z_1 - Z_e) + \left(\frac{P_1 - P_s}{\gamma} \right) + H_{r,1-e}$$

- *Punto 1. Entrada a la bomba de alta presión*

V_1 , Z_1 y P_1 serán los mismos que para el cálculo anterior, aunque midiendo la presión en escala absoluta, es decir, 301325 Pa.

- *Punto e. Boca de aspiración de la bomba.*

P_s sigue siendo **2,4881 kPa**.

$$NPSH_d = \frac{(301325 - 2488,1) \text{Pa}}{1027,44 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 29,64 \text{ metros}$$

Finalmente, la bomba no debe proporcionar más de **29,64 metros** de NPSH requerido.

5.1.2. Selección de bomba

Se utilizarán los mismos fabricantes que para el apartado anterior. Los datos que se han de introducir en el selector de bomba online son:

	BOMBA ALTA PRESIÓN
Presión de entrada	2 bar
Presión de salida	60 bar
Caudal de alta presión	78 m ³ /h
Altura	575,44 m
NPSHr	29,64 m

Tabla 3. 3. Datos para dimensionado de BAP. Fuente: Elaboración propia

Después de consultar las diferentes empresas, se comprueba que la mayoría de estas no poseen una bomba que permita alcanzar este punto de funcionamiento. En consecuencia, se decide contactar directamente con los mismos, obteniendo respuesta únicamente del fabricante KSB. Esta empresa proporciona el modelo siguiente.

- **KSB.** La bomba elegida en alta presión es el modelo **Multitec RO A 65/ 11A-6.1 33.182**. Suministra un caudal de 78 metros cúbicos por hora y una altura total de 580 metros. Para este punto de operación se obtiene un rendimiento del 69,1%. Se representa la curva característica en la Figura 3.21.



Figura 3. 21. Bomba KSB Multitec RO. Fuente: KSB

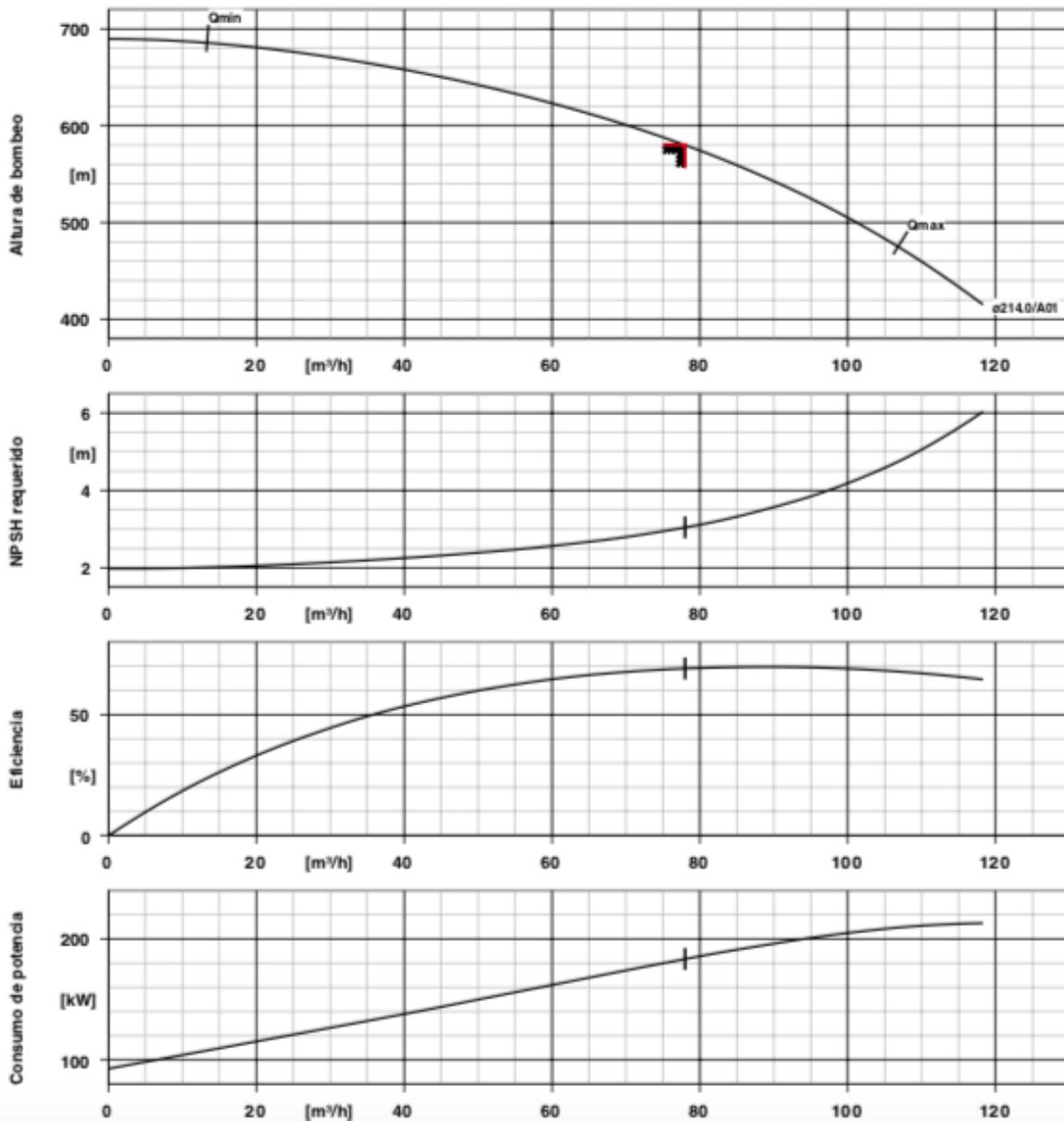


Figura 3. 22. Curvas características KSB Multitec RO. Fuente: KSB

Finalmente, dadas las circunstancias, el modelo KSB será el equipo que se instalará en el proyecto. No ha sido posible obtener respuesta del resto de fabricantes.

A modo informativo, el coste económico total del sistema se establece en **72317 €** y un plazo de fabricación de 35 semanas laborables.

5.2. Bomba auxiliar tipo Booster

Se inicia el estudio para seleccionar la bomba auxiliar del sistema de recuperación de energía. Será la encargada de igualar el salto de presión existente en la recirculación del caudal por el recuperador de energía. Como se pudo comprobar, la presión que suministra la bomba de alta tiene un valor de 60 bar. El recuperador de energía, pese a su gran rendimiento, no consigue igualar este valor de presión en el flujo de recirculación (la presión disminuye en el flujo de rechazo, apartado 2.7 del Anexo II). Por ello, se requiere de una bomba auxiliar que permita igualar las presiones.

La más utilizada para esta aplicación es el tipo Booster, desarrollando los mejores parámetros de rendimiento. La bomba debe aumentar 1,9 bar la presión de dicho fluido porque a la salida del recuperador de energía se tiene 58,1 bar de presión. Se muestra una imagen a modo aclaratorio del sistema de recirculación y de los datos de funcionamiento.

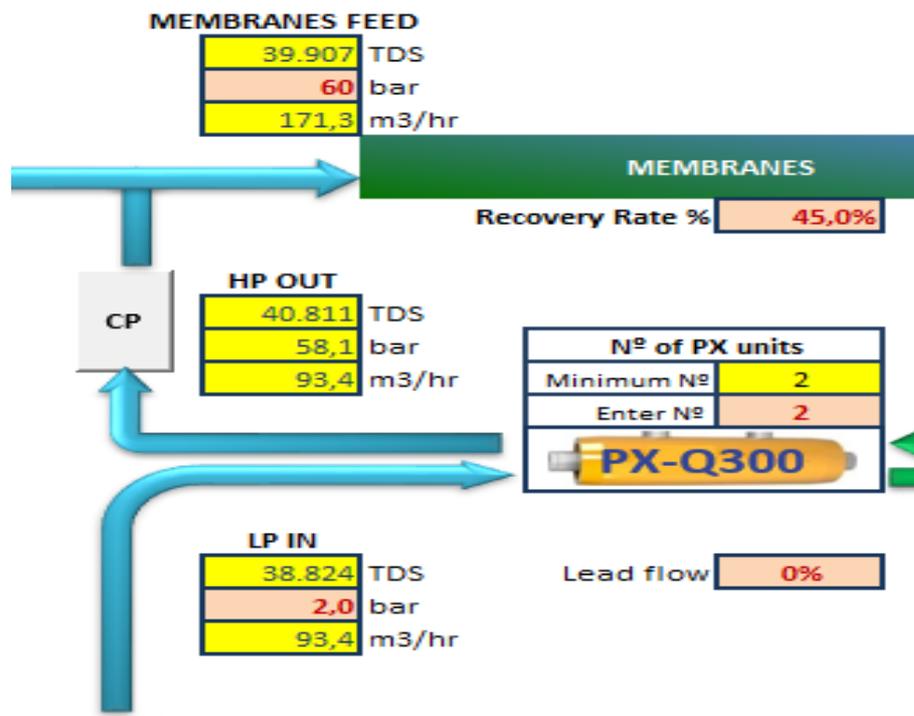


Figura 3. 23. Parámetros de funcionamiento. Fuente: Energy Recovery Inc

5.2.1. Balance de energía

Para dimensionar la bomba Booster se requieren los mismos parámetros que en el caso anterior, el caudal de trasiego y la altura. Al igual que se hizo para la bomba de alta presión, en

este estudio se deben contemplar las presiones de entrada y salida de la bomba. Se representan en la siguiente tabla los valores extraídos de la figura anterior.

	BOMBA BOOSTER
Temperatura de alimentación	21°C
Presión de entrada	58,1 bar
Presión de salida	60 bar
Caudal de alta presión	93,4 m ³ /h
Factor de conversión	45%

Tabla 3. 4. Tabla de valores de bomba BAP. Fuente: Elaboración propia

La presión de entrada se establece en 58,1 bar. Por otro lado, la presión de alcance de nuestro equipo de bombeo es de 60 bar.

El proceso de cálculo es idéntico al anterior

$$H_1 + H_B - H_{r,1-2} = H_2$$

Despreciando las energías de igual forma que para alta presión, queda:

$$H_B = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right)$$

Siendo,

$$H_B = \left(\frac{(60 - 58,1) \text{ bar} * 10^5 \frac{\text{Pa}}{\text{bar}}}{1027,44 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right) = 18,8 \text{ metros}$$

La altura que debe suministrar la bomba Booster es de **18,8 metros**. A partir de este resultado se elige un tipo de bomba.

$$NPSH_d = \frac{(5911325 - 2488,1) \text{ Pa}}{1027,44 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 586,24 \text{ metros}$$

Además, la bomba no debe proporcionar más de **586,24 metros** de NPSH requerido. Con este valor se puede asegurar que la bomba no cavitará.

5.2.2. Selección de bomba

Los datos para tener en cuenta en el selector de bomba online son:

	BOMBA BOOSTER
Presión de entrada	58,1 bar
Presión de salida	60 bar
Caudal de alta presión	93,4 m ³ /h
Altura	18,8 m
NPSHr	586,24 m

Tabla 3. 5. Datos para dimensionado de BAP. Fuente: Elaboración propia

Se muestran en las siguientes figuras los datos de funcionamiento y las gráficas de las curvas características de los fabricantes consultados.

- **Lowara.** Se ha decidido elegir el **modelo LNEE 80-125/110/P25VCC4**, con un caudal suministrado de 105,4 metros cúbicos por hora y con un rendimiento del 78,83%.



Figura 3. 24. Lowara LNEE 80 125.
Fuente: Lowara

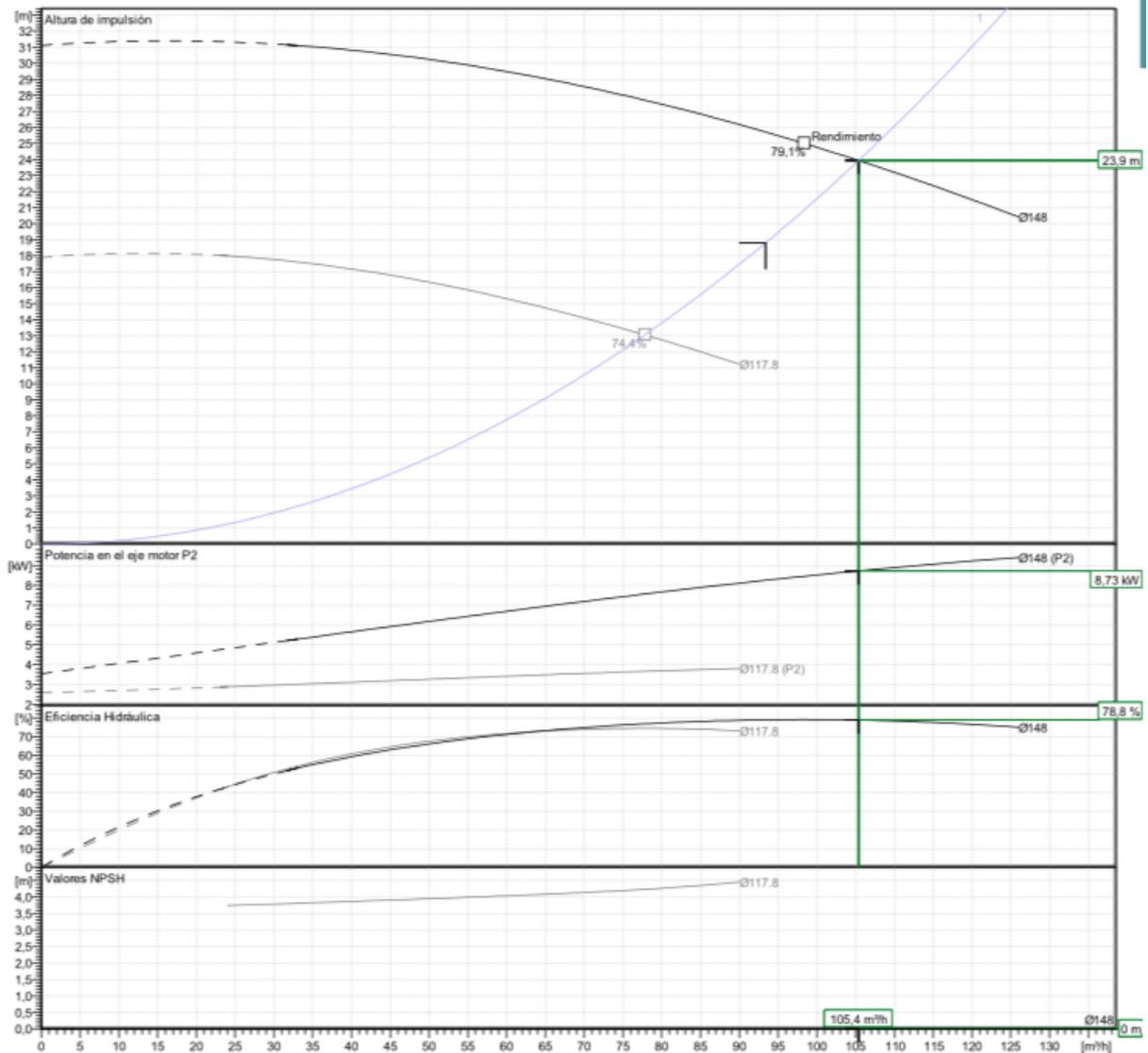


Figura 3. 25. Curvas características Lowara LNEE 80 125. Fuente: Lowara

- **Wilo.** Entre los modelos facilitados se escoge la serie Movitec y la bomba centrífuga de alta presión **MVIE 9501-3/16/E/3-2**. El punto de funcionamiento para nuestra instalación nos proporciona un rendimiento hidráulico del 70,93%.



Figura 3. 26. Modelo Wilo Movitec 9501. Fuente: Wilo

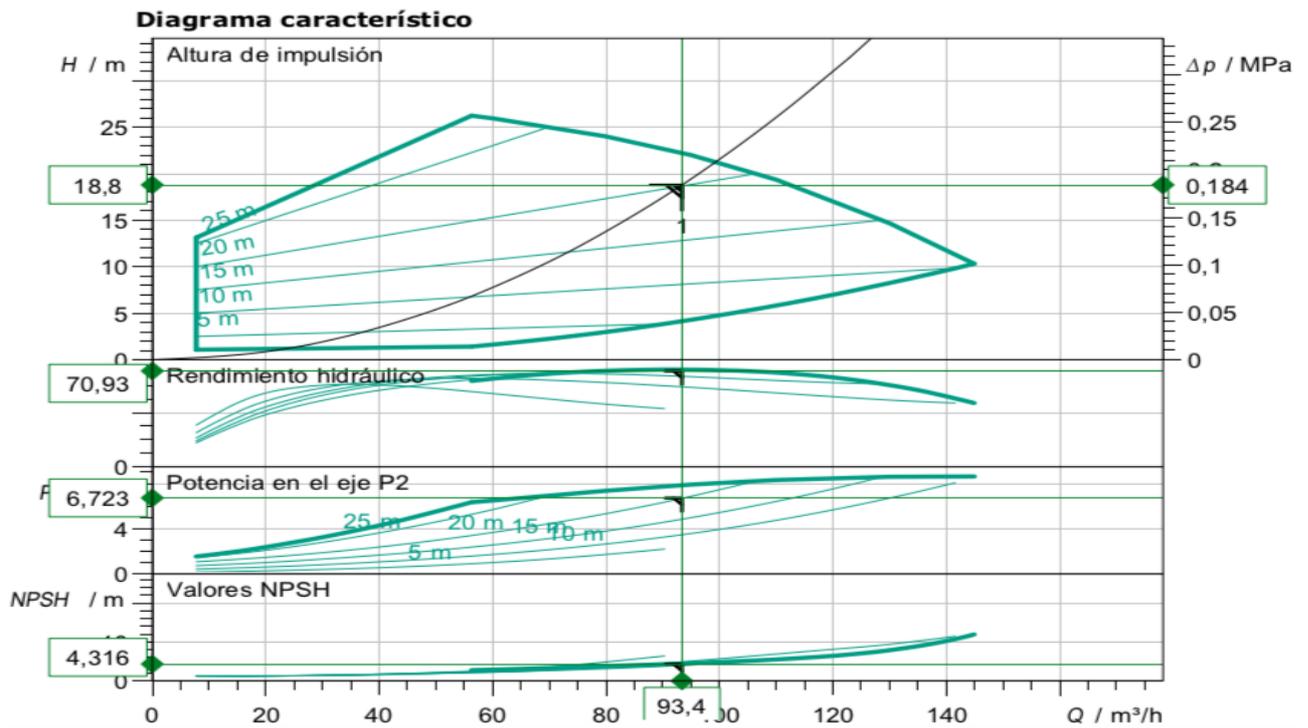


Figura 3. 27 Curvas características Wilo Movitec 9501. Fuente: Wilo

- **KSB.** La bomba que mejor rendimiento suministra es el *modelo Etaline 080-080-160 GGSAV11D200752 BKSBIE3M*. Para el punto de funcionamiento obtiene un 78,7% de eficiencia.



Figura 3. 29. Modelo KSB Etaline 80. Fuente: KSB

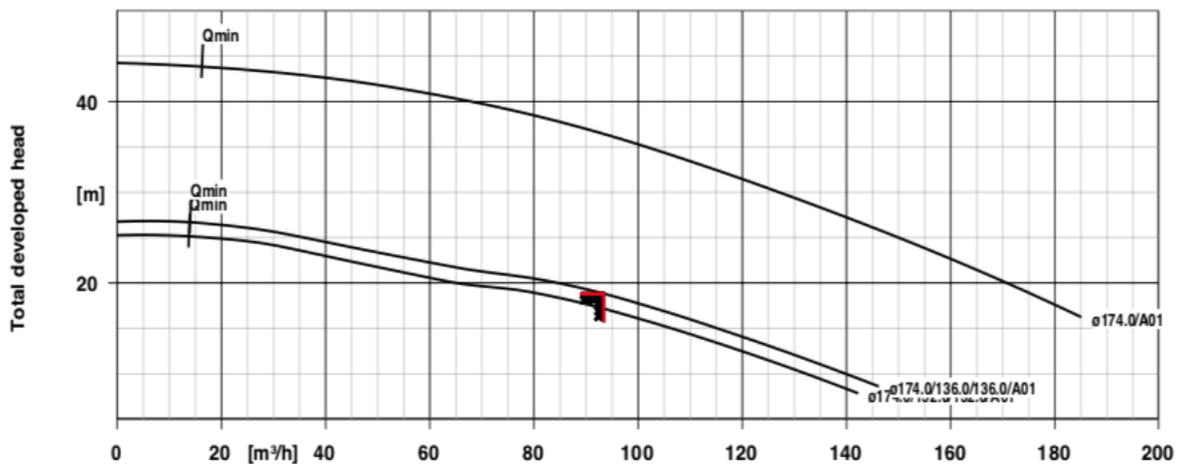


Figura 3. 30. Curvas características KSB Etaline. Fuente: KSB

- **Grundfos.** A diferencia de la bomba de alta presión, este fabricante si suministra diferentes equipos para la aplicación establecida. Entre todos ellos se ha elegido el *modelo NBGE 80-65-125/144 AF2ABAQE*. Produce un rendimiento del 77,6% para el punto de funcionamiento introducido.



Figura 3. 31. Bomba Grundfos Modelo NBGE 80.
 Fuente: Grundfos

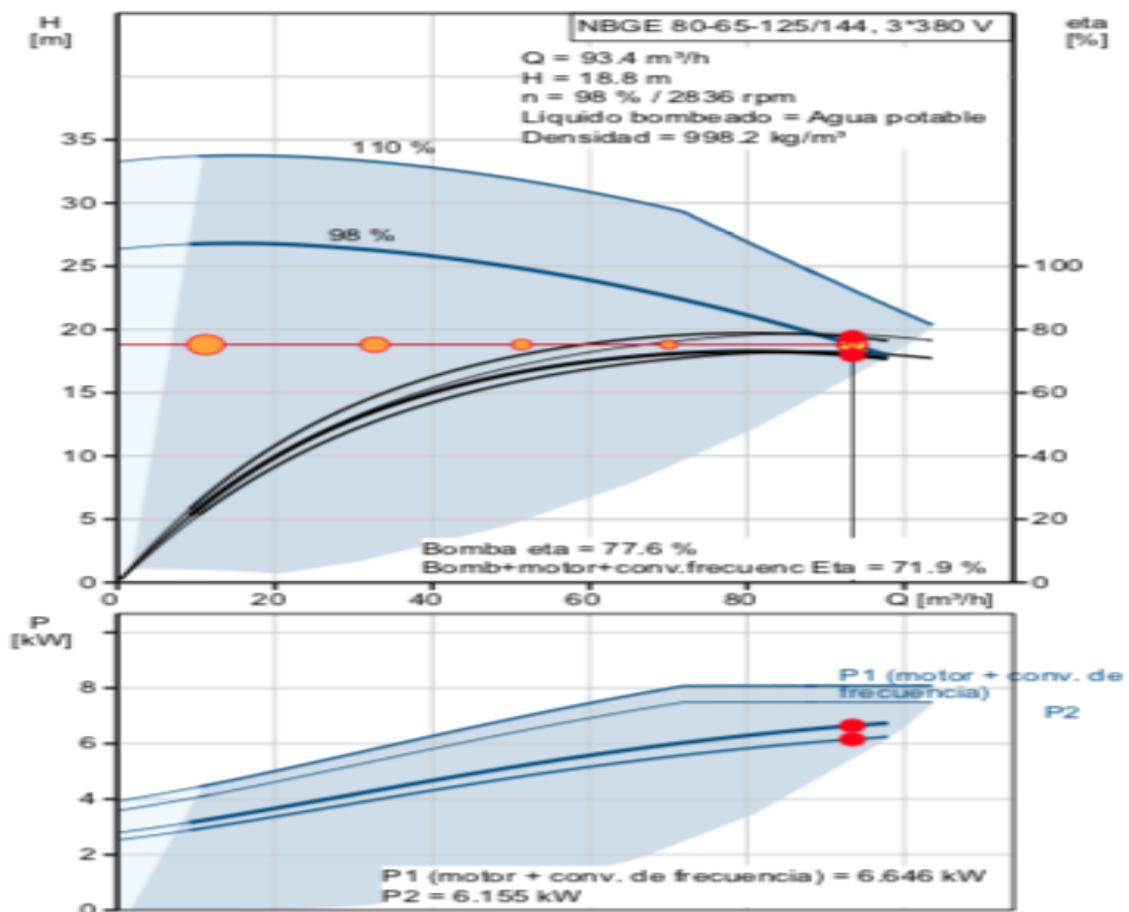


Figura 3. 32. Curvas características Grundfos NBGE 80. Fuente: Grundfos

Entre todas las bombas consultadas, se cree que, aunque la marca Lowara presenta un mayor rendimiento, es el *modelo Etaline 080-080-160 GGS AV11D200752 BKS BIE3M* del fabricante KSB el más idóneo para esta aplicación. Esta bomba será instalada junto con el recuperador de energía PX-300Q.

6. Postratamiento

Después de realizar el proceso de desalinización se obtiene el agua producto. Sin embargo, las aguas desaladas presentan, generalmente, una dureza y alcalinidad baja pudiendo ser nocivas para el fin dado. Por ello, se debe realizar un postratamiento que estabilice los diversos componentes químicos antes de ser enviada a red. Dado el escaso conocimiento en esta aplicación se detallarán brevemente los aspectos que se deben considerar.

Estos procesos se basan, principalmente, en las propiedades que se quieren conseguir en el agua. En este caso, los parámetros se reflejaron en la *Tabla 2. 2. perteneciente al Anexo II, Dimensionado del núcleo de membranas y recuperador de energía para ósmosis inversa*. Sin embargo, como ya se comentó, los parámetros más determinantes son el boro (0-2 miligramo por litro) y el pH (6-8,5).

Como se pudo comprobar en la *Tabla 2. 8. Parámetros finales*, los valores de finales para nuestra instalación se establecen en 1,491 mg/l para el boro y 5,48 para el pH. Este último se encuentra fuera de los valores establecidos en la bibliografía consultada, por tanto, se debe aumentar.

Entre los diversos postratamientos existentes se ha elegido la dosificación de un componente químico. El programa de membranas IMSDesing permite introducir el valor deseado de pH y automáticamente el software determinaba la cantidad de compuesto que se debe dosificar. En este caso se selecciona la sosa caustica (NaOH) aumentando hasta 6,77 el nivel de acidez.

El proceso de estabilización del agua producto se hace a la salida del núcleo de membranas. Se deben instalar unos equipos de bombeo que hagan circular el agua para su correcta mezcla en unos depósitos de mezclado.

Al igual que sucedió con el pretratamiento, este proceso también refleja una pérdida de carga en la presión del fluido. Se contemplan igualmente 2 bar de presión que permiten producir un movimiento continuo del fluido en los tanques de postratamiento para una correcta mezcla de los productos.

Por tanto, se debe instalar un sistema de bombeo que permita el movimiento del fluido. Se dimensiona siguiendo las operaciones realizadas anteriormente.

6.1. Bomba postratamiento.

En este caso, la bomba se situará entre el bastidor de membranas y el sistema de distribución a red. Este debe configurarse con una presión de entrada que imposibilite la aparición de cavitación en los equipos de bombeo.

6.2. Balance de energía

Considerando las pérdidas de carga en el sistema de postratamiento y una presión mínima de 2 bar a la entrada de los tanques de mezcla, los parámetros de funcionamiento de la bomba serán:

	BOMBA POSTRATAMIENTO
Presión de entrada	0 bar
Presión de salida	2 bar
Caudal producto	77,1 m ³ /h

Tabla 3. 6. Tabla de valores de bomba BAP. Fuente: Elaboración propia

El valor de la altura será simplificado de igual forma que para el estudio anterior. Queda:

$$H_B = \left(\frac{(2 - 0) \text{ bar} * 10^5 \frac{\text{Pa}}{\text{bar}}}{1027,44 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right) = 19,76 \text{ metros}$$

La altura que debe suministrar la bomba es de **19,76 metros**. El valor NPSH disponible en la instalación,

$$NPSH_d = \frac{(101325 - 2488,1) \text{ Pa}}{1027,44 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 9,80 \text{ metros}$$

La bomba no debe proporcionar más de **9,80 metros** de NPSH requerido.

6.3. Selección de bomba

Los datos para introducir en el selector de bomba online son:

	BOMBA POSTRATAMIENTO
Presión de entrada	0 bar
Presión de salida	2 bar
Caudal producto	77,1 m ³ /h
Altura	19,76 m
NPSHr	9,80 m

Tabla 3. 7. Datos para dimensionado de BAP. Fuente: Elaboración propia

Los equipos seleccionados en cada fabricante son los siguientes:

- **KSB.** La bomba de este fabricante que mejor rendimiento suministra es el modelo **Etanorm 100-080-250 BBSAA10GD300554B**. En el punto de funcionamiento para la instalación proporciona un rendimiento hidráulico del 78,5%.

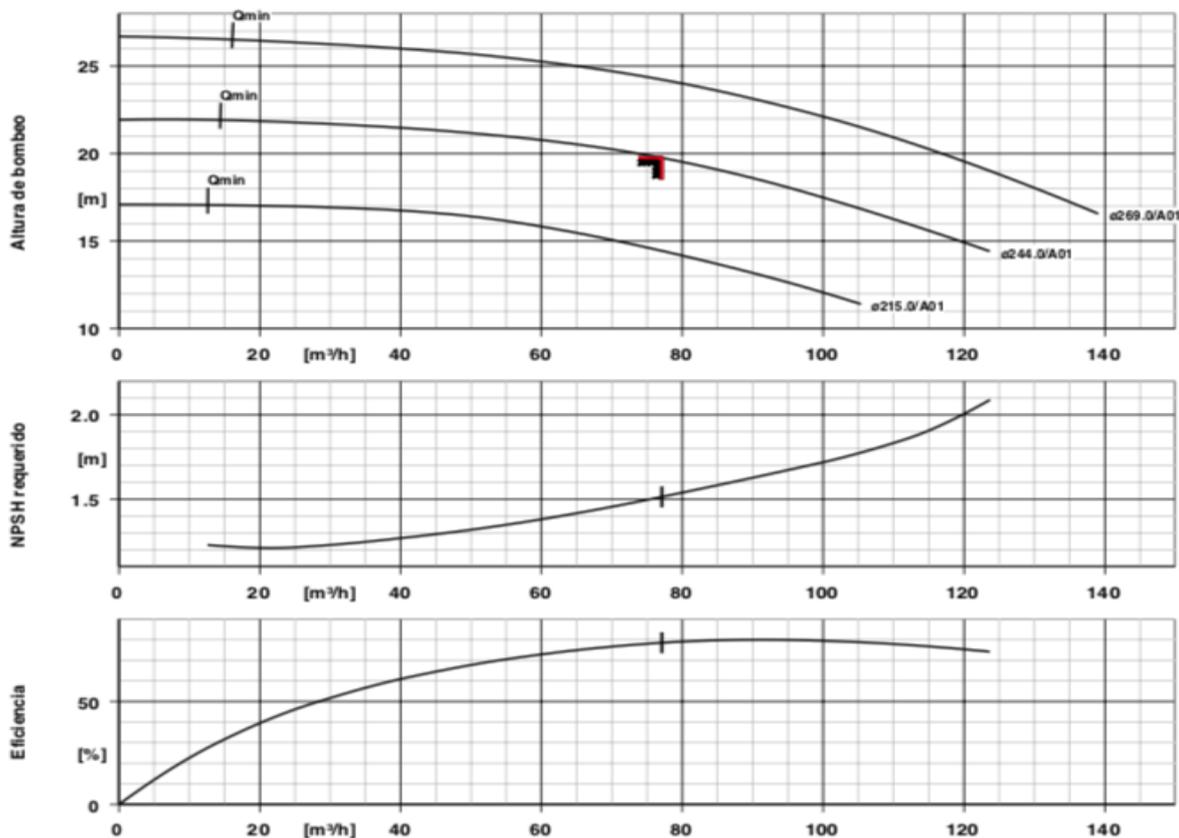


Figura 3. 33. Curvas características KSB ETANORM. Fuente: KSB

- **Lowara.** Se ha decidido elegir el *modelo ESHE 80-250/75/P45VSNA*, con un caudal suministrado de 77,1 metros cúbicos por hora y un rendimiento del 76,5%.

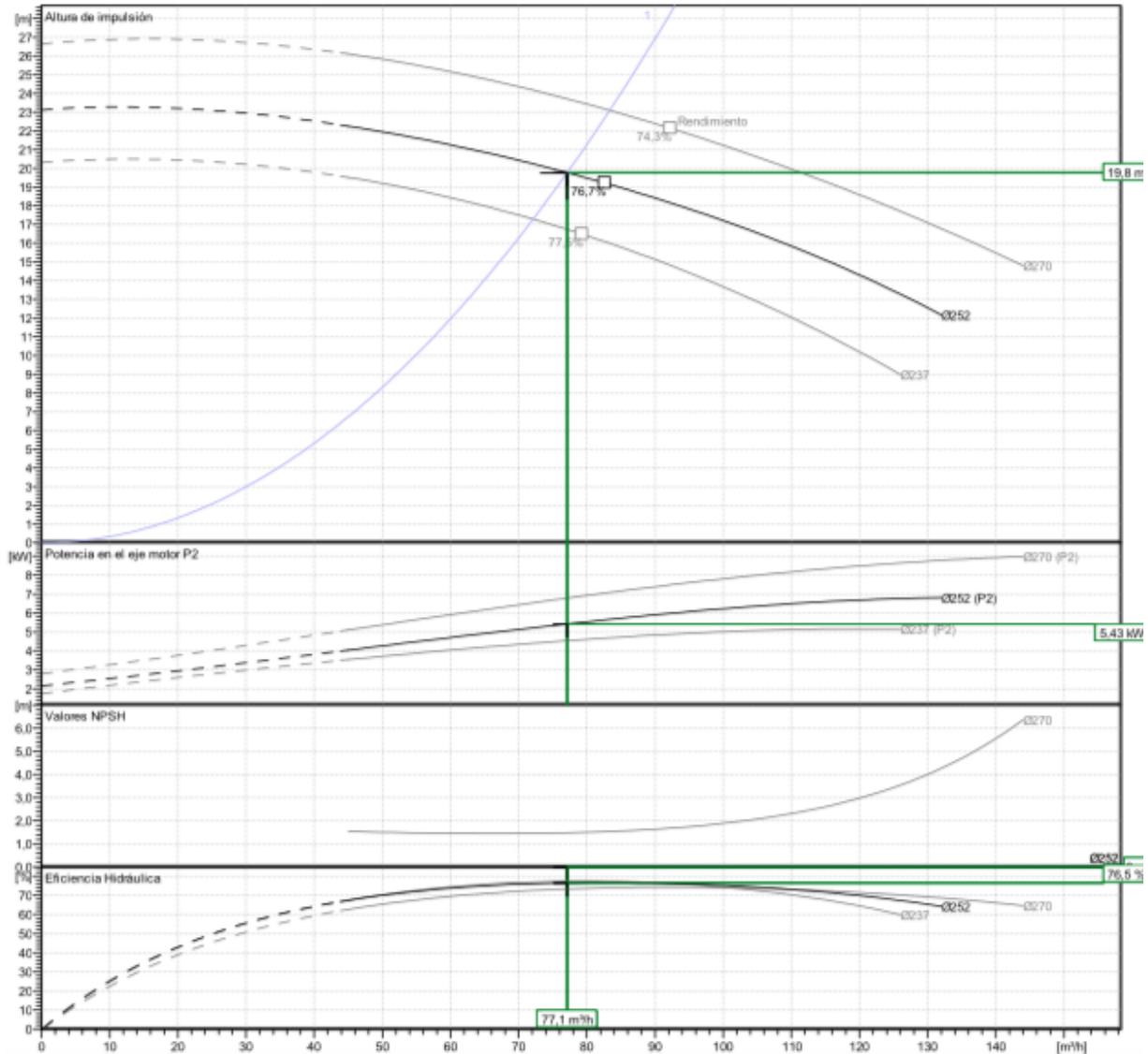


Figura 3. 34. Curvas características Lowara ESHE 80 250. Fuente: Lowara

- **Wilo.** Al igual que para la bomba tipo Booster, se elige la serie Movitec y el *modelo MVIE 9502-3/16/E/3-2*. Es capaz de proporcionar, para el punto de funcionamiento, un rendimiento del 74,58%.

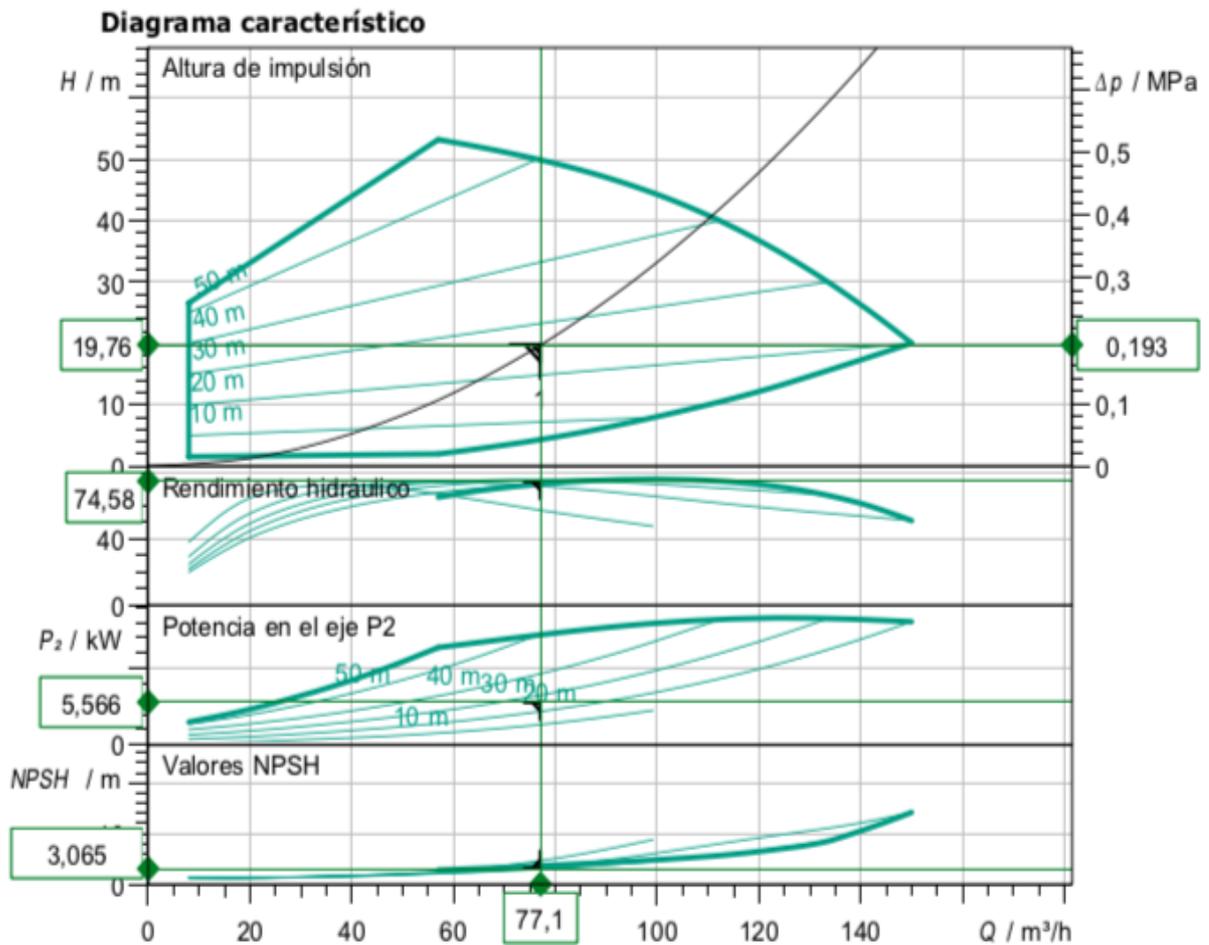


Figura 3. 35. Curvas características Wilo Movitec 9503. Fuente: Wilo

- **Grundfos.** El fabricante presenta el *modelo NBE 50-125/198 AF2ABQQE* que produce un rendimiento del $78,7\%$ para el punto de funcionamiento introducido.

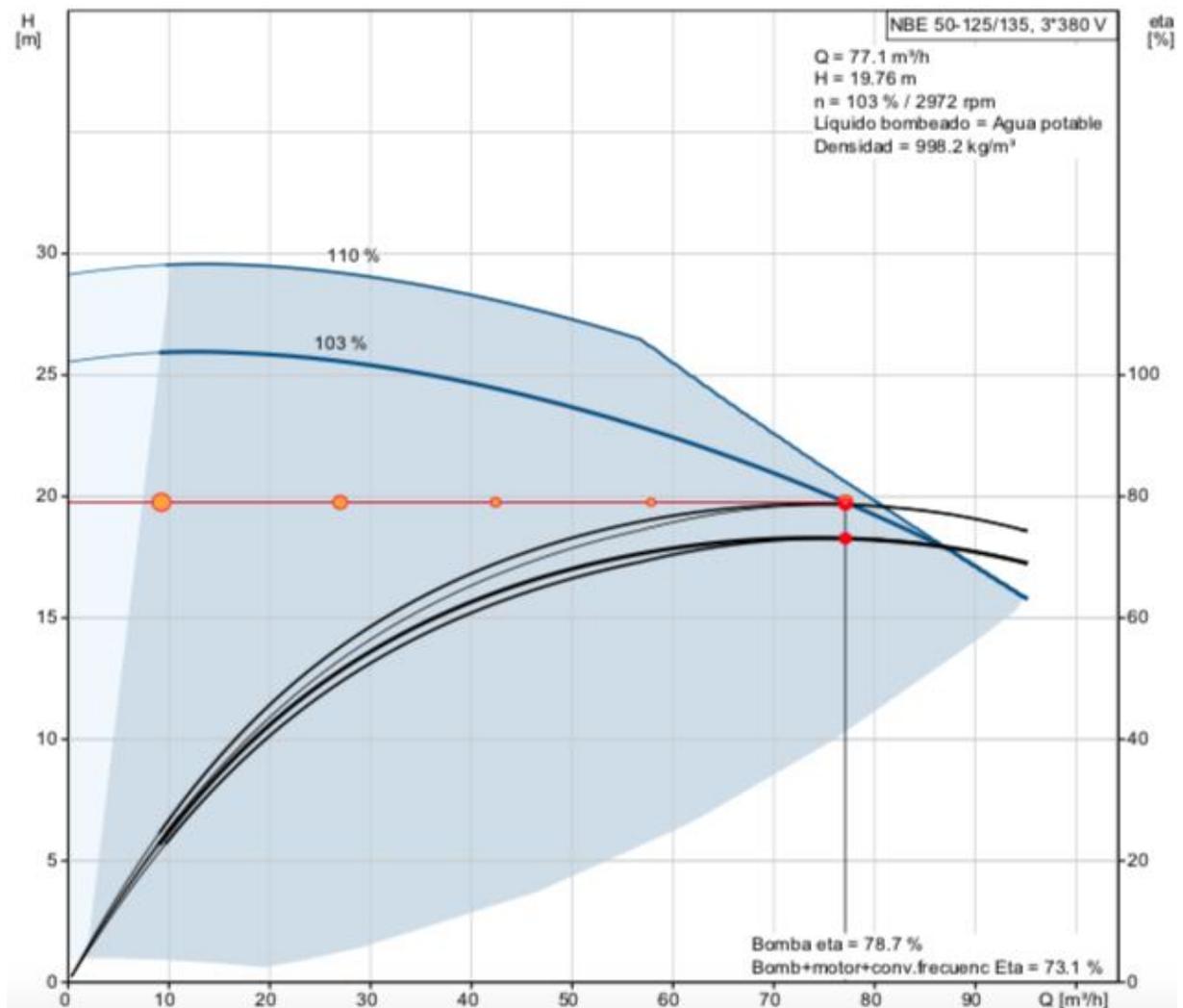


Figura 3. 36. Curvas características Grundfos NBE 50 200. Fuente: Grundfos

Entre los modelos estudiados, se ha elegido el equipo de la marca Grundfos, *modelo NBE 50-125/198 AF2ABQQE*. Además, a diferencia de los otros fabricantes, esta empresa facilita el coste económico de sus productos. En este caso, la bomba para llevar a cabo el postratamiento tiene un coste de **5.512 €**.

Elegido el sistema de postratamiento se pasa a desarrollar la última parte del proyecto. Distribuir el agua hasta las ubicaciones elegidas. Se detallarán los recorridos de las tuberías y los equipos de bombeo. Además, se dimensionarán los depósitos de almacenamiento necesarios para llevar a cabo la parada programada.

7. Almacenamiento hídrico

Antes de determinar cómo se llevará a cabo la distribución del agua se debe definir la capacidad y la ubicación de los depósitos de almacenamiento.

Siguiendo el proceso de obtención de la capacidad de almacenamiento en el *Anexo I, Dimensionado de las necesidades hídricas de los cultivos*, se obtuvo la *Tabla 1.20. Necesidades hídricas y almacenamiento*. Se adjunta a modo de recordatorio.

<i>RESUMEN NECESIDADES HÍDRICAS ANUALES Y ALMACENAMIENTO DE AGUA</i>				
<i>Mes</i>	<i>Necesidades hídricas</i>	<i>Producción</i>	<i>Volumen aportado</i>	<i>Volumen almacenado</i>
<i>Enero</i>	30892,88	0	-30892,88	61323,30
<i>Febrero</i>	16496,94	0	-16496,94	44826,36
<i>Marzo</i>	38836,71	0	-38836,71	5989,66
<i>Abril</i>	46637,18	55500	8862,82	14852,48
<i>Mayo</i>	51539,43	57350	5810,57	20663,05
<i>Junio</i>	55829,68	55500	-329,68	20333,37
<i>Julio</i>	69078,14	57350	-11728,14	8605,23
<i>Agosto</i>	63224,17	57350	-5874,17	2731,06
<i>Septiembre</i>	54030,76	55500	1469,24	1469,24
<i>Octubre</i>	34501,57	57350	22848,43	24317,67
<i>Noviembre</i>	15754,54	55500	39745,46	64063,13
<i>Diciembre</i>	29196,95	57350	28153,05	92216,18

Se comprueba que para poder realizar una parada de tres meses se requiere un almacenamiento mínimo de **92.216,18 m³** en el mes de diciembre. A dicho valor se le deberá aplicar el porcentaje de distribución calculado. Recordando, el 65% del agua se envía a la zona alta del municipio y el 35% a la superficie colindante con la planta de desalación.

Siguiendo este criterio se estudiarán los depósitos de almacenamiento y la distribución por separado.

7.1. Almacenamiento inferior

La ubicación de los depósitos de almacenamiento para la zona de menor superficie de cultivo será la primera en estudiar. En este caso, para ahorrar costes en el proyecto, se ha decidido aprovechar las infraestructuras existentes en la zona. Se evita, de esta manera, la construcción de un nuevo depósito de gran capacidad. Se enumeran los pasos seguidos hasta conseguir el objetivo:

1. **Cálculo del volumen.** Como se comentó anteriormente, la capacidad total de almacenamiento se distribuye en dos ubicaciones diferentes. En este caso, al aplicar un porcentaje del 35%, para la zona de Playa de Santiago (inferior), el almacenamiento mínimo es de 32276 m^3 de agua.
2. **Ubicación y capacidad de los depósitos.** A continuación, se deben ubicar los depósitos de almacenamiento. En este caso, analizando las infraestructuras hídricas de la zona, se encuentran una serie de tanques de capacidad media. Se refleja en la Figura 3.37. una imagen representativa.



Figura 3. 37. Almacenamiento hídrico de Playa de Santiago. Fuente: Google Earth

Analizando la fotografía obtenida de Google Earth se diferencian 6 tanques de almacenamiento. Haciendo uso de la herramienta de medición del programa, se

estipulará el volumen a través de la superficie. Se supondrá una altura estándar de 8 metros, común para este tipo de tanques.

<i>TANQUES DE ALMACENAMIENTO</i>		
<i>Depósitos</i>	<i>Área (m²)</i>	<i>Volumen (m³)</i>
<i>Depósito 1</i>	403	3224
<i>Depósito 2</i>	485	3880
<i>Depósito 3</i>	737	5896
<i>Depósito 4</i>	252	2016
<i>Depósito 5</i>	286	2288
<i>Depósito 6</i>	313	2504
<i>Total</i>	2476	19808

Tabla 3. 8. Tanques de almacenamiento. Fuente: Elaboración propia

3. **Construcción del depósito.** Se concluye que con las infraestructuras existentes no se logra el almacenamiento mínimo. Por ello, se debe construir un nuevo tanque. Las dimensiones serán 40 metros de largo, 40 metros de ancho y 8 metros de profundidad. En total, 12800 metros cúbicos de agua que sumados a los 19808 existentes se obtienen **32608 m³**. En este proyecto no se contemplan los estudios que se deben seguir para la construcción de este. Se trata de un campo de aplicación diferente al objetivo del proyecto. Únicamente se mostrará la ubicación más idónea para su construcción. El tanque por construir se denominará tanque 7. (Figura 3.39).

Del mismo modo, se calcula el almacenamiento del agua para la parte alta del municipio.

7.2. Almacenamiento superior

Siguiendo el procedimiento establecido en el apartado anterior se obtiene la ubicación y la capacidad del depósito de mayor volumen.

1. **Cálculo del volumen.** En este caso, la capacidad productiva del cultivo determina un porcentaje del 65%. El almacenamiento mínimo superior será de **59940 m³**
2. **Ubicación y capacidad de los depósitos.** Dado el volumen que debe tener el depósito y la orografía, no se podrá realizar una distribución similar a la anterior. En esta

zona del municipio se deberá almacenar el agua en un único depósito y, a continuación, distribuirla por la comarca.

Además, se sabe que el Cabildo de La Gomera instaló una red de tuberías para la distribución del agua de riego por toda la isla. El inicio de este recorrido se suele establecerse en un depósito de gran capacidad, por ejemplo, una presa. Se muestra en la Figura 3.38. la distribución de la red de tuberías en el municipio de Alajeró, disponible en la herramienta gráfica de Grafcan.



Figura 3. 38. Red de tuberías Alajeró. Fuente: Grafcan

Aprovechando esta circunstancia y dado el poco interés que se le dio a este proyecto, debido a la escasez de agua en la zona, se cree oportuno utilizar esta infraestructura y resolver, de esta manera, uno de los problemas de la comarca. Se utilizará la presa de Canabria como almacenamiento hídrico de la zona.

Con esta medida, además, se reducen los costes económicos relacionados con la distribución del agua hasta las superficies de cultivo u la construcción de un almacenaje de esta capacidad. La ubicación de la presa de Canabria, lugar de partida de la red de tuberías y almacenamiento hídrico superior, se refleja en la Figura 3.39.



Figura 3. 39. Almacenamiento hídrico presa de Canabria. Fuente: Google Earth

Analizando la fotografía obtenida de Google Earth se calcula la superficie de la presa. Realizando la medición con la herramienta gráfica se determina un total de 9000 metros cuadrados. Considerando una altura de 10 metros, se tendrá un volumen de **90000 metros cúbicos de agua**. Capacidad más que aceptable para este proyecto. Además, se tendrá cierto margen respecto a las precipitaciones que puedan producir un llenado de la presa. Se evita de esta manera un desperdicio de agua innecesario. Por otro lado, y, aunque no tiene demasiada relevancia en el estudio, esta presa, dada la cercanía con el parque natural del Garajonay, es utilizada para el repostaje de agua por parte de los vehículos aéreos de extinción de incendio. Se reduce el recorrido que deben realizar los helicópteros para captar el agua de sus balsas.

Una vez se han establecidos las ubicaciones y capacidades de los depósitos de almacenamiento se debe llevar el agua hasta ellos. Aparece aquí el gran desafío ingenieril de este proyecto. Se enviará el agua hasta la cota más elevada del municipio. La presa de Canabria se encuentra a una altitud de 1260 metros aproximadamente.

A continuación, se realizará el estudio que permita distribuir el agua hasta cumplir con el objetivo.

8. Distribución del agua

Se inicia el desarrollo para llevar a cabo la distribución de agua. Al igual que en el apartado anterior, se distinguirá entre la distribución inferior y superior del municipio.

8.1. Distribución inferior

Al igual que para el almacenamiento, se deberá trasvasar el 35% de la producción diaria hasta los diferentes tanques. Representando en cifras, se habla de 27 metros cúbicos por hora. Para evitar realizar una instalación de tubería a cada uno de los tanques se ha decidido trasvasar el agua a un único tanque y, a partir de ahí, instalar la distribución de tuberías hacia el resto. Se evita de esta forma el uso excesivo equipos de bombeo individuales.

8.1.1. *Diseño distribución inferior*

Con la herramienta gráfica “Ruta” de Google Earth se ha trazado un recorrido desde la desaladora hasta los tanques. Se obtiene así la ruta más desfavorable. También se conocerá cual es la ubicación más idónea para la construcción del tanque proyectado. Se muestra a continuación la leyenda y red de tubería de cada distribución.

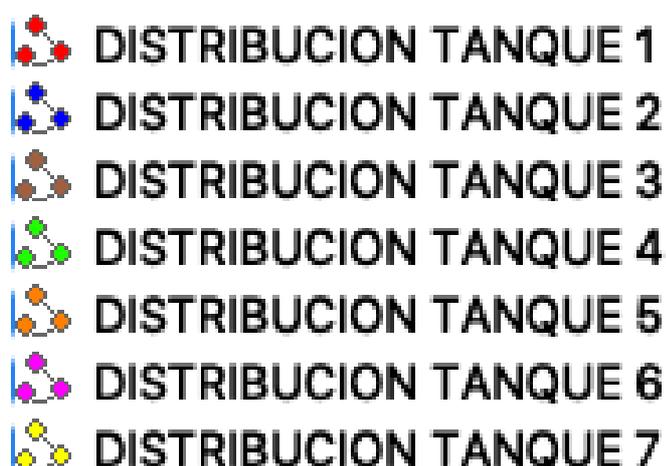




Figura 3. 40. Distribución red de tuberías. Fuente: Google Earth

Estudiando el terreno y la orografía, se cree idóneo realizar el tanque 7 cercano al número 1. Se representa con el rectángulo de color naranja en la parte superior de la Figura 3.40. El terreno presenta un espacio abierto y de fácil acceso donde es posible construir una infraestructura de estas dimensiones sin ningún inconveniente.

Además, analizando la imagen, se comprueba que es aceptable enviar el agua hasta el tanque construido y, posteriormente, instalar la red de tuberías hacia los otros tanques. El único inconveniente que presenta es su cota. Es posible que se requiera de un pequeño equipo de bombeo que asuma la altura hasta los tanques más elevados. Se estudiará esta etapa del proyecto de igual forma que para los equipos de bombeo anteriores. Por ello, no se hará mayor inciso en las operaciones a seguir y los resultados obtenidos debido a la simetría del cálculo.

8.1.2. *Tubería de distribución inferior*

Las tuberías de distribución hacia los tanques producirán una pérdida de carga que deberá ser suplida por los equipos de bombeo. Se debe obtener, por tanto, los valores necesarios para el cálculo de estas.

1. El material de la tubería seguirá siendo PRFV dada sus buenas propiedades mecánicas.
2. El diámetro de la tubería, según el criterio de Bonnet, para un caudal de 27 metros cúbicos por hora debe ser 117 milímetros. El catálogo muestra que el inmediatamente superior es 125 milímetros.

DN	L	ESPESOR "E"				
		PN2.5	PN4	PN6	PN10	PN16
25	6000	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
32	6000	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
40	6000	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
50	6000	5.0	5.0	5.0	5.0	6.0
65	6000	5.0	5.0	5.0	5.0	6.5
80	6000	5.0	5.0	5.0	5.0	6.0
100	9000	5.0	5.0	5.0	5.5	7.0
125	10000	5.0	5.0	5.0	6.0	8.0
150	10000	5.0	5.0	5.0	6.5	9.0
200	12000	5.0	5.0	6.0	8.0	10.5
250	12000	5.0	5.0	6.5	9.0	13.0
300	12000	5.0	5.5	7.5	10.5	15.0
350	12000	5.0	6.0	8.0	11.5	17.5
400	12000	5.5	6.5	9.0	13.0	19.5
450	12000	5.5	7.5	10.0	14.5	21.5
500	12000	6.0	8.0	10.5	15.5	23.5
600	12000	6.5	9.0	12.0	18.0	–
700	12000	7.0	10.0	13.5	20.5	–
800	12000	8.0	11.0	15.0	22.5	–
900	12000	8.5	12.0	16.5	26.0	–
1000	12000	9.0	13.0	18.0	28.5	–

Figura 3. 41. Diámetros de tubería PRFV. Fuente: Ollearis

3. Si se analiza el recorrido de la tubería de distribución con la herramienta de trazo de ruta, Google Earth desvela que la longitud de la tubería es de 853 metros. Se consideran 860 metros en el estudio. Se representa el perfil de elevación en la Figura 3.42.



Figura 3. 42. Perfil de elevación inferior. Fuente: Google Earth

Conocido el diámetro y la longitud de las tuberías se debe seleccionar el equipo de bombeo. Será el encargado impulsar el fluido hasta el tanque número 7.

8.1.3. Balance de energía

Para obtener el valor de la altura de la bomba se realiza un balance de energía entre la desaladora y el tanque número 3. Simplificando:

- Punto 1. Nivel mínimo de agua en el tanque de postratamiento.

V_1 se supone como cero por criterios ya justificados.

Z_1 se establece en el nivel mínimo de agua del tanque de postratamiento. Este tendrá una altura de 3 metros sumados a los 6 metros de la instalación, será de **9 metros**.

P_1 corresponde a la presión del agua. Será igual a la presión hídrica de 3 metros de agua, es decir, **0,3 bar**.

- Punto 2. Entrada al tanque número 7.

V_2 para el diámetro considerado es **0,61 m/s**.

Z_2 será la cota del tanque número 3. En este caso, como se puede comprobar en el perfil de elevación, será de **31 metros**.

P_2 corresponde a la presión de salida del fluido. Se considera **1,5 bar** de presión para evitar cualquier tipo de complicación y mantener el agua en constante movimiento disminuyendo la aparición de actividad biológica.

Únicamente quedaría obtener las pérdidas de carga correspondientes a las tuberías y a los accesorios.

8.1.4. Pérdidas de carga

Utilizando nuevamente el documento Excel e introduciendo los valores necesarios en las casillas, se obtienen como resultado unas pérdidas de carga totales de **2,64 metros**.

V =	0,61	m/s
v ² / 2g =	0,02	m
R _s =	75.495	adim.
f =	0,0192	adim.
FUNCION-OBJ.	0,000	-
l _{equiv. acc. total} =	43,50	m
L _{equiv. Total} =	903,50	m
Σh _f =	2,64	m

Figura 3. 43. Pérdidas de carga distribución inferior.
Fuente: Excel

Sustituyendo los valores obtenidos,

$$H_B = \left(\frac{(0,61^2 - 0^2) \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) + (22) m + \left(\frac{(1,5 - 0,3) bar * 10^5 \frac{Pa}{bar}}{1027,44 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) + 2,64 m = 31,63 m$$

La altura que debe suministrar la bomba es de **31,63 metros**. Del mismo modo se calcula el NPSH disponible.

$$NPSH_d = \frac{(0^2 - 0,61^2) \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} + \frac{(10325 - 2488,1) Pa}{1027,44 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 16,13 m$$

La bomba no debe proporcionar más de **16,13 metros** de NPSH requerido. A partir de estos resultados se elige el equipo de bombeo más adecuado para esta aplicación.

8.1.5. Selección de bomba

Los parámetros para obtener el equipo de bombeo están definidos en la siguiente tabla.

	BOMBA DE POSTRATAMIENTO
Presión de entrada	0 bar
Presión de salida	1,5 bar
Caudal producto	27 m ³ /h
Altura	31,63 m
NPSHr	16,13 m

Tabla 3. 9. Datos para dimensionado de distribución. Fuente: Elaboración propia

Entre los fabricantes consultados se han elegido los siguientes modelos.

- **KSB. Modelo MovitecV F060/06-BIX13ES112A7VW.** El punto de funcionamiento para esta instalación proporciona un rendimiento hidráulico de 78,5%.

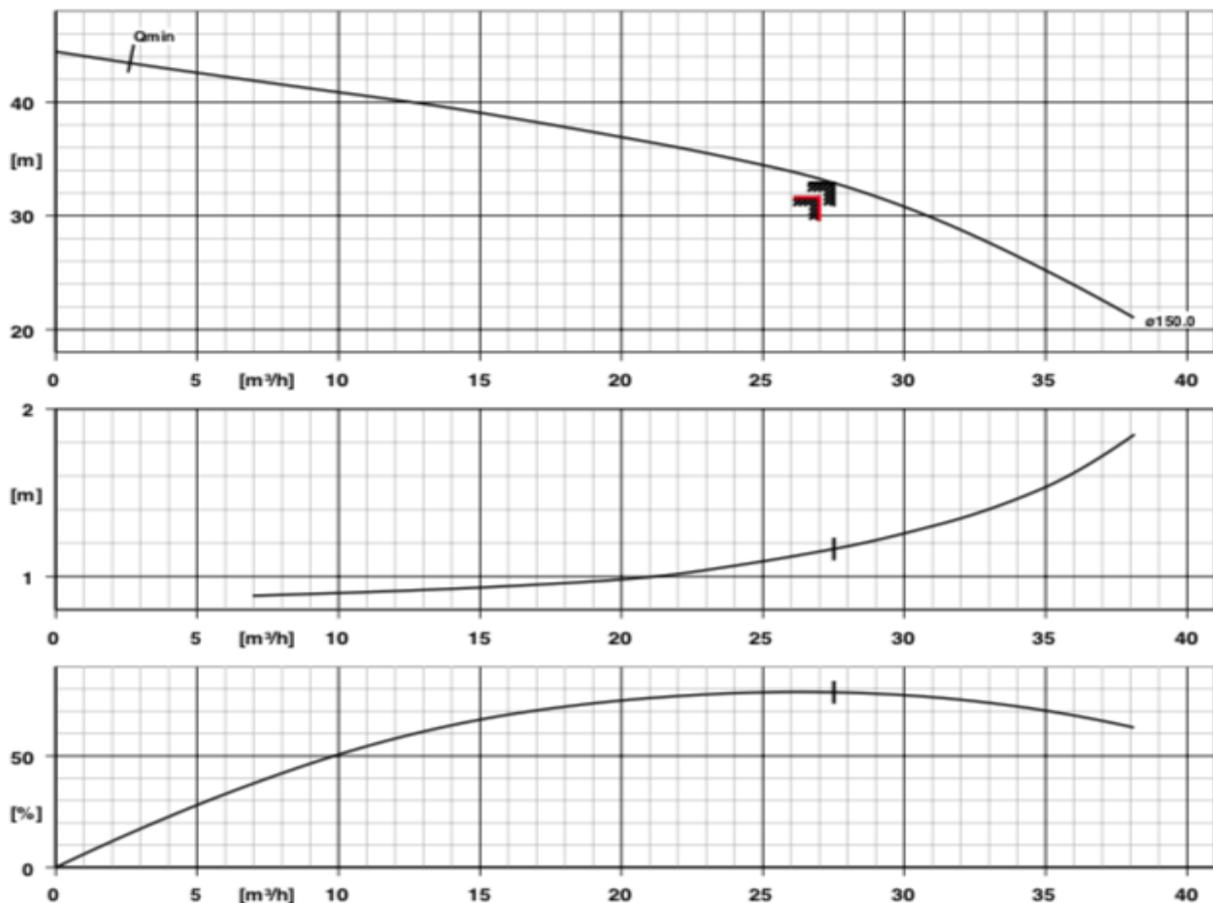


Figura 3. 44. Curvas características KSB Movitec V F060. Fuente: KSB

- **Lowara.** Se ha decidido elegir el **modelo LNEE 50-160/55/P25VCS4**, con un rendimiento del 62,42%.

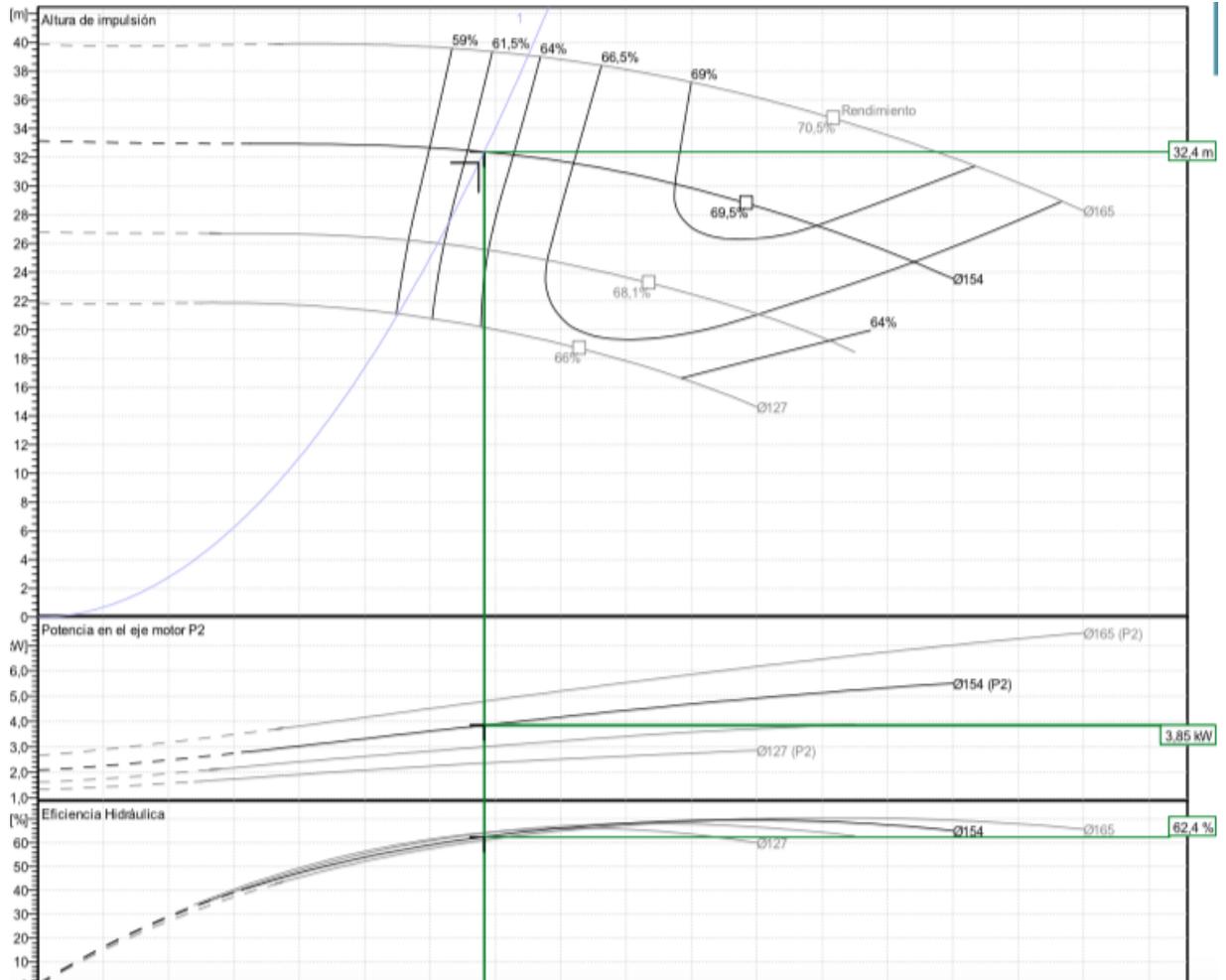


Figura 3. 45. Curvas características Lowara LNEE 50 160. Fuente: Lowara

- **Wilo. Modelo Helix VE 3602-5,5-4/16/E/S-FF240.** Es capaz de proporcionar, para el punto de funcionamiento, un rendimiento del 71,85%.

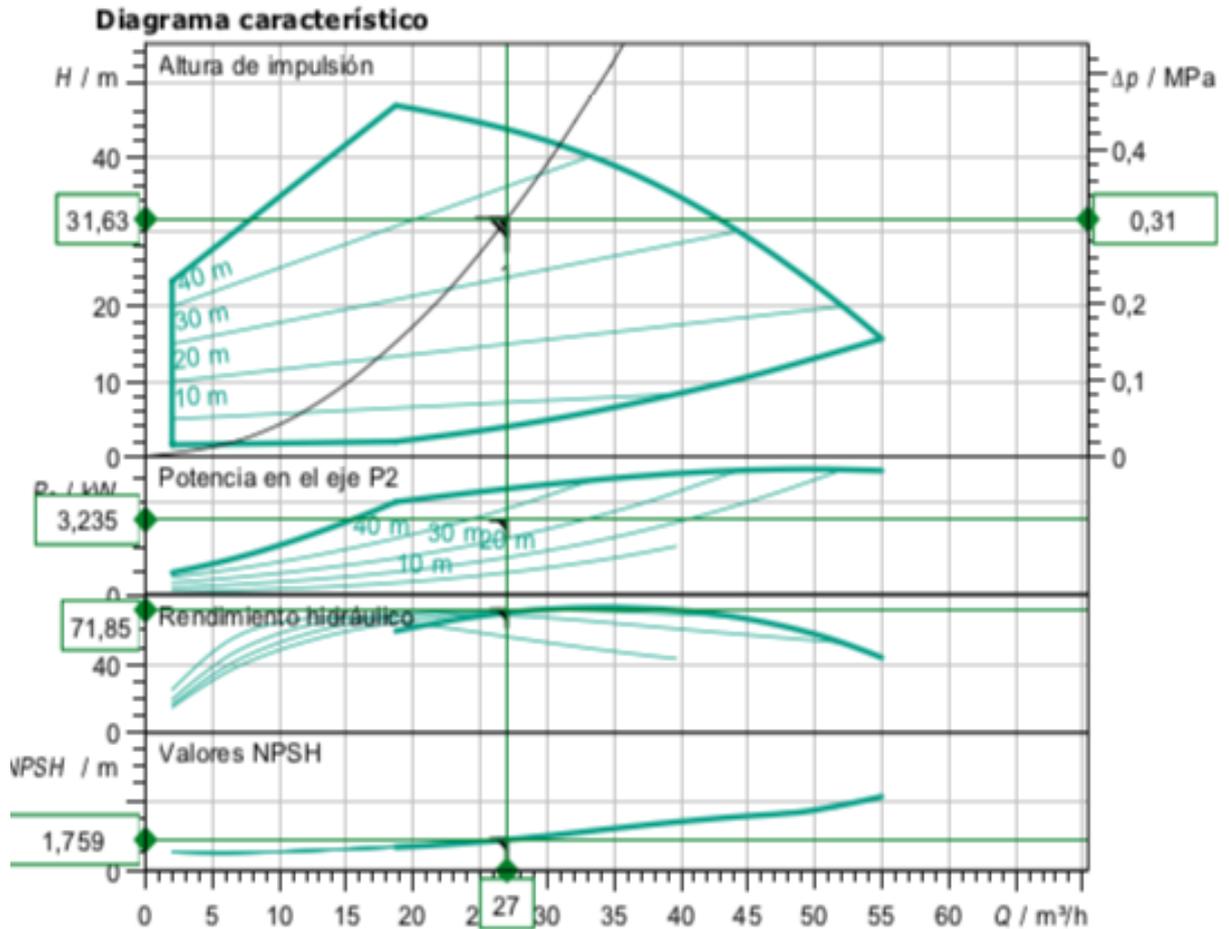


Figura 3. 46. Curvas características Wilo Helix VE 3602. Fuente: Wilo

- **Grundfos. Modelo CRE 20-3 A-F-A-E-HQQE** que produce un rendimiento del 67% para el punto de funcionamiento introducido.

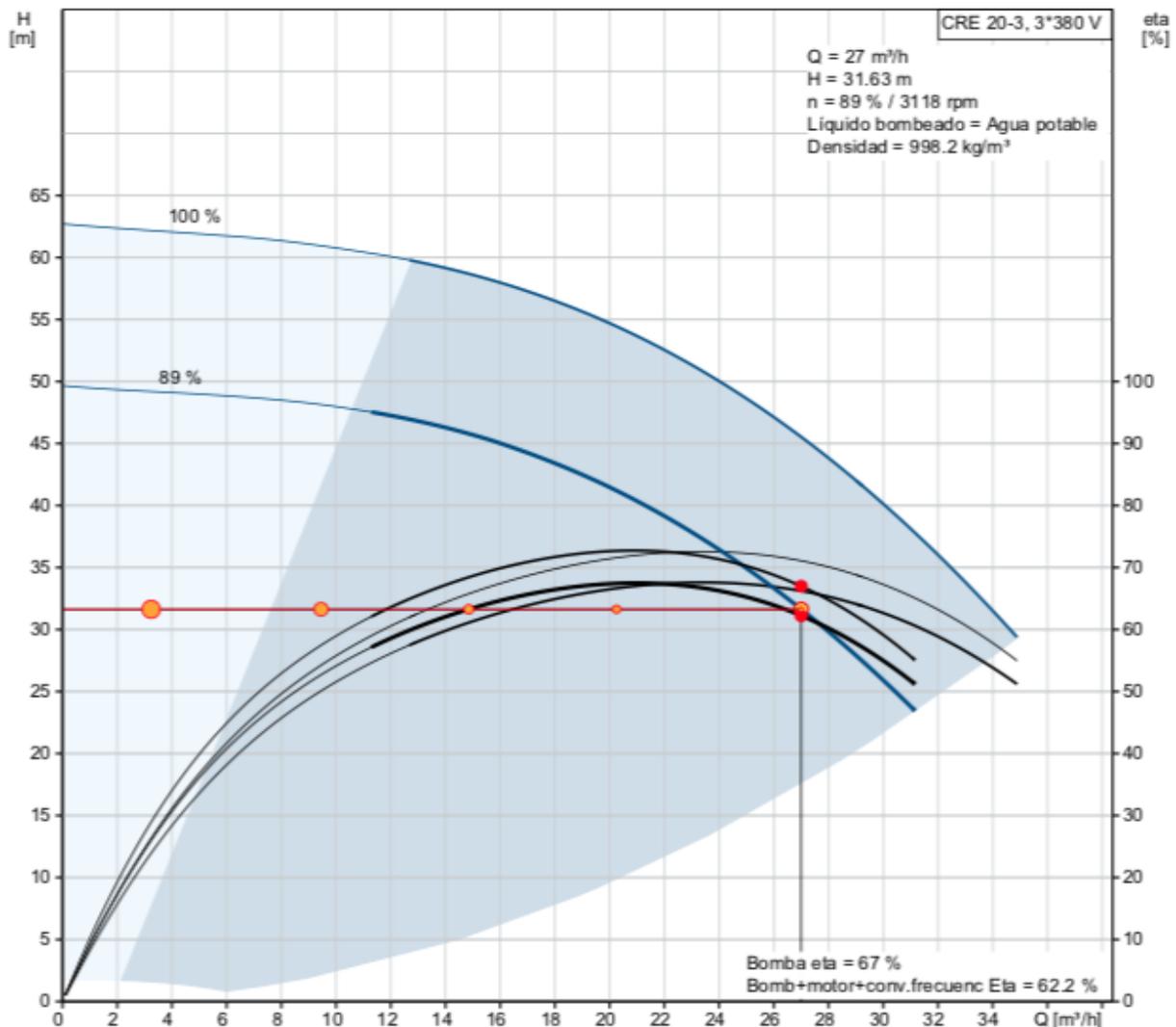


Figura 3. 47. Curvas características Grundfos Modelo CRE 20-3. Fuente: Grundfos

Finalmente siguiendo el criterio de mayor eficiencia se ha elegido el *modelo Movitec VF060/06-B1X13ES112A7V*.

Por último, se realiza un pequeño estudio sobre la distribución de agua entre tanques. Será la que permita obtener el almacenamiento durante los meses de parada.

Para explicarlo de forma correcta se mostrará el recorrido que tiene el fluido desde que sale de la planta de desalación hasta que llega al cultivo.

1. Una vez se tiene el agua producto en condiciones óptimas para su consumo se envía hasta el tanque 7 con un caudal de $27 \text{ m}^3/\text{h}$.
2. El tanque 7 representa el 39% del almacenamiento inferior total, por tanto, se deberá trasvasar parte del agua para evitar su rebose. Considerando la orografía se decide

enviar parte del caudal hasta el tanque 1. Se instala una tubería que permita el transporte de agua hasta el tanque 1 pero también posibilite el almacenaje en el tanque 7.

3. Desde el tanque 1 se distribuye el agua hasta el tanque 2, el tanque 4 y el tanque 6 siguiendo el mismo criterio de trasvase y almacenamiento entre ellos.
4. Por último, para salvar la cota de los tanques 3 y 5 se instala un pequeño equipo de bombeo. Se captará agua desde el tanque 2 y se enviará hasta el tanque 3, y, por gravedad hasta el tanque 5.

A continuación, y a modo de aclaración, se define la distribución final de tuberías. En rojo se establece la instalación para los tanques 7-1-2-4-6 y en verde para los tanques 2-3-5.



Figura 3. 48. Distribución final. Fuente: Google Earth

Se concluye el apartado realizando una tabla con las longitudes y diámetros de las tuberías que permitan el trasvase y el almacenamiento. Las longitudes se han obtenido de la herramienta gráfica de Google Earth. Los diámetros se han ajustado a los comerciales. El caudal que se trasvasa se calcula en función de la capacidad de cada tanque. Por último, las alturas

necesarias de las bombas se han obtenido siguiendo los criterios anteriores. No se indaga en su desarrollo.

CLASIFICACIÓN DE TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN INFERIOR				
Tubería	Longitud estudio	Diámetro final	Caudal	Altura
Tubería 7-1	65 m	100 mm	16,40	-1,65
Tubería 1-2	150 m	100 mm	13,73	-1,56
Tubería 2-4	85 m	65 mm	3,74	-2,39
Tubería 4-6	115 m	50 mm	2,07	-3,69
Tubería 2-3	80 m	85 mm	6,78	17
Tubería 3-5	85 m	50 mm	1,89	-2,8

Tabla 3. 10. Clasificación de tuberías de distribución inferior. Fuente: Elaboración propia

Analizando los valores obtenidos se comprueba que únicamente hará falta un pequeño equipo de bombeo que sea capaz de salvar la cota entre los tanques 2 y 3.

	BOMBA TANQUE
Presión de entrada	0 bar
Presión de salida	0 bar
Caudal producto	6,78 m ³ /h
Altura	17 m

Tabla 3. 11. Datos para dimensionado de bomba. Fuente: Elaboración propia

Entre los fabricantes estudiados se ha elegido el **modelo RESIBOOST MMW09DE/5VM04P07M** de Lowara. Este equipo brinda para el punto de funcionamiento un rendimiento del 44,65%. Para equipos de menor capacidad el rendimiento suele recaer en comparación con los obtenidos en las otras partes del proyecto.



Figura 3. 49. Bomba Lowara Resiboost.
Fuente: Lowara

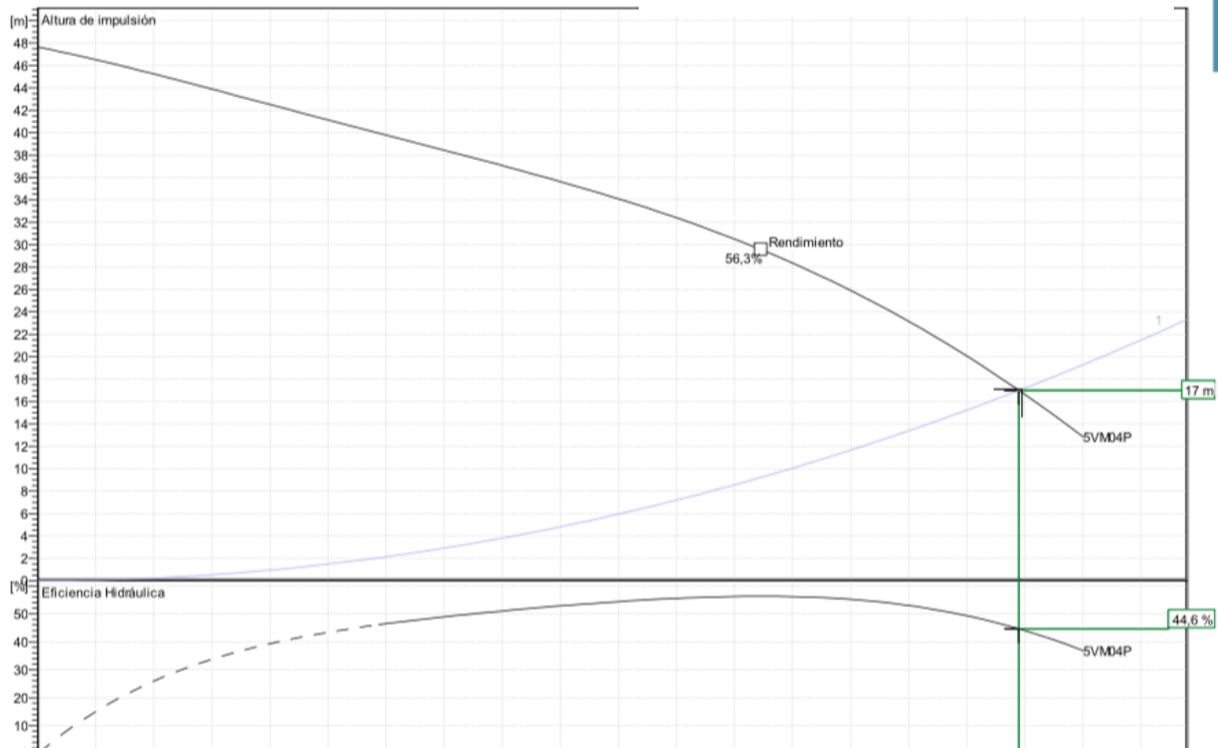


Figura 3. 50. Curvas características Lowara RESIBOOST. Fuente: Lowara

Analizado el sistema de distribución inferior en su totalidad se pasa a estudiar la distribución de agua superior. Se seguirán los mismos criterios de desarrollo.

8.2. Distribución superior

Se presenta en este apartado el desafío ingenieril más destacable del proyecto. Realizar la distribución de agua hasta la parte superior del municipio. En este estudio se deberá trasvasar el 65% del agua producto. Entorno a 50 metros cúbicos por hora. A diferencia del caso anterior, al poseer una única infraestructura para su almacenamiento solo se requerirá de una instalación de tuberías. Nuevamente, la distribución de agua hacia los cultivos no se contemplará en este estudio y se dará por válida la existente actualmente.

8.2.1. Diseño distribución superior

De igual forma que para el caso anterior, se hace uso de la herramienta gráfica de Google Earth para trazar una ruta desde la desaladora hasta la presa y obtener las longitudes de las tuberías. Actualmente existe una red de tuberías que recorre toda la isla de La Gomera para

abastecer de agua potable a todos los municipios. Se cree oportuno utilizar de guía de dicho recorrido para obtener las longitudes de nuestras tuberías. Después de trazar y analizar los valores de la instalación se piensa que, dada la distancia y la cota que se debe salvar es preferible realizar el bombeo en dos etapas. Se ubicará una estación de bombeo a la mitad del recorrido. Esta será conectada a la red eléctrica local y el gasto de energía que produzca será aportado por la fuente de suministro renovable, *Anexo I, Dimensionado del sistema eólico. Abastecimiento de energía eléctrica.*

Se visualiza en la siguiente figura el recorrido de la tubería de distribución superior.



Figura 3. 51. Recorrido tuberías de distribución superior. Fuente: Google Earth

Para una mejor comprensión se han diferenciado con dos colores los tramos existentes. En azul, el Tramo 1. Irá desde la desaladora hasta la zona media del municipio. La cota inicial se sitúa en 9 metros. La final se establece en 669 metros (nivel de la estación de bombeo).

Por otro lado, la longitud de tubería ronda los 5220 metros. En el estudio se considerarán 5500 metros. Se establece un cierto margen de seguridad dada la orografía presente.



Figura 3. 53. Perfil de elevación Tramo 1. Fuente: Google Earth

Del mismo modo, el color amarillo representa el Tramo 2. Con 6200 metros de longitud de estudio, recorre la zona alta del municipio desde la estación de bombeo hasta la presa de Canabria. Se parte de una cota de 669 metros y se finaliza en 1268 metros.



Figura 3. 52. Perfil de elevación Tramo 2. Fuente: Google Earth

Se conoce el recorrido y la longitud de la tubería de distribución superior. Se deben obtener los diámetros y las pérdidas de carga de estas.

Por último, se determina la altura de la bomba y se selecciona un equipo que satisfaga las necesidades de suministro.

8.2.2. Tubería de distribución superior

1. El material de la tubería seguirá siendo PRFV dada sus buenas propiedades mecánicas.
2. El diámetro de la tubería, según el criterio de Bonnet, para un caudal de 50 metros cúbicos por hora debe ser 149 milímetros. Se elige 150 milímetros como comercial.

Se calculan las alturas de las bombas. Al existir dos tramos de tubería, también se diferenciarán los equipos de bombeo.

8.2.3. Balance de energía Tramo 1

Para obtener el valor de la altura de la bomba se lleva a cabo un balance de energía entre la desaladora y la estación de bombeo.

- *Punto 1. Nivel mínimo de agua en el tanque de postratamiento.*

V_1 se supone como cero por criterios ya justificados.

Z_1 se establece en el nivel mínimo de agua del tanque de postratamiento. Este tendrá una altura de 3 metros sumados a los 6 metros de la instalación nos quedan, **9 metros**.

P_1 corresponde a la presión del agua. Será igual a la presión hídrica de 3 metros de agua, es decir, **0,3 bar**.

- *Punto 2. Estación de bombeo.*

V_2 para el diámetro considerado es **0,79 m/s**.

Z_2 será la cota la estación de bombeo. En este caso, como se puede comprobar en el perfil de elevación, será de **669 metros**.

P_2 corresponde a la presión de salida del fluido. Se **1,5 bar** de presión para evitar la cavitación en la aspiración de la bomba de la estación.

Utilizando nuevamente el documento Excel e introduciendo los valores necesarios en las casillas, se obtienen unas pérdidas de carga totales de **20,57 metros**.

Sustituyendo los valores,

$$H_B = \left(\frac{(0,79^2 - 0^2) \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) + (669 - 9) + \left(\frac{(1,5 - 0) \text{bar} * 10^5 \frac{Pa}{\text{bar}}}{1027,44 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) + 20,57 \text{ m} = 696 \text{ m}$$

La altura que debe suministrar la bomba es de **696 metros**. No debe proporcionar más de **35 metros** de NPSH requerido.

8.2.4. Selección de bomba Tramo 1

Los parámetros para obtener el equipo de bombeo están definidos en la siguiente tabla.

<i>BOMBA TRAMO 1</i>	
<i>Presión de entrada</i>	<i>0 bar</i>
<i>Presión de salida</i>	<i>1,5 bar</i>
<i>Caudal producto</i>	<i>50 m³/h</i>
<i>Altura</i>	<i>696 m</i>
<i>NPSHr</i>	<i>35 m</i>

Tabla 3. 12. Datos para dimensionado de distribución superior Tramo 1. Fuente: Elaboración propia

Dada la característica de bombeo, únicamente se ha conseguido un fabricante que posibilite alcanzar los parámetros de funcionamiento. De los equipos facilitados por Lowara el más idóneo para esta aplicación es la bomba axial **MPAE65A/13A/BF1600/W25VDCC4**

Para un punto de operación bastante próximo es capaz de proporcionar un 71,7% de rendimiento. Al poseer un gran consumo energético, se debe considerar la gran eficiencia que presenta. Este equipo tendrá un peso bastante importante en el consumo total de la planta.



Figura 3. 54. Lowara MPAE65A. Fuente: Lowara

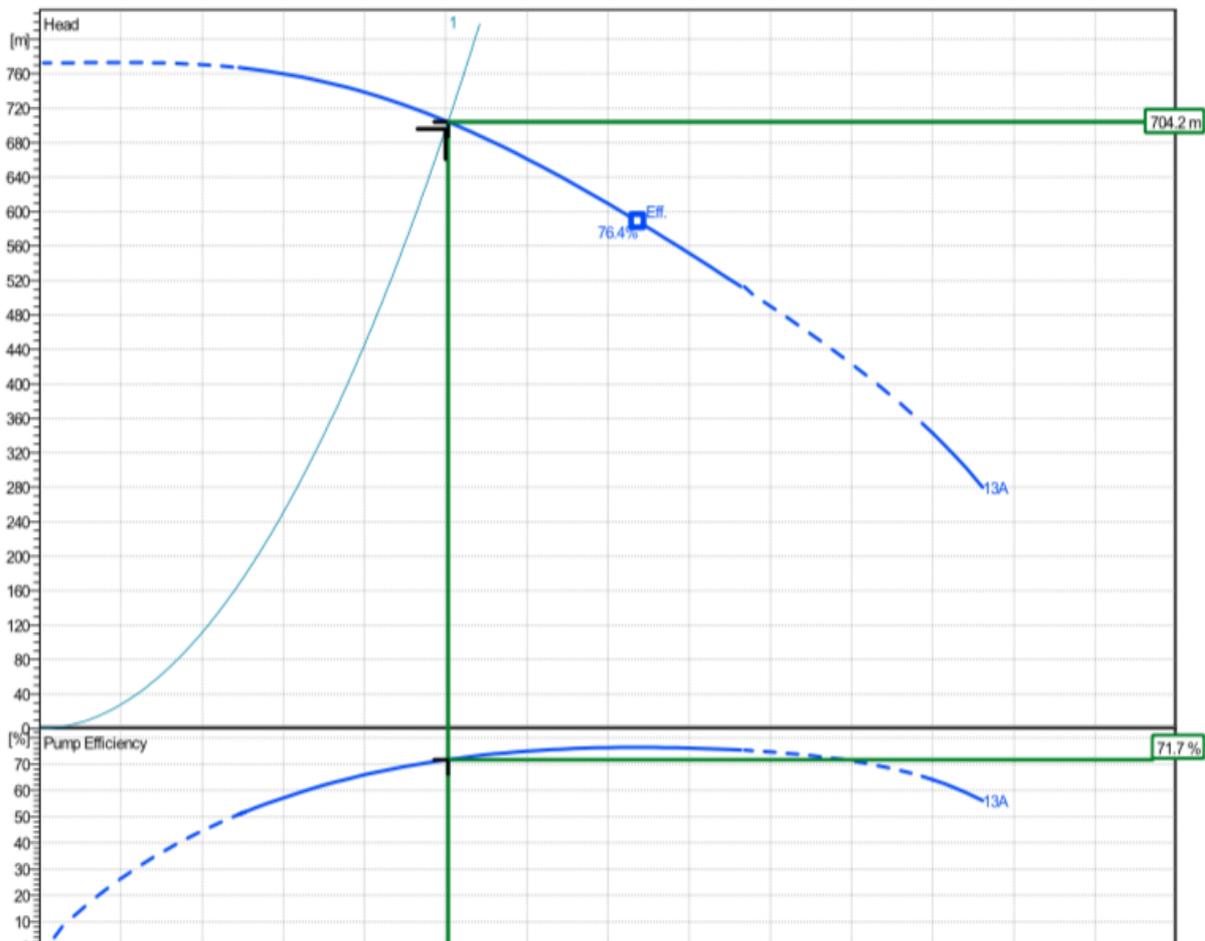


Figura 3. 55. Curvas características Lowara MPAE65A. Fuente: Lowara

8.2.5. *Balace de energía Tramo 2*

Se realiza un balance de energía desde la estación de bombeo hasta la presa para estudiar el tramo 2. Simplificando,

- *Punto 1. Estación de bombeo.*

V_I será la velocidad de llegada, **0,79 m/s**.

Z_I será la cota la estación de bombeo, **669 metros**.

P_I corresponde a la presión del agua a su llegada a la estación, **1,5 bar**.

- *Punto 2. Presa de Canabria*

V_2 para el diámetro considerado es **0,79 m/s**.

Z_2 será el nivel del agua de la presa. Como es variante se considera la salida de la tubería. En este caso, comprobando el perfil de elevación, será de **1268 metros**.

P_2 corresponde a la presión de salida del fluido. Se considera **1,5 bar** para producir un movimiento del agua y evitar la proliferación de algas en la presa.

Las pérdidas de carga totales, para una longitud de 6200 metros se establecen en de **23,15 metros**.

Del mismo modo, la altura de la bomba será:

$$H_B = \left(\frac{(0,79^2 - 0,79^2) \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) + (1268 - 669) + \left(\frac{(1,5 - 1,5) bar * 10^5 \frac{Pa}{bar}}{1027,44 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) + 23,15 m = 623 m$$

La altura que debe suministrar la bomba es de **623 metros** y no debe proporcionar más de **46 metros** de NPSH requerido.

8.2.6. Selección de bomba Tramo 2

Los parámetros para obtener el equipo de bombeo están definidos en la siguiente tabla.

	BOMBA TRAMO 2
Presión de entrada	1,5 bar
Presión de salida	1,5 bar
Caudal producto	50 m ³ /h
Altura	623 m
NPSHr	46 m

Tabla 3. 13. Datos para dimensionado de distribución superior Tramo 2. Fuente: Elaboración propia

Al igual que para el caso anterior, la bomba elegida, de la marca Lowara, es el **modelo MPAE65A/12A/BF1320/W25VDCC4**. En este caso proporciona una eficiencia del 72% para una altura de 647,5 metros.

La curva característica de este modelo es la siguiente:

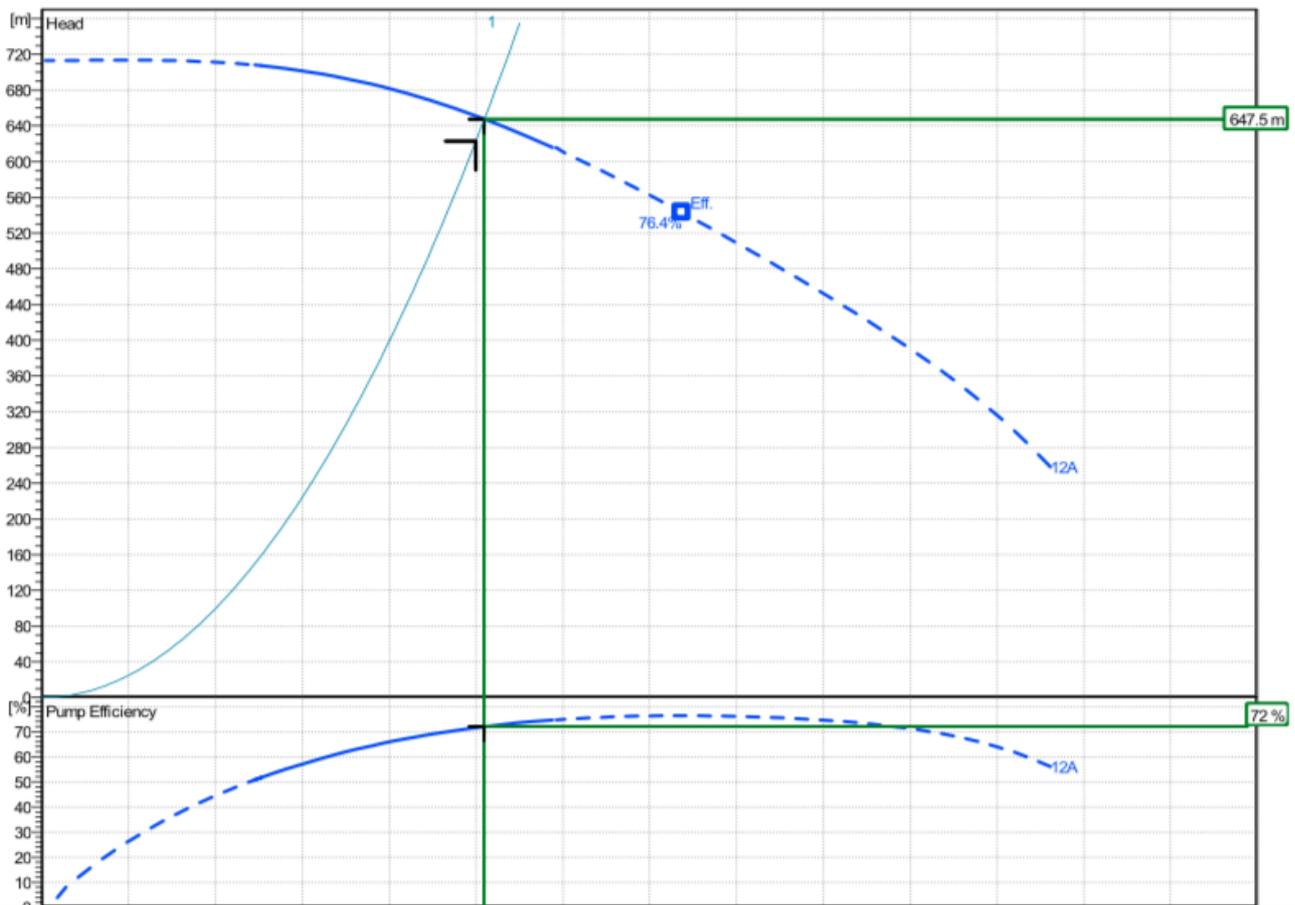


Figura 3. 56. Curvas características Lowara MPAE65A. Fuente: Lowara

Se han definido los sistemas de distribución. Se pasa a estudiar el sistema de rechazo.

9. Sistema de rechazo de salmuera

Por último, quedaría estudiar el sistema de rechazo de salmuera. Será el encargado de liberar al medio el material desechable del proceso. Dado que su contenido en sales es elevado, se deberá realizar una instalación que permita una correcta disolución en el medio submarino y afecte, en la menor medida posible, a la composición química del agua marina de la zona.

El sistema más utilizado para esta aplicación es la instalación de un emisario submarino con una longitud y una profundidad determinada. Para su instalación se tendrá que conocer la orografía del fondo marino y las profundidades existentes en la zona. Utilizando el Google Earth y añadiéndole las referencias de batimetría de la isla de La Gomera, disponibles en el *Ministerio Para La Transición Ecológica*, se podrán conocer estos parámetros.

Además, la región presenta buenas características marinas. Existe un constante movimiento del agua producido por las corrientes y las mareas. Este hecho permite acortar la longitud del emisario al no existir riesgos de estanqueidad hídrica y, del mismo modo, posibilitar una correcta disolución de la salmuera.

Considerando estos aspectos se traza y se analiza un emisario submarino con las siguientes dimensiones. La longitud final será de 558 metros, aunque el estudio considerará 580 metros como medida de seguridad. La profundidad final del emisario se situará en torno a unos 20 metros. Se representa en color rojo el recorrido que ofrece la instalación. Figura 3.57.

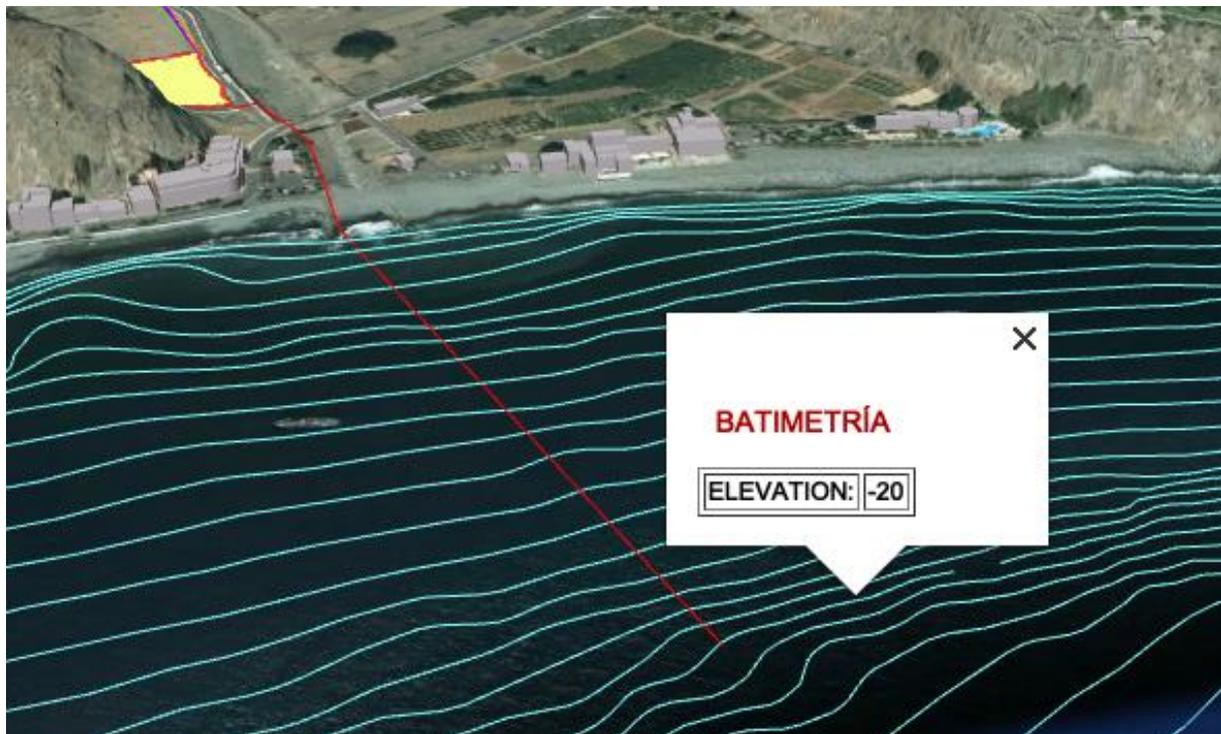


Figura 3. 57. Sistema de rechazo. Fuente: Google Earth

Situado el emisario submarino en el plano, se debe llevar a cabo un estudio estructural. Se analiza la tubería de igual forma que para los apartados anteriores y se define, posteriormente, el equipo de bombeo.

9.1. Tubería de rechazo.

Las tuberías de rechazo tendrán las mismas características que las anteriores. El material que ha utilizar es el PRFV. De igual forma, el diámetro de la tubería, según el criterio de Bonnet, para un caudal de 94,3 metros cúbicos por hora debe ser 194 milímetros. Este valor de caudal

se obtiene del software de membranas. Representa el 55% respecto al caudal de alimentación. (45% de conversión). El catálogo muestra que el diámetro inmediatamente superior al teórico es **200 milímetros**.

9.2. Balance de energía

Para obtener el valor de la altura de la bomba se realiza un balance de energía entre la desaladora y el punto final del emisario.

- *Punto 1. Nivel desaladora.*

V_1 para el diámetro considerado es **0,83 m/s**

Z_1 se establece en el nivel del sistema de ósmosis inversa. Se consideró como **6 metros**.

P_1 corresponde a la presión del agua a la salida del recuperador de energía. Será de **1,5 bar**.

- *Punto 2. Emisario de rechazo.*

V_2 será igual que para el punto 1.

Z_2 será la profundidad final del emisario. En este caso, como se puede comprobar en la barimetría, será de **20 metros**.

P_2 corresponde a la presión de columna de agua. Para 20 metros de profundidad se considera una presión de **2 bar**.

9.3. Pérdidas de carga

Introduciendo los valores necesarios en las casillas, considerando una viscosidad acorde con la cantidad de sales existentes en el fluido, se obtiene como resultado unas pérdidas de carga totales de **1,71 metros**.

$V =$	0,83	m/s
$v^2 / 2g =$	0,04	m
$R_e =$	165.830	adim.
$f =$	0,0163	adim.
FUNCION-OBJ.	0,000	- - - - -
$l_{equiv. acc. total} =$	9,67	m
$L_{equiv. Total} =$	589,67	m
$\Sigma h_f =$	1,71	m

Figura 3. 58. Pérdidas de carga sistema de rechazo.
Fuente: Excel

Sustituyendo todos los valores en el balance de energía, quedaría:

$$H_B = (-20 - 6)m + \left(\frac{(2 - 1,5)bar * 10^5 \frac{Pa}{bar}}{1051,8 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) + 1,71 m = -22,86 metros.$$

Se observa que la altura existente es negativa, **-22,86 metros**. Este valor se traduce de forma positiva. La diferencia de cota permite una correcta circulación del fluido por la tubería de rechazo evitando el uso equipo de bombeo en esta aplicación.

Con ello, quedaría definido el sistema de rechazo de salmuera.

Para concluir el *Anexo III, Dimensionado de almacenamiento, bombas, tuberías y tratamientos* y antes de estudiar el consumo específico de la planta, se cree oportuno realizar una tabla resumen. En ella se han definido todos los equipos de bombeo, diferenciando las marcas y los modelos seleccionados. Además, se han expresado los parámetros de rendimiento de cada uno de los equipos.

RESUMEN EQUIPOS DE BOMBEO			
Equipo	Marca	Modelo	Rendimiento
Captación	Wilo	K10 170	84,20%
Alta presión	KSB	Multitec RO a 65	69,10%
Booster	KSB	Etaline 80	78,70%
Postratamiento	Grundfos	NBE 50 125	78,70%
Distribución inferior	KSB	Movitec	78,50%
Bomba tanque	Lowara	Resiboost	44,65%
Bomba tramo 1	Lowara	MPA65E	71,70%
Bomba tramo 2	Lowara	MPAG5E	72,00%
Rechazo	-	-	-

Tabla 3. 14. Resumen equipos de bombeo. Fuente: Elaboración propia

Se pasa a calcular el consumo de la planta de desalación. Este valor representará la energía mínima que se debe aportar por parte de la fuente de suministro.

10. Consumo total y específico

En este apartado se obtendrá la energía mínima que debe suministrar la fuente energética. Una vez se han seleccionado todos los equipos de bombeo se deben reajustar los parámetros de diseño para definir el consumo final y el específico de la planta. Se recuerda que los consumos obtenidos en el anexo el *Anexo II, Dimensionado del núcleo de membranas y recuperador de energía para ósmosis inversa* se establecieron de forma manual y no reflejan los parámetros reales de los equipos.

Para realizar un estudio estructurado, se seguirá el criterio establecido en los apartados anteriores. Primero se determinará el consumo del sistema de captación, seguidamente se obtiene el consumo del núcleo de ósmosis y finalmente el relacionado con el sistema de distribución.

Además, se compararán los valores obtenidos mediante el software de membranas, el software del recuperador de energía y de forma manual (haciendo uso de los consumos facilitados en las fichas técnicas)

10.1. Consumo sistema de captación

Para determinar el consumo del sistema de captación se clasificará según la metodología de obtención:

Análisis manual. Para obtener el consumo de forma manual se consultará la ficha técnica de la bomba seleccionada. Realizando esta operación se obtiene que el motor debe ser provisto de 37 kW, aunque para el punto de funcionamiento absorbe 34,6 kW.

El consumo específico relacionar el valor total de consumo con la capacidad de producción de la planta. En este caso, siguiendo la ecuación 16:

$$\text{Consumo específico} = \frac{\text{Consumo bomba}}{\text{Producción por hora}} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right)$$

Ecuación 13. Consumo específico

Sustituyendo los valores de la bomba de captación en la ecuación, y considerando el consumo propio del motor, queda:

$$\text{Consumo específico captación} = \frac{34,6 \text{ kW}}{1850 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{\text{día}}{24 \text{ h}}} = 0,45 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

Análisis software recuperador de energía. Por otro lado, el documento Excel determina el consumo de la bomba según los parámetros de rendimiento que se introduzcan. Aunque determina el consumo específico final de la parte de producción, se puede determinar el consumo de la bomba de captación por separado. Introduciendo los valores de rendimiento se observa que la bomba requiere una potencia de 13,7 kW. El consumo específico será de 0,18 kWh por metro cúbico.

Dada la diferencia existente entre ambos, y considerando la ficha técnica como un documento real, se decide elegir para el cálculo de la producción eléctrica, 34,6 kW.

10.2. Consumo núcleo de membranas

Del mismo modo, se calcula el consumo del núcleo de membranas. En este apartado se considera la bomba de alta presión, la bomba Booster y la bomba de postratamiento.

Análisis manual. Consultando las fichas técnicas de los equipos y relacionando los valores de consumo con la producción diario se obtiene la siguiente tabla.

CONSUMO NÚCLEO DE MEMBRANAS			
Equipo	Consumo real (kW)	Consumo máximo (kW)	Consumo específico (kWh/m³)
Alta presión	183,41	250	2,38
Booster	6,07	7,5	0,097
Total núcleo	189,48	257,5	2,46

Tabla 3. 15. Consumo núcleo de membranas de forma manual. Fuente: Elaboración propia

Análisis software recuperador de energía. Estudiando el consumo mediante el documento Excel, la bomba de alta presión requiere una potencia de 187,8 kW mientras que el equipo Booster se establece en 7 kW. Los consumos específicos serán 2,43 kWh/m³ y 0,091 kWh/m³ respectivamente. El sumatorio de ambos produce un consumo específico en el núcleo

de membranas de 2,52 kWh/m³. Este valor se establece dentro de los rangos comunes para este tipo de instalaciones.

Análisis software IMSDesing. Introduciendo los parámetros de rendimiento en el software de membranas se calculan los consumos de bombeo de forma automática. En este caso, se muestra en la siguiente figura los valores obtenidos. La potencia requerida para el bombeo en el núcleo de ósmosis se establece en 206,6 kW. El consumo específico es de 2,68 kWh/m³.

Cálculo de potencia		Paso1	ERD Impulsar
Bomba / incremento de presión	bar	60,0	1,9
Caudal de producto	m ³ /d	1850,0	
Caudal bomba	m ³ /d	1871,8	2239,3
Rendimiento bomba	%	70,0	78,7
Rendimiento motor	%	95,8	90,1
Eficiencia variador frecuencia	%	97,0	97,0
Potencia/etapa/paso	kw	199,4	7,2
	BHP	267,3	9,6
Potencia total de bombeo	kw	206,6	
Potencia específica de bombeo	kwh/m³	2,68	

Figura 3. 59. Cálculo de potencia y consumo. Fuente: IMSDesing

Dada la similitud entre los valores obtenidos gracias a las fichas técnicas y al documento Excel, se descartar el resultado arrojado en el programa IMSDesing. En este caso, se utilizarán los consumos establecidos en las fichas técnicas de los equipos. El núcleo de membranas consumirá 189,48 kW de potencia y el consumo específico del bastidor de membranas será de 2,46 kWh/m³. Se sitúa dentro del rango de operación común.

10.3. Consumo distribución

De igual forma, se calcula el consumo asociado a la distribución. Será el que mayor peso tenga en este proyecto dada las características técnicas de los equipos de bombeo. En este caso, los softwares no contemplan la opción de introducir datos sobre la distribución. A consecuencia, únicamente se realizará el análisis consultando las fichas técnicas de los equipos.

Se relacionan los valores de consumo con la producción diaria. Se muestran en la siguiente tabla los valores obtenidos.

CONSUMO DISTRIBUCIÓN			
<i>Equipo</i>	<i>Consumo real (kW)</i>	<i>Consumo máximo (kW)</i>	<i>Consumo específico (kWh/m³)</i>
Postratamiento	5,27	5,50	0,07
Distribución inferior	3,12	4,00	0,04
Bomba tanque	0,70	0,75	0,01
Bomba tramo 1	134,30	161,70	1,74
Bomba tramo 2	124,60	149,20	1,62
Total distribución	267,99	321,15	3,48

Tabla 3. 16. Consumo distribución. Fuente: Elaboración propia

Se puede comprobar que los equipos de distribución superior son los elementos que más consumo producen en la planta. El total se establece en 267,99 kW con un consumo específico por metro cúbico de 3,48 kWh/m³. Aproximadamente un 17% más que para todo el proceso de captación y ósmosis inversa.

Para establecer la cantidad de energía que debe suministrar la fuente de energía se debe realizar un sumatorio de los diferentes consumos.

Se unifican las tablas desarrolladas y se diferencian los porcentajes de consumo para una mejor visualización de estos.

CONSUMO TOTAL Y ESPECÍFICO CON PORCENTAJES			
<i>Equipo</i>	<i>Consumo real (kW)</i>	<i>Consumo específico real (kWh/m³)</i>	<i>Porcentaje</i>
Captación	34,60	0,45	7,03%
Total captación	34,60	0,45	7,03%
Alta presión	183,41	2,38	37,27%
Booster	6,07	0,08	1,23%
Total núcleo	189,48	2,46	38,51%
Postratamiento	5,27	0,07	1,07%

Distribución inferior	3,12	0,04	0,63%
Bomba tanque	0,70	0,01	0,14%
Bomba tramo 1	134,30	1,74	27,29%
Bomba tramo 2	124,60	1,62	25,32%
Total distribución	267,99	3,48	54,46%
Total planta	492,068	6,38	100,00%

Tabla 3. 17. Consumo total y específico con porcentajes. Fuente: Elaboración propia.

11. Conclusiones

Si se realiza un análisis de la Tabla 3.17 se obtienen las siguientes conclusiones:

1. La fuente de energía renovable debe producir, como mínimo, **492,068 kW**. Este valor corresponde al consumo total de la planta de desalación.
2. Los equipos de bombeo que mayor consumo presentan son los de distribución superior, **3,48 kWh/m³**. En este caso, representan más de la mitad del consumo total de la planta de desalación. Un 54,46%.
3. El consumo específico de la planta se establece en **6,384 kWh/m³**. El valor referido a la producción de agua desalada es 2,46 kWh/m³ (se establece dentro de los rangos comunes para este tipo de plantas).
4. El valor de consumo anual de la planta, considerando 275 días de funcionamiento debido a la parada de 3 meses, se establece en **135,318 MW**. Su equivalente en MWh es de **3.247**.

Se han definido tanto equipos como consumos. Se pasa a dimensionar el sistema de producción de energía. Será el encargado de aportar energía eléctrica a la planta de desalación.

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA,
TITULACIONES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

ANEXO IV

**DIMENSIONADO DEL SISTEMA
EÓLICO. ABASTECIMIENTO DE
ENERGÍA ELÉCTRICA**

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

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

AUTOR: Alberto Meneses Moreno

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE ANEXO IV

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	ESTUDIO DEL RECURSO EÓLICO DE LA ZONA.....	1
3.	DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL.....	3
4.	SELECCIÓN DEL AEROGENERADOR.....	5
5.	ESTUDIO DE ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS.....	13
6.	CONCLUSIONES.....	16

ÍNDICE FIGURAS ANEXO IV

Figura 4. 1. Recurso eólico. Fuente: Grafcan	2
Figura 4. 2. Ubicación parque eólico. Fuente: Google Earth	3
Figura 4. 3. Distribución de Weibull	4
Figura 4. 4. Intefaz de programa. Fuente: ITC	6
Figura 4. 5. Dewind D6 62/1250. Fuente: WindTurbineModels	13
Figura 4. 6. Ejemplo central hidroeléctrica. Fuente: Noticias del Meridiano	14
Figura 4. 7. Estación de recarga de vehículos eléctricos. Fuente: Wikipedia	15

ÍNDICE TABLAS ANEXO IV

Tabla 4. 1. Aerogeneradores disponibles. Fuente: Elaboración propia	7
Tabla 4. 2. Potencia estimada por aerogenerador. Fuente: Elaboración propia	7
Tabla 4. 3. Estudio de potencia estimada 275 días. Fuente: Elaboración propia	8
Tabla 4. 4. Balance energético. Fuente: Elaboración propia	9
Tabla 4. 5. Datos generales Dewind D6 62/1250. Fuente: TheWindPower.net.....	12
Tabla 4. 6. Pesos Dewind D6 62/1250. Fuente: TheWindPower.net.....	12
Tabla 4. 7. Rotor Dewind D6 62/1250. Fuente: TheWindPower.net	12
Tabla 4. 8. Caja de cambios Dewind D6 62/1250. Fuente: TheWindPower.net.....	13

1. Introducción

En este Anexo se llevará a cabo el dimensionado del sistema de producción de energía. Se busca un recurso que sea cuidadoso con el medio ambiente. Analizando las diferentes tecnologías existentes en el campo de las renovables, se cree correcto la instalación de un parque eólico provisto de aerogeneradores. Las pautas a seguir para definir este estudio son las siguientes.

1. Primero, se realiza un estudio eólico de la comarca y se determinan las zonas donde las condiciones ambientales favorezcan un mayor rendimiento de los equipos. Se hará uso de los recursos informáticos existentes en la Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias (IDE).
2. A continuación, se ubicará el aerogenerador en el espacio. Se empleará la distribución de Weibull. Esta determina los valores promedios anuales, tanto de velocidad como de potencia en la zona.
3. Seguidamente, se dimensionará el número y modelo de aerogeneradores necesarios para abastecer la planta de desalación. Se consultarán diversos fabricantes y se seleccionará el modelo más idóneo para este proyecto. Se buscará conseguir una relación aceptable entre el valor de producción anual y el valor de consumo anual.
4. Por último, se realizará un estudio energético intentando aprovechar el excedente de energía producido por el aerogenerador en los meses de parada. Se describirán una serie de aplicaciones que ayuden a reducir el uso de combustibles fósiles en la central eléctrica.

Considerando los puntos desarrollados, se inicia el dimensionado del sistema eólico para producción de energía.

2. Estudio del recurso eólico de la zona

Se comienza analizando el recurso eólico existente en la zona. Se encuentran diferentes páginas web que muestran las condiciones eólicas de las Islas Canarias. Por ejemplo, Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias (IDE) a través de su herramienta gráfica Grafcan o el Instituto Tecnológico de Canarias, ITC, gracias a un navegador online. También,

el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) facilita un Atlas Eólico de España. Dada la familiarización con la herramienta gráfica Grafcan a lo largo del proyecto, se cree oportuno continuar utilizándola en este estudio.

Para obtener las condiciones eólicas en la zona se debe activar la capa “Recurso Eólico” existente en la carpeta “Energía”. El viento existente en la zona se muestra con diferentes tonalidades, en función de la intensidad. Se muestra la Figura 4.1. para justificar la ubicación del parque eólico.

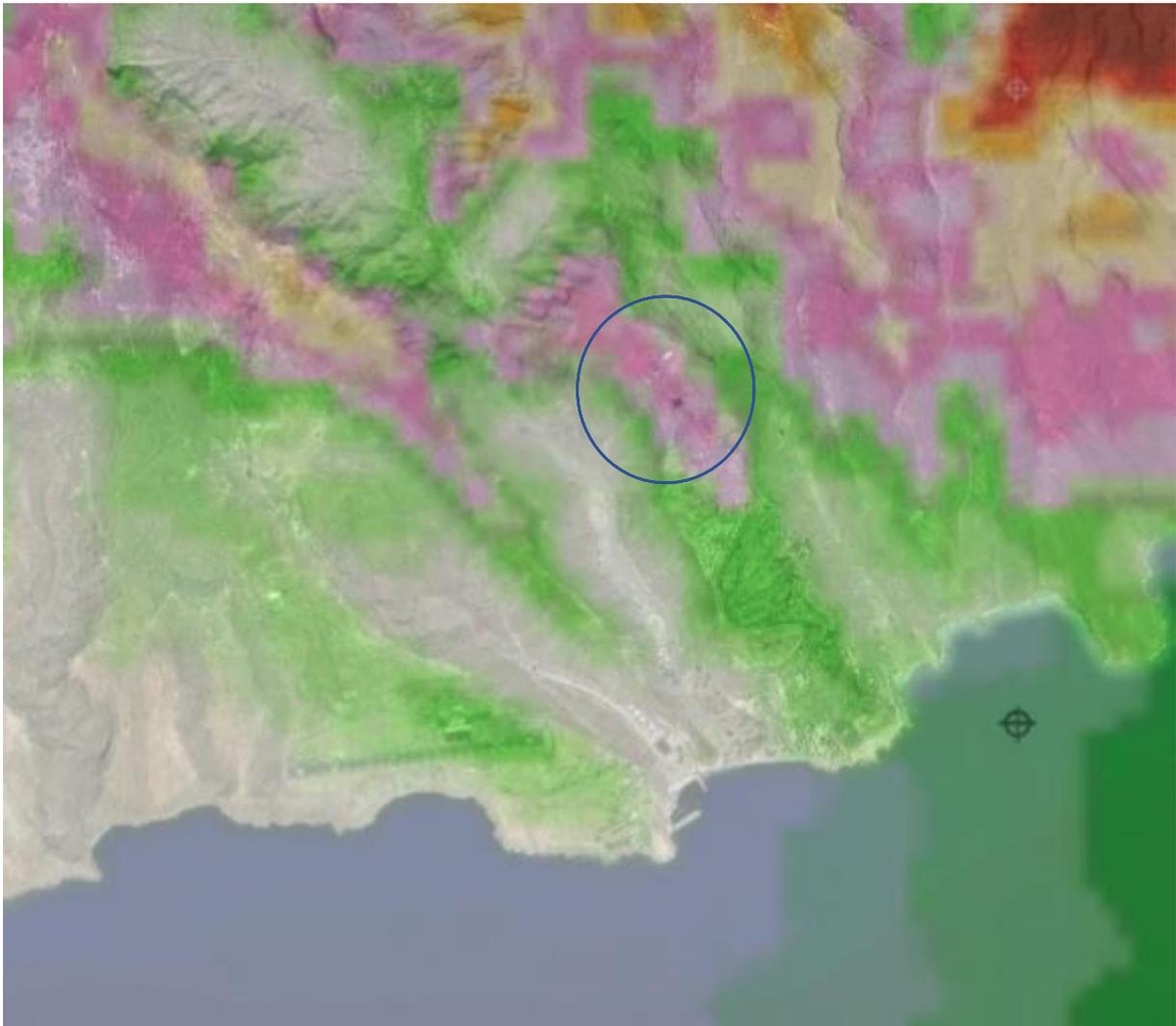


Figura 4. 1. Recurso eólico. Fuente: Grafcan

Observando la Figura 4.1. se puede comprobar que existe una variación en las condiciones eólicas. Si se estudia una zona próxima a la desaladora se obtienen velocidades de 5 m/s aproximadamente para una altura de 80 metros. Esta velocidad es algo moderada para el

uso que se le quiere dar. Sin embargo, aumentando la cota para salvar el cauce del barranco se encuentra una franja de color morado (circunferencia de la figura 4.1.). En este caso, las velocidades medias del viento aumentan hasta los 8 m/s, más aceptables para este tipo de tecnología. Se escogerá esta ubicación al ser la idónea para nuestro proyecto. Se representa en la Figura 4.2. una imagen ampliada de la ubicación elegida.



Figura 4. 2. Ubicación parque eólico. Fuente: Google Earth

La circunferencia de la imagen hace referencia a la ubicación real de los aerogeneradores. Se tendrá un espacio de fácil acceso para el transporte, la instalación y el mantenimiento de estos. Además, no se asumiría un coste excesivo para la instalación de la red de distribución eléctrica. Existe una relativamente cerca que abastece a los hogares colindantes.

3. Distribución de Weibull

Situada la zona con mejores condiciones eólicas para este proyecto se obtienen los datos de recursos eólicos. La capacidad de producción de energía de un aerogenerador depende de la

curva característica del mismo y de la distribución de la velocidad del viento. Esta última se obtiene gracias a la distribución de Weibull.

Haciendo uso de la información facilitada por el tutor, la expresión matemática que determina la distribución de Weibull es la siguiente,

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

Ecuación 14. Ecuación de Weibull

Donde,

- **k**: factor de forma
- **c**: factor de escala (m/s)
- **v**: velocidad del viento (m/s)
- **f(v)dv**: probabilidad de velocidad de viento en el intervalo v, v+dv

Los valores que hacen falta para obtener la distribución de Weibull se obtienen de la herramienta gráfica Grafcan. Clicando sobre la ubicación de los aerogeneradores aparece una ventana con las condiciones eólicas.

En este caso, para una altura de 80 metros, el factor de forma (k) tiene un valor de 1,81. El factor de escala (c) tiene un valor de 8,76. Por último, dado que se desea obtener una gráfica que represente la distribución en un intervalo determinado, se estudia la velocidad del viento en un rango de 0 a 25 m/s con un intervalo de crecimiento de 0,5 m/s. Haciendo uso de un documento Excel y utilizando la función DISTR.WEIBULL se obtiene la siguiente gráfica.

DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

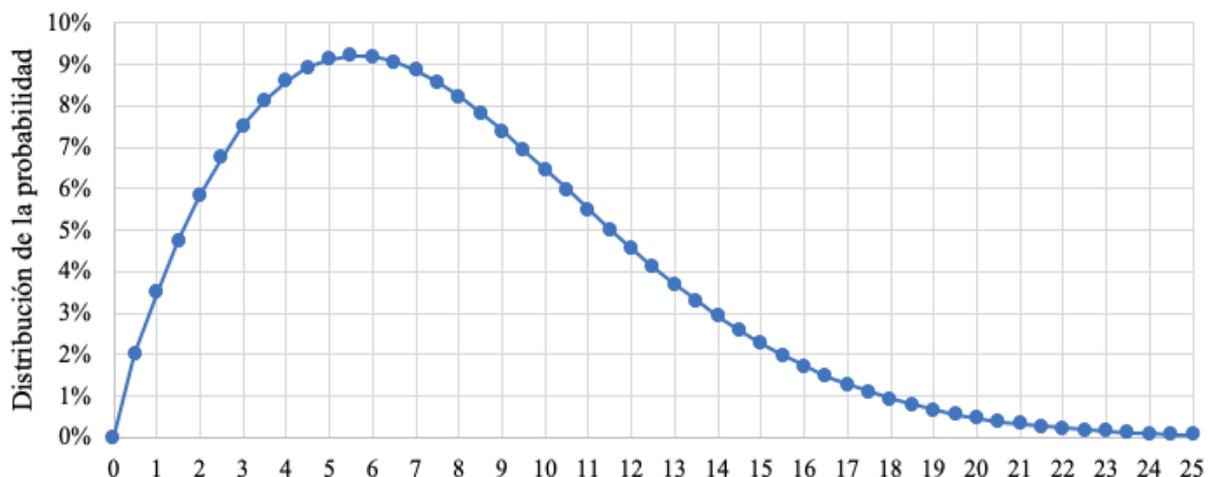


Figura 4. 3. Distribución de Weibull

Si se analiza detenidamente la gráfica se observa que el intervalo con mayor probabilidad de viento se encuentra entre 3,5 y 8 m/s. Del mismo modo, la velocidad más probable se establece en 5,5 m/s con una predisposición en la dirección NNE.

Determinada la distribución de probabilidad respecto a la velocidad se pasa a seleccionar el aerogenerador.

4. Selección del aerogenerador

Como se dijo anteriormente, otro de los factores que definen la capacidad de producción de energía de un aerogenerador es la curva característica del mismo. Esta curva es particular para cada equipo.

Por tanto, se debe elegir un modelo y obtener su curva característica. Seguidamente, despejar la capacidad de producción de potencia en la siguiente ecuación.

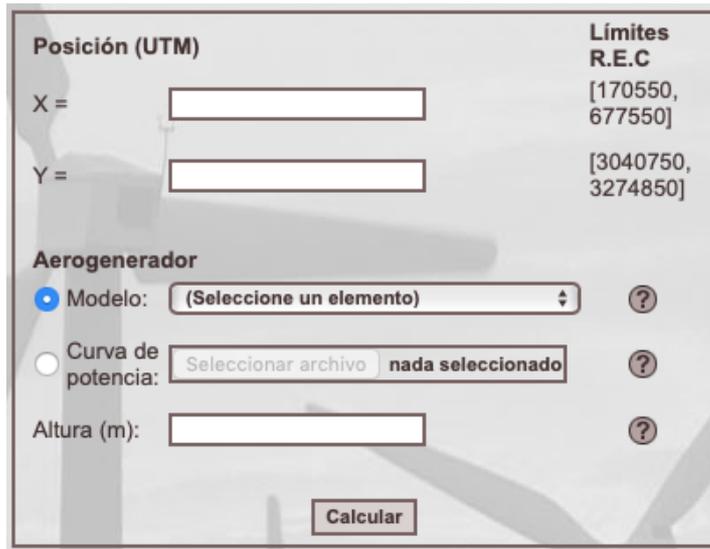
$$P(g) = \int_{va}^{vp} f(v) * P_{AG}(v) dv$$

Ecuación 15. Potencia eólica estimada

Esta expresión define la potencia estimada relacionando la curva característica de potencia del aerogenerador con la curva de distribución de Weibull. Los parámetros que se deben considerar son los siguientes:

- **PG:** Potencia promedio generada (W)
- **f(v):** Distribución de probabilidad de velocidades de viento
- **PAG(v):** Curva de potencia (W)
- **va:** velocidad de arranque (m/s). Será la velocidad de movimiento de las aspas del aerogenerador.
- **vp:** velocidad de parada (m/s). Por seguridad, se establece una velocidad que desconecta el rotor evitando daños en el sistema. Se presenta en condiciones de velocidades de viento muy elevadas.

Sin embargo, para acortar el tiempo de análisis se utilizará un recurso informático que estima el valor de la producción de energía de forma automática. Se puede encontrar en la página web del ITC, en el apartado Recurso Eólico de Canarias. Se refleja la interfaz del programa en la siguiente figura.



Posición (UTM)		Límites R.E.C
X =	<input type="text"/>	[170550, 677550]
Y =	<input type="text"/>	[3040750, 3274850]
Aerogenerador		
<input checked="" type="radio"/> Modelo:	<input type="text" value="(Seleccione un elemento)"/>	?
<input type="radio"/> Curva de potencia:	<input type="text" value="Seleccionar archivo"/> nada seleccionado	?
Altura (m):	<input type="text"/>	?
<input type="button" value="Calcular"/>		

Figura 4. 4. Intefaz de programa. Fuente: ITC

El programa calcula de forma automática la producción de energía estimada y abre una ventana informativa con los valores obtenidos.

Para obtener el valor estimado de energía producida por un aerogenerador se deben seguir los siguientes pasos.

4. Introducir las coordenadas UTM de la ubicación del aerogenerador.
5. Seleccionar el aerogenerador según modelo.
6. Determinar la altura de estudio.

Se desarrolla el proceso para este proyecto. En este caso, con la ayuda del visor Grafcan, se han definido las coordenadas UTM del aerogenerador. **La posición X es 283650** mientras que **la posición Y es 3105050**.

Elegida la ubicación, se selecciona el aerogenerador. Existen diversas opciones dentro de la plataforma. En este aspecto aparece un pequeño problema. La página web del ITC no está actualizada y se visualizan varios fabricantes y modelos que actualmente no se encuentran disponibles. A consecuencia, se deben descartar los inoperativos y seleccionar únicamente aquellos que se mantienen vigentes. Haciendo uso de la página web TheWinterPower es posible verificar las empresas y modelos que mantienen la disponibilidad en la actualidad.

Para acortar el proceso descriptivo, se realiza un filtrado entre los modelos que se encuentran disponibles actualmente. También se escogerán aquellos que podrían ser aceptables en este proyecto dada la potencia máxima de producción. Se estudiarán los aerogeneradores

con una potencia máxima de 1500 kW. Se detalla en la siguiente tabla los modelos que cumplen con estos dos requisitos.

AEROGENERADORES DISPONIBLES		
Fabricante	Modelo	Potencia
DEWIND	D4 46	600 kW
DEWIND	D6 60	1250 kW
DEWIND	D6 62	1250 kW
ENECORN	E 44	900 kW
ENECORN	E 48	800 kW

Tabla 4. 1. Aerogeneradores disponibles. Fuente: Elaboración propia

Los modelos seleccionados se estudiarán y compararán bajo las mismas condiciones de estudio. Finalmente se elige el modelo que más se ajuste a los requisitos. Por tanto, se debe obtener la potencia estimada de cada uno de ellos con la ayuda del software del ITC.

Continuando con el recurso informático, después de seleccionar el modelo se debe establecer la altura de estudio. Dado que la zona de estudio es abierta y espaciosa, se determina una altura de 80 metros, encontrando de esta manera rachas de viento más estables y de mayor intensidad, idóneas para la finalidad del aerogenerador.

La siguiente tabla muestra los valores obtenidos de potencia estimada para cada aerogenerador.

POTENCIA ESTIMADA				
Fabricante	Modelo	Potencia estimada	Potencia media anual	Horas anuales equivalentes
DEWIND	D4 46	2.030 MWh	231,77 kW	3383,8
DEWIND	D6 60	3.752 MWh	428,332 kW	3001,8
DEWIND	D6 62	3.897 MWh	444,885 kW	3117,8
ENECORN	E 44	2.690 MWh	307,139 kW	2989,5
ENECORN	E 48	2.850 MWh	325,358 kW	3562,7

Tabla 4. 2. Potencia estimada por aerogenerador. Fuente: Elaboración propia

Se recuerda que, para 275 días, la planta de desalación tiene un consumo de 3.247 MWh. Dato obtenido en el *Anexo III, Dimensionado de almacenamiento, bombas, tuberías y tratamientos*. En primera instancia, únicamente dos modelos superan el consumo anual de la planta.

Sin embargo, estos valores de potencia estimada son representativos de todo un año. Puede aparecer un déficit energético cuando la planta este en producción. Se calcula la potencia estimada, multiplicando el valor de potencia media anual por la duración del estudio, es decir, 275 días. El resultado se compara nuevamente con el valor de consumo real.

<i>ESTUDIO DE POTENCIA ESTIMADA 275 DÍAS</i>				
<i>Fabricante</i>	<i>Modelo</i>	<i>Energía estimada</i>	<i>Exceso o déficit</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>DEWIND</i>	<i>D4 46</i>	<i>1.529 MWh</i>	<i>-1717966,8</i>	<i>-112%</i>
<i>DEWIND</i>	<i>D6 60</i>	<i>2.826 MWh</i>	<i>-420657,6</i>	<i>-15%</i>
<i>DEWIND</i>	<i>D6 62</i>	<i>2.936 MWh</i>	<i>-311407,8</i>	<i>-11%</i>
<i>ENECORN</i>	<i>E 44</i>	<i>2.027 MWh</i>	<i>-1220531,4</i>	<i>-60%</i>
<i>ENECORN</i>	<i>E 48</i>	<i>2.147 MWh</i>	<i>-1100286</i>	<i>-51%</i>

Tabla 4. 3. Estudio de potencia estimada 275 días. Fuente: Elaboración propia

Tras realizar esta operación, ningún aerogenerador cumple con la demanda establecida. Para resolver este inconveniente surgen dos vertientes.

1. *Aumentar la capacidad de potencia estimada.* Si se desea obtener un valor superior de potencia se puede aumentar el número de aerogeneradores. Reajustando los cálculos y considerando dos aerogeneradores, se obtiene que todos los equipos cumplen para un año natural. De forma idéntica, para el periodo de producción se comprueba que todos superan los requisitos excepto el modelo Dewind D4 46 con un 6% de déficit. Las principales desventajas que presenta esta aplicación son el gran excedente de energía obtenido y el aumento del coste económico de inversión.
2. *Aporte de red.* Por otro lado, se podría asumir el déficit energético aportando electricidad de la red local. Se establecería un gasto económico relacionado con el consumo eléctrico local. Sin embargo, dado que en los meses de parada el aerogenerador seguirá produciendo energía, esta se aportaría a la red y se

equilibraría el gastado energético de los meses de funcionamiento, manteniendo un balance positivo de gasto y aporte. Se debe, por tanto, calcular el consumo eléctrico de la red local en la época de producción (déficit) y el aporte eléctrico por parte del aerogenerador en los meses de parada. Se muestran, en la Tabla 4.4, los resultados del balance entre la producción anual y el consumo de la planta. Además, se representa el porcentaje respecto a la producción de energía estimada del aerogenerador.

<i>BALANCE ENERGÉTICO</i>			
<i>Fabricante</i>	<i>Modelo</i>	<i>Exceso o déficit</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>DEWIND</i>	<i>D4 46</i>	<i>-1.217.346,6 kWh</i>	<i>-60%</i>
<i>DEWIND</i>	<i>D6 60</i>	<i>504.543,4 kWh</i>	<i>13%</i>
<i>DEWIND</i>	<i>D6 62</i>	<i>649.545,6 kWh</i>	<i>17%</i>
<i>ENECORN</i>	<i>E 44</i>	<i>-557.113,4 kWh</i>	<i>-21%</i>
<i>ENECORN</i>	<i>E 48</i>	<i>-397.508,6 kWh</i>	<i>-14%</i>

Tabla 4. 4. Balance energético. Fuente: Elaboración propia

Analizando los resultados se comprueba que únicamente dos modelos cumplen con los requisitos establecidos. Sin embargo, el balance energético para estos equipos se ajusta bastante a este proyecto. No se producen valores elevados de exceso energético (para el caso de dos aerogeneradores estos mismos valores se establecen entre un 20% y un 58%).

Entre las dos opciones expuestas anteriormente, y, después de analizar los resultados obtenidos, se decide encaminar el proyecto por la segunda opción. Se suministrará energía a la planta de desalación, tanto de la fuente renovable como de la red eléctrica local. El consumo producido en la planta por la incapacidad de suministro del aerogenerador será equilibrado en los meses de parada de la planta.

El exceso de energía obtenido será vendido a la red de distribución local. Se estudian las leyes que regulan estos aspectos energéticos. Según *Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos*, se concluyen las siguientes medidas.

El Artículo 6, *Derechos de los productores de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos* desarrolla los aspectos de prioridad de despacho, junto con la prioridad de conexión y acceso.

“De acuerdo con lo dispuesto en el artículo 26.2 de la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, la energía eléctrica procedente de instalaciones que utilicen fuentes de energía renovable y, tras ellas, la de las instalaciones de cogeneración de alta eficiencia, atendiendo a la definición prevista en el artículo 2 del Real Decreto 616/2007, de 11 de mayo, sobre fomento de la cogeneración, tendrá prioridad de despacho a igualdad de condiciones económicas en el mercado, sin perjuicio de los requisitos relativos al mantenimiento de la fiabilidad y la seguridad del sistema, en los términos que reglamentariamente se determinen por el Gobierno.” (España. Real Decreto-Ley 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos. Boletín Oficial del Estado, 10 de junio de 2014, núm. 140, pp. 43883 a 43884)

Por tanto, se pueden concluir dos aspectos importantes. En primera instancia, el excedente energético tendrá prioridad frente a la producción eléctrica mediante combustibles fósiles. Se ayudará a reducir el consumo de fuel en la central eléctrica y en relación las emisiones de CO₂ emitidas en este proceso.

Por otro lado, se tendrá igualdad de condiciones económicas en el mercado. Se venderá el kWh al precio de consumo. Se debe conocer este valor para llevar a cabo un estudio de rentabilidad económica a largo plazo.

El único inconveniente que presenta esta aplicación es la capacidad de la red de distribución. Aunque no es competencia de este proyecto, se debe asegurar que la red de distribución sea capaz de albergar el excedente de energía. Si no fuese así, esta última se tendría que desechar al no ser capaz de almacenarla. En este aspecto, se tendría que estudiar la variabilidad en la producción eléctrica entre el aerogenerador y la central térmica de la isla. No obstante, se supondrá en el proyecto que existe una coordinación estable entre ambas fuentes de energía.

Siguiendo los aspectos establecidos, se elige el aerogenerador que mejores prestaciones presenten para esta aplicación.

Como el sistema eólico relaciona la producción de energía al viento existente, y este último es imprevisible y aleatorio a lo largo del año, se escoge el equipo que más potencia estimada produzca, teniendo un cierto margen de seguridad y aumentando el beneficio económico con la venta del excedente energético. Además, otra razón para elegir un aerogenerador de mayor potencia es el consumo causado por la luminaria, equipos de trabajo u oficinas de la planta de desalación. No se han considerado en el estudio.

El aerogenerador elegido es el modelo *Dewind D6 62* con una energía anual estimada de **3.897 MWh**. En este caso, la planta sufre un déficit del 11% cuando se encuentre en producción, consumiendo de la red local la energía necesaria para suplir esa carencia. No obstante, los meses de parada suministrará un exceso del 17% respecto a la potencia anual estimada. Este porcentaje representa en valor numérico **649,54 MWh**.

Además, analizando la ficha técnica de este equipo se comprueba que la altura de la góndola (espacio que alberga el rotor y el generador) se establece en 66 metros. Este valor es inferior a las condiciones de estudio. Para evitar posibles carencias energéticas se decide realizar un reajuste considerando la altura mencionada.

Estableciendo en 66 metros la altura del aerogenerador, el modelo Dewind D6 62 genera una energía estimada de 3.881 MWh, una potencia anual de 443,1 kW y mantiene su producción durante 3105 horas anuales. El balance de energía, entre la producción estimada anual y el consumo de la planta de desalación brinda un exceso del 16%, representando 633.63 MWh.

Para finalizar, se comprueba la adaptación que tendrá el aerogenerador en el entorno de trabajo. Con la ayuda del factor de planta o factor de carga se relaciona la energía generada por el aerogenerador durante un tiempo determinado y la energía generada si hubiese trabajado a plena carga ese mismo tiempo. Sustituyendo valores en la Ecuación 14, se obtiene

$$\text{Factor de carga} = \frac{\text{Energía generada}}{\text{Energía máxima instalada}}$$

Ecuación 16. Factor de carga.

$$\text{Factor de carga} = \frac{3.881.275,7 \text{ kWh}}{1250 \text{ kW} * 365 \text{ días} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}}} = 0,3545$$

Consultando los factores de carga comunes para un sistema eólico, fijados en un rango entre un 20% y un 40%, se comprueba que el aerogenerador seleccionado es aceptable para el estudio. El factor de carga se establece en un 36%.

Se muestran una serie de tablas con los valores de funcionamiento y las especificaciones técnicas del modelo elegido. Información obtenida en la página web *TheWindPower*.

DATOS GENERALES			
Fabricante	<i>Dewind</i>	Área de barrido	3049 m ²
Turbina eólica	<i>D6 62/1250</i>	Densidad de potencia	2,44 m ² /kW
Potencia	1250 kW	Numero de palas	3
Diámetro	62,3 metros	Limitación de potencia	<i>Pitch</i>
Clase de viento	<i>IEC II</i>	Puesta en servicio (año)	2000
Compatible offshore	<i>No</i>	En venta	<i>Si</i>

Tabla 4. 5. Datos generales Dewind D6 62/1250. Fuente: *TheWindPower.net*

PESOS			
Peso de la góndola	44 toneladas	Peso del rotor	33 toneladas
Peso de la torre	72 toneladas	Peso total	149 toneladas

Tabla 4. 6. Pesos Dewind D6 62/1250. Fuente: *TheWindPower.net*

ROTOR			
Fabricante	<i>LM Glasfiber</i>	Velocidad nominal del viento	12,5 m/s
Velocidad máx./ mín. del viento	25/2,5 m/s	Velocidad máxima del rotor	26,1 vuelta por minuto

Tabla 4. 7. Rotor Dewind D6 62/1250. Fuente: *TheWindPower.net*

CAJA DE CAMBIOS			
Fabricante	<i>Moventas</i>	Ratio	54
Caja de cambios	<i>Sí</i>	Niveles	3

Tabla 4. 8. Caja de cambios Dewind D6 62/1250. Fuente: TheWindPower.net

GENERADOR			
Fabricante	<i>Loher</i>	Velocidad máxima	1000 vueltas/min
Tipo	<i>ASYNCR DF</i>	Tensión de salida	690 V

Tabla 4. 9. Generador Dewind D6 62/1250. Fuente: TheWindPower.net



Figura 4. 5. Dewind D6 62/1250. Fuente: WindTurbineModels

5. Estudio de alternativas energéticas

Como se desarrolló en el apartado anterior, la energía en exceso será aportada a la red local obteniendo un beneficio económico por parte de la empresa distribuidora. En el *anexo V, Análisis de coste económico e impacto medioambiental*, se detalla la rentabilidad de forma más precisa.

No obstante, se ha querido enumerar una serie de alternativas que podrían implantarse para aprovechar el exceso energético generado por el aerogenerador evitando la disipación en caso de sobretensión en la red. Se estudian las medidas que más se adapten al desarrollo del municipio.

1. **Bombeo de agua en altura.** Siguiendo como ejemplo el proyecto realizado en Gorona del Viento, en la isla de El Hierro, se podría implantar un sistema de producción de energía hídrica. Este proceso consiste en bombear agua a una cota elevada y dejarla caer para captar la energía existente en el fluido con ayuda de una turbina. Esta produce el movimiento de un generador eléctrico que transforma a electricidad dicha energía hidráulica. Las condiciones orográficas del terreno hacen idóneas esta aplicación. Relacionándola con este proyecto, se podría aumentar la capacidad de la planta de desalación y bombear el excedente de agua hasta el depósito superior. Como se comprobó en el *anexo IV, Dimensionado de almacenamiento, bombas, tuberías y tratamientos*, la capacidad de este supera el valor mínimo requerido para el almacenamiento de agua. Por tanto, esta opción sería viable si se quiere implantar una nueva fuente de energía renovable en la isla.



Figura 4. 6. Ejemplo central hidroeléctrica. Fuente: Noticias del Meridiano

No obstante, se encontrarían una serie de inconvenientes. Se debe instalar una nueva red de tuberías que permita el transvase de agua desde la cota superior a la inferior. En este caso, el agua que pasa por la turbina no podría ser utilizada para regadío debido a la contaminación con los aceites u otros agentes químicos existentes en la turbina. Se tendría que instalar un sistema de tratamiento que evite el desperdicio del agua o un almacenamiento de agua inferior.

Por otro lado, se deberá construir una nueva planta energética que albergue la turbina y los sistemas de producción. El coste de inversión tal vez no sea rentable dada la pequeña potencia que tendría la turbina. Sin embargo, se ha querido mencionar esta alternativa sostenible con el medio ambiente.

2. **Estación de carga para vehículos eléctricos.** Otra medida que se podría adoptar sería la implantación de una serie de puntos de recarga para los vehículos eléctricos. El auge de este sistema de transporte puede ser una alternativa para el excedente de energía. Esta implantación se enfocaría más bien a largo plazo cuando el mercado del coche eléctrico tenga un peso mayor en la sociedad. No obstante, se ha realizado un pequeño estudio sobre esta posibilidad. Se ha determinado que con el excedente generado por el aerogenerador se podría instalar una estación de recarga con capacidad para 20 coches eléctricos. Esta permitiría la recarga diaria de los mismos de forma satisfactoria. Se ha tenido como referencia de estudio un coche base de Tesla, el modelo Model 3 con una capacidad de batería de 80,5 kWh, muy superior a sus competidores.



*Figura 4. 7. Estación de recarga de vehículos eléctricos.
Fuente: Wikipedia*

3. **Almacenamiento de energía.** Por último, otra alternativa sería la implantación de un sistema de almacenamiento de energía. Aunque aún se están desarrollando se podría tener en cuenta para un futuro. Estos dispositivos almacenan el excedente energético en un banco de baterías. Con esta medida se consiguen reducir los picos en la demanda energética. El banco suministraría la energía cuando sea preciso. Inclusive en cortes de red imprevistos. Se implantarían en la propia planta de desalación. Sin embargo, se debe esperar a un mayor desarrollo de estos. El precio de estos es todavía muy elevado.

6. Conclusiones

Analizando los valores obtenidos a lo largo del estudio:

1. Se ha decidido instalar una fuente de energía renovable. En este caso se creará un pequeño parque eólico.
2. El aerogenerador, modelo D6 62, de la compañía Dewind, es capaz de generar una energía anual estimada de 3.881 MWh.
3. Respecto al consumo total de la planta de desalación, el excedente energético representa un 16%.
4. Según la normativa vigente, el excedente energético será vendido a la empresa relacionada con la distribución eléctrica de la isla. Este hecho producirá un pequeño beneficio económico.

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA,
TITULACIONES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

ANEXO V

**ANÁLISIS DE COSTE ECONÓMICO
E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL**

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

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

AUTOR: Alberto Meneses Moreno

TUTOR: Vicente José Romero Ternero

ÍNDICE ANEXO V

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANÁLISIS DE VIABILIDAD TÉCNICA.....	1
3. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA.....	2
3.1. COSTES DEL AEROGENERADOR.....	2
3.1.1. <i>Costes de inversión</i>	2
3.1.2. <i>Costes variables</i>	3
3.2. COSTES PLANTA DE DESALACIÓN.	3
3.2.1. <i>Costes de inversión</i>	3
3.2.2. <i>Costes variables</i>	5
4. ANALISIS DE RENTABILIDAD	6
4.1. RENTABILIDAD DEL AEROGENERADOR	7
4.2. RENTABILIDAD DE LA PLANTA DE DESALACIÓN	9
5. ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	11
5.1. ENERGÍA EÓLICA	11
5.2. PLANTA DE DESALACIÓN	13
6. CONCLUSIONES.....	14

ÍNDICE TABLAS ANEXO V

Tabla 5. 1. Coste equipos de bombeo. Fuente: Elaboración propia.	4
Tabla 5. 2. Coste bastidor de membranas y recuperador de energía. Fuente: Elaboración propia.....	4
Tabla 5. 3. Costes de producción. Fuente: Elaboración propia	5
Tabla 5. 4. Parámetros aerogenerador. Fuente: Elaboración propia.....	8
Tabla 5. 5. Rentabilidad aerogenerador. Fuente: Elaboración propia	8
Tabla 5. 6. Parámetros planta de desalación. Fuente: Elaboración propia	9
Tabla 5. 7. Rentabilidad desaladora. Fuente: Elaboración propia.....	10
Tabla 5. 8. Indicadores específicos gases emitidos. Fuente: Endesa.....	13

1. Introducción

En este Anexo se abordarán los aspectos económicos y medioambientales del proyecto, diferenciando la planta de desalación del sistema de producción de energía. Se desarrollará el cálculo y el análisis seguido hasta obtener la viabilidad técnica y económica del estudio, además, del impacto medioambiental que este presenta.

Se cimentará en una serie de pautas descritas por el autor Miguel Villarubia López, en su libro, *Ingeniería de la Energía Eólica*.

Primero, en el estudio económico, se comparará la viabilidad económica del suministro eléctrico. Se estudia la implantación de un sistema de energía eólica frente a un abastecimiento a través de la red local. Se tendrá en cuenta el coste de cada una de las fuentes energéticas.

Del mismo modo, el estudio medioambiental analizará los impactos más significativos que produce la instalación de un sistema de energía eólica.

2. Análisis de viabilidad técnica

Dado que el desarrollo técnico de un proyecto de esta envergadura precisa de una serie de campos de estudio que no están relacionados con el fin de este trabajo, se analizará la viabilidad técnica siguiendo la bibliografía consultada.

El periodo de estudio de un parque eólico ronda un orden de 3 a 5 años. Siguiendo la descripción realizada por el autor Miguel Villarubia López, en su libro, *Ingeniería de la Energía Eólica*, (Villarubia López M., “Aspectos económicos y medioambientales” en *Ingeniería de la Energía Eólica*, Barcelona, Marcombo S.A., Primera Edición, 2012, 250) se encuentra que la construcción, puesta en marcha y explotación de un sistema eólico comprende las siguientes fases:

- Estudios previos de prospección eólica energética y de previabilidad técnica y económica. Fase de mayor peso en el periodo de estudio del proyecto. No suele ser inferior a un año.
- Ingeniería de concepción o anteproyecto y estudios de viabilidad técnica y económica.
- Ingeniería de detalle o proyecto propiamente dicho.

- Ejecución del proyecto: construcción y puesta en marcha. Fase relativamente menor, no suele superar los doce meses.
- Explotación que incluye operación y mantenimiento. Se estipula una vida útil de 20 años.

Los aspectos mencionados se pueden extrapolar para el desarrollo de la planta de desalación dada la similitud de estos.

3. Análisis de la viabilidad económica

Para llevar a cabo el estudio de viabilidad económica se deben estudiar los costes del proyecto. Estos se dividen en:

- Costes de inversión. Se engloban los costes asociados a los equipos, a la obra civil y a las instalaciones pertinentes. Suelen expresarse en €/kW instalado.
- Costes de operación y mantenimiento. Son costes variables asociados a la explotación y al mantenimiento de las instalaciones y de los equipos. Se expresa en €/MWh año.
- Costes de desmantelación. Costes asociados al desmantelamiento de las instalaciones al final de la vida útil.

Siguiendo estos aspectos, se analizan los costes relacionados con el aerogenerador y con la planta de desalación.

3.1. Costes del aerogenerador

3.1.1. Costes de inversión

El coste de inversión fundamenta el capital que se debe desembolsar para asumir los gastos económicos del proyecto. Se deberá obtener el coste de oficina técnica, el precio del aerogenerador y los equipos auxiliares, y, el coste de la instalación.

No obstante, en los parques eólicos, este valor se estipula según el tamaño de los aerogeneradores. Se expresa el coste unitario entre la potencia instalada. Siguiendo este criterio, los aerogeneradores de mayor potencia tendrán un coste unitario menor y serán, económicamente, más viables.

Para modelos con potencia nominal superior a 1 MW, el coste unitario se sitúa entre 900 €/kW y 1.100 €/kW. El estudio del modelo Dewind D6 62/1250 contemplará un coste unitario de 1000 €/kW.

Si se multiplica el coste unitario por la potencia nominal del aerogenerador (1250 kW), *el coste de inversión* se establece en **1.125.000,00 €**.

Este precio está formado, principalmente, por la suma de los diferentes costos relacionados con el aerogenerador. Costes de estudios de viabilidad, costes de equipamiento eólico, costes de instalaciones eléctricas, costes de obra civil, costes jurídicos-económicos, costes de ingeniería.

3.1.2. Costes variables

Los costes variables están relacionados con el coste de operación y mantenimiento, el coste de alquiler de terrenos o seguros y el coste relacionado con la gestión administrativa del parque eólico.

A diferencia del caso anterior, este valor se estipula según la energía producida en un año. Existen dos formas de expresarlo, en €/MWh o en porcentaje respecto a la inversión. Los valores orientativos se suelen situar entre 10 y 30 €/MWh o entre un 1% y 3%, respectivamente. En este estudio se establecerá un coste variable de 20 €/MWh. (Villarrubia López M., “Aspectos económicos y medioambientales” en *Ingeniería de la Energía Eólica*, Barcelona, Marcombo S.A., Primera Edición, 2012, 256)

Se realiza la misma operación para la planta de desalación.

3.2. Costes planta de desalación.

3.2.1. Costes de inversión

El coste de inversión en la planta de desalación se ha establecido siguiendo el precio de adquisición. Se diferencian los costes relacionados con los equipos de bombeo y los relacionados con el núcleo de membranas. Se muestran en las Tablas 5.1 y 5.2 los valores obtenidos respectivamente.

Se debe aclarar que no ha sido posible obtener el coste de los equipos de la compañía Lowara. Se ha estipulado siguiendo el consumo específico en relación con la bomba KSB Multitec RO A65.

COSTE EQUIPOS DE BOMBEO			
Equipo	Marca	Modelo	€/ud.
Captación	Wilo	K10 170	13.642,49 €
Alta presión	KSB	MULTITEC RO A 65	72.317,00 €
Booster	KSB	ETALINE 80	3.745,00 €
Postratamiento	GRUNDFOS	NBE 50 125	5.512,00 €
Distribución inferior	KSB	MOVITEC	12.126,00 €
Bomba tanque	LOWARA	RESIBOOST	2.720,58 €
Bomba tramo 1	LOWARA	MPA65E	52.953,35 €
Bomba tramo 2	LOWARA	MPA65E	49.128,72 €
TOTAL			212.145,13 €

Tabla 5. 1. Coste equipos de bombeo. Fuente: Elaboración propia.

RESUMEN NÚCLEO DE MEMBRANAS			
Equipo	Marca	Modelo	€/ud.
Membrana	Hydranautics	SWC5 MAX	735,00 €
Erd	Energy Recovery	PX-Q300	30.000,00 €
TOTAL			157.755,00 €

Tabla 5. 2. Coste bastidor de membranas y recuperador de energía. Fuente: Elaboración propia

Si se suman ambos resultados, el coste de inversión para los equipos se establece en **369.900,13 €**. Los valores comunes para las plantas de capacidad superior a 1000 metros cúbicos por día se establecen entorno a 450.000\$ (403.000€) según el artículo “Comparative cost analysis of pressure exchanger (PX) and turbine type energy recovery devices at seawater reverse osmosis (SWRO) plants”. (JOUR; Timur, R.S.,Corum, Adnan, Okten, H.E., Çoban, Asli, Demir, Goksel, Bozbura, Faik; 2011/01/01, pág. 1186-1194; Comparative cost analysis of pressure exchanger (PX) and turbine type energy recovery devices at seawater reverse osmosis (SWRO) plants; Vol 12.)

No obstante, este precio no reúne los costes relacionados con la oficina técnica o la obra civil. Se supone un 40% de coste total de los equipos siguiendo el criterio establecido en el documento “*Aspectos económicos y financieros de la desalación*” facilitado por el Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino.

El coste total de inversión para la planta de desalación se sitúa en **517.860,18 €**

3.2.2. *Costes variables*

De igual forma, el informe facilitado por el Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino también muestra los valores asociados al coste variable. Para una planta de desalación común, los costes totales de operación se sitúan en el rango de 0,50 a 0,65 €/m³, a pie de planta. Un 46% representa el consumo energético de la planta. Sin embargo, estos varían en función del precio de la electricidad. Por ello, se cree oportuno realizar un estudio propio de costes de funcionamiento.

A partir del consumo específico se puede obtener el coste de producción de la planta de desalación. Si se considera un precio de electricidad de 0,125 €/kWh, según la información recabada en la página web Selectra, y se le aplica un plus del 54% (coste de funcionamiento), el coste de producción de la planta de desalación se establece en 0,193 €/kWh. Multiplicando este valor por el consumo específico de los equipos se obtiene la siguiente tabla:

<i>COSTE PRODUCCIÓN</i>			
<i>Equipo</i>	<i>Consumo específico (kWh/m³)</i>	<i>Precio (€/m³)</i>	<i>Precio (día)</i>
<i>Captación</i>	0,45	0,09	159,85 €
<i>Total captación</i>	0,45	0,09	159,85 €
<i>Alta presión</i>	2,38	0,46	847,35 €
<i>Booster</i>	0,08	0,02	28,04 €
<i>Total núcleo</i>	2,46	0,47	875,40 €
<i>Postratamiento</i>	0,07	0,01	24,34 €
<i>Distribución inferior</i>	0,04	0,01	14,41 €
<i>Bomba tanque</i>	0,01	0,00	3,23 €
<i>Bomba tramo 1</i>	1,74	0,34	620,47 €
<i>Bomba tramo 2</i>	1,62	0,31	575,65 €
<i>Total distribución</i>	3,48	0,67	1.238,10 €
<i>Total planta</i>	6,38	1,23	2.273,35 €
		TOTAL ANUAL	625.172,39 €

Tabla 5. 3. Costes de producción. Fuente: Elaboración propia

Si se analiza el precio total por metro cúbico se observa un aumento significativo respecto a los establecidos en el informe expuesto. No obstante, dichos valores representan el precio de producción exceptuando los aspectos de distribución. Realizando un sumatorio entre coste de captación y coste del núcleo de membrana se obtiene un valor de 0,56 €/m³. La producción se encuentra en un rango común para este tipo de plantas de desalación.

Sin embargo, el coste que se debe asumir para la distribución aumenta el costo total hasta 1,23 €/m³. Este valor representa unos *costes anuales de producción* de **625.172,39 €**.

Calculados los costes asociados las tareas de producción de energía y agua desalada se pasa a analizar la rentabilidad de ambas actividades.

4. Analisis de rentabilidad

Para llevar a cabo el estudio de la rentabilidad se determina el payback (PB), el valor actual neto (VAN) y la tasa de rentabilidad interna (TRI) simulando la cuenta anual de resultados proyectada durante la vida útil de los equipos, previniendo el flujo de ingresos por venta de electricidad y el de pagos de los costes de explotación y financieros.

Se utilizará como herramienta de apoyo el Ejemplo 11.7 del libro, Ingeniería de la Energía Eólica. (Villarrubia López M., “Aspectos económicos y medioambientales” en *Ingeniería de la Energía Eólica*, Barcelona, Marcombo S.A., Primera Edición, 2012, 272-273).

Se definen los conceptos que se utilizarán en el estudio según bibliografía utilizada:

- *Valor actual neto (VAN)*. Es la suma para los n años de vida de la instalación de todos los flujos de caja en unidades monetarias constantes actualizados al año cero menos la inversión. Será favorable si el VAN es positivo.

$$VAN = -INV + A_0 \sum_{j=1}^n \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$$

Ecuación 17. Valor actual neto (VAN)

Donde,

- INV es la inversión de capital inicial.
- A₀ es el valor de ahorro evaluado a precios de año cero.
- Z es la tasa unitaria de variación anual para los costes de explotación. se suponen constantes para todos los años.

- K es la tasa unitaria de descuento neta incluidos a efectos de inflación.
- *Payback actualizado (PAB)*. Se define como el número de años que hace la suma de los flujos de caja actualizados al año cero sea igual a la inversión (INV). Se determina como:

$$SI = A_0 \sum_{j=1}^{PBA} \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$$

Ecuación 18. Payback actualizado (PBA)

- *La tasa de rentabilidad interna (TRI)*. Es la tasa de rentabilidad que hace nulo el valor actual neto, y se determina a través de la resolución de la ecuación trascendente:

$$TRI = A_0 \sum_{j=1}^n \frac{(1+z)^j}{(1+TRI)^j}$$

Ecuación 19. Tasa de rentabilidad interna (TIR)

Siguiendo el criterio establecido en los apartados anteriores, se diferenciará el análisis de rentabilidad para el caso del aerogenerador y de la planta de desalación. No obstante, algunos parámetros serán comunes en el estudio.

- Tasa unitaria de descuento incluidos efectos de inflación: **$k=7,12\%$**
- Tasa unitaria de incremento anual para el precio de la electricidad y los costes de explotación del sistema: **$z=4\%$**
- Vida útil del sistema: **20 años**.

4.1. Rentabilidad del aerogenerador

Si se quiere conocer la rentabilidad del aerogenerador se debe comparar la energía eléctrica que se deja de comprar por el precio de compra (125 €/MWh) menos los costes de explotación del aerogenerador para el total de la vida útil. Se considera rentable cuando el beneficio de esta operación asuma el costo total de la inversión.

Se define en la Tabla 5.4. los valores de energía producida y de inversión capital.

PARÁMETROS AEROGENERADOR		
Energía producida	3897,25	MWh/año
Inversión	1.250.000,00	€
Venta de energía	125	€/MWh
Coste unitario de producción	20	€/MWh

Tabla 5. 4. Parámetros aerogenerador. Fuente: Elaboración propia

Siguiendo las ecuaciones expuestas anteriormente, se realiza una tabla que muestra la variación de VAN acumulado durante el periodo de vida del aerogenerador. De esta forma se podrá establecer el año de recuperación del capital invertido además de la rentabilidad del proyecto a largo plazo.

RENTABILIDAD AEROGENERADOR				
Año	Inversión	Ahorros nominales	Ahorro actualizado constantes	Van acumulado constante
0	1.250.000,00 €	409.211,25 €	409.211,25 €	-1.250.000,00 €
1	-	425.579,70 €	397.292,48 €	-852.707,52 €
2	-	442.602,89 €	385.720,85 €	-466.986,67 €
3	-	460.307,00 €	374.486,26 €	-92.500,41 €
4	-	478.719,28 €	363.578,90 €	271.078,48 €
5	-	497.868,06 €	352.989,22 €	624.067,70 €
6	-	517.782,78 €	342.707,98 €	966.775,68 €
7	-	538.494,09 €	332.726,19 €	1.299.501,88 €
8	-	560.033,85 €	323.035,14 €	1.622.537,02 €
9	-	582.435,21 €	313.626,35 €	1.936.163,36 €
10	-	605.732,61 €	304.491,60 €	2.240.654,97 €
11	-	629.961,92 €	295.622,91 €	2.536.277,88 €
12	-	655.160,40 €	287.012,54 €	2.823.290,42 €
13	-	681.366,81 €	278.652,95 €	3.101.943,37 €
14	-	708.621,48 €	270.536,84 €	3.372.480,21 €
15	-	736.966,34 €	262.657,13 €	3.635.137,34 €
16	-	766.445,00 €	255.006,92 €	3.890.144,26 €
17	-	797.102,80 €	247.579,54 €	4.137.723,80 €
18	-	828.986,91 €	240.368,48 €	4.378.092,28 €
19	-	862.146,38 €	233.367,46 €	4.611.459,74 €
20	-	896.632,24 €	226.570,35 €	4.838.030,08 €

Tabla 5. 5. Rentabilidad aerogenerador. Fuente: Elaboración propia

Analizando la Tabla 5.5 se obtienen las siguientes conclusiones.

- 1.1.1. Si se estudia el desarrollo del valor actual neto desde el año de inicio hasta el año final, se obtiene un beneficio final de **4.838.030,08 €**. Un 387% respecto al capital invertido en el inicio.
- 1.1.2. El Payback actualizado se sitúa alrededor de 3,5 años.
- 1.1.3. El valor de rentabilidad interna es, aproximadamente, de 38%.
- 1.1.4. La instalación de un sistema eólico con las características técnicas es económicamente viable incluso vendiendo el kWh a la mitad del precio estudiado.

Se realiza el mismo proceso descriptivo para la planta de desalación.

4.2. Rentabilidad de la planta de desalación

Se calcula el flujo de caja operando el precio de venta del agua desalada menos el precio de explotación de la planta de desalación. En la Tabla 5.3. se refleja que el coste de producción se establece en 1,23 €/m³. Como no se ha determinado la fuente de la inversión (sector público o privado) se establece un precio de venta cercano al de producción, 1,3 €/m³.

PARÁMETROS PLANTA DE DESALACIÓN		
Energía producida	3247,65	MWh/año
Inversión	517.860,18	€
Coste unitario de producción	1,23	€/m ³
Precio de venta	1,30	€/m ³

Tabla 5. 6. Parámetros planta de desalación. Fuente: Elaboración propia

RENTABILIDAD DESALADORA				
Año	Inversión	Ahorros nominales	Ahorro actualizado constantes	Van acumulado constante
0	517.860,18 €	35.671,33 €	35.671,33 €	-517.860,18 €
1	-	37.098,18 €	34.632,36 €	-483.227,82 €
2	-	38.582,11 €	33.623,65 €	-449.604,17 €
3	-	40.125,39 €	32.644,32 €	-416.959,85 €
4	-	41.730,41 €	31.693,51 €	-385.266,33 €
5	-	43.399,63 €	30.770,40 €	-354.495,93 €
6	-	45.135,61 €	29.874,18 €	-324.621,76 €

7	-	46.941,04 €	29.004,06 €	-295.617,70 €
8	-	48.818,68 €	28.159,28 €	-267.458,42 €
9	-	50.771,42 €	27.339,10 €	-240.119,32 €
10	-	52.802,28 €	26.542,82 €	-213.576,50 €
11	-	54.914,37 €	25.769,73 €	-187.806,77 €
12	-	57.110,95 €	25.019,15 €	-162.787,62 €
13	-	59.395,39 €	24.290,44 €	-138.497,18 €
14	-	61.771,20 €	23.582,95 €	-114.914,23 €
15	-	64.242,05 €	22.896,07 €	-92.018,16 €
16	-	66.811,73 €	22.229,19 €	-69.788,97 €
17	-	69.484,20 €	21.581,74 €	-48.207,23 €
18	-	72.263,57 €	20.953,15 €	-27.254,08 €
19	-	75.154,11 €	20.342,86 €	-6.911,22 €
20	-	78.160,28 €	19.750,35 €	12.839,13 €

Tabla 5. 7. Rentabilidad desaladora. Fuente: Elaboración propia

Observando detalladamente la Tabla 5.7 se sacan las siguientes conclusiones.

1. Si se estudia el desarrollo del valor actual neto desde el año de inicio hasta el año final, se obtiene un beneficio final de **12.839,13 €**. Valor bastante menor que para el caso del aerogenerador.
2. El Payback actualizado se sitúa alrededor de 19,5 años, cerca del final de su vida útil.
3. El valor de rentabilidad interna es, aproximadamente, de 7%. Existe poco margen respecto a la tasa unitaria de incremento anual. La rentabilidad podría verse afectada si este valor aumenta a lo largo de la explotación.
4. La desaladora es viable a largo plazo, sin embargo, se deben asumir ciertos riesgos respecto a la rentabilidad. Una forma de obtener un mayor porcentaje de existo es aumentar el precio de venta del metro cúbico de agua. Según la información facilitada en la web Iagua, el rango de precios medios de agua desalada se sitúa entre 0,5\$ y 1,5\$/m³.

Por tanto, se podría concluir que ambos sistemas tienen una rentabilidad positiva y, a consecuencia, se debería estudiar su instalación

No obstante, el precio del agua desalada es elevado para el sector agrícola. Es posible que el agricultor no sea capaz de asumir esos costes considerando su margen de beneficio. Por ello, se ha decidido estudiar el sistema de producción de energía y la planta de desalación integrados en una única empresa. Se muestran los resultados obtenidos.

1. El capital de inversión en esta operación sería el sumatorio de los anteriores. Se debería desembolsar **1.767.860,18 €**.
2. El beneficio económico de la empresa se vuelve positivo cuando se vende el agua desalada a un **coste mínimo de 0,66 €/m³** reduciéndose un 50% respecto al anterior. Aplicando esta medida el **beneficio final** se establece en **74.575,45 €**.
3. El Payback actualizado se sitúa en 17 años.
4. La tasa de rentabilidad interna un punto respecto al valor de la desaladora. Sin embargo, afectaría de forma negativa a la rentabilidad interna del sistema eólico.

Estudiando las diferentes opciones de inversión, se considera que, económicamente, la más viable es la del aerogenerador aislado. No obstante, el mercado de la desaladora se vería afectado de forma directa. Por ello, se debería reflexionar sobre la implantación de un sistema empresarial común.

El criterio final para la elección de la medida a adoptar no se encuentra incluido en el fin de este trabajo. Por ello, se pasa a analizar el último apartado de este. Se habla del impacto medioambiental que produce el proyecto.

5. Aspectos medioambientales

En este apartado se desarrollan las principales ventajas y desventajas del sistema eólico y de la planta de desalación respecto al impacto medioambiental.

5.1. Energía eólica

La energía eólica tiene una serie de pros y contras respecto al impacto medioambiental. Conocido es que las energías renovables son relacionadas con el desarrollo sostenible. Sin embargo, existen una serie de inconvenientes que pueden influir de forma negativa en el mismo.

- La energía eólica es una fuente renovable, es decir, no se agota. Difiere de los recursos energéticos no renovables como los combustibles fósiles o el uranio.
- No produce residuos dañinos para el medioambiente. No emite gases contaminantes de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxidos de hidrógeno). Tampoco produce gases nocivos con la capa de ozono.
- Es una energía respetuosa con los acuíferos, ríos, lagos y mares. Al ausentar cualquier tipo de contaminante, no altera la contaminación del agua de la zona.

Sin embargo, la energía eólica también presenta una serie de desventajas respecto al medioambiente.

- *El uso del suelo.* Aunque este proyecto no se ve afectado, “las necesidades de suelo para un parque eólico pueden situarse entre 50 y 150 m²/kW instalando de tal forma que la capacidad instalada por unidad de área esta comprendida entre 6 y 20 MW/km²” (Villarrubia López M., “Aspectos económicos y medioambientales” en *Ingeniería de la Energía Eólica*, Barcelona, Marcombo S.A., Primera Edición, 2012, 276).
- *Ruido.* El rozamiento del eje provoca una fuente acústica. Es cierto que los avances en ingeniería han reducido notablemente este defecto.
- *Impacto visual.* La construcción de un aerogenerador produce un impacto estético negativo en la zona.
- *Fauna y flora.* En funcionamiento, existe un peligro para la fauna de aves de la zona. Es posible que colisiones con las aspas del aerogenerador.

Descritas las ventajas y desventajas, se realiza un análisis medioambiental del aerogenerador a instalar. Se comparará la producción de energía eléctrica de este respecto a la producida en el central diésel de El Palmar, en la capital de la isla de La Gomera.

1. *Ahorro de combustible fósiles.* Si se considera que una central térmica de producción eléctrica opera con un rendimiento del 33%, se puede obtener ahorro de toneladas de barriles de petróleo. La central diésel de El Palmar utiliza gasóleo para su funcionamiento. Cada tonelada equivalente de petróleo (tep) de este compuesto produce 13,02 MWh según el informe *FACTORES DE CONVERSIÓN ENERGÍA FINAL - ENERGÍA PRIMARIA y FACTORES DE EMISIÓN DE CO2-2010* realizado por El Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Multiplicando estos valores por la potencia producida por el aerogenerador se obtiene el ahorro de tep que produce la fuente renovable.

$$\text{Producción de 1 MWh} = \frac{1 \text{ MWh}}{0,33} * \frac{1 \text{ tep}}{13,02 \text{ MWh}} = 0,218 \text{ tep}$$

$$\text{Ahorro anual} = 3117,8 \left(\frac{\text{MWh}}{\text{MW}} \right) * \frac{0,218 \text{ tep}}{\text{MWh}} = 679,60 \frac{\text{tep}}{\text{MW}}$$

Para una potencia instalada de 1,25 MW, el aerogenerador produce un ahorro anual de 850 toneladas equivalentes de petróleo. Considerando que una unidad posee 7,5 barriles de petróleo, el **ahorro económico anual** es de **337.679,09 €**.

2. *Ahorro de emisiones de gases contaminantes.* Los gases que dejan de emitirse cuando se usa la energía eólica se calculan en función del indicador específico de emisión (t/MWh). Este valor es consultado en el informe anual que publica Endesa en su plataforma.

Si se estudia la emisión específica de CO₂, SO₂ y NO_x se obtienen los siguientes valores.

INDICADORES ESPECÍFICOS GASES EMITIDOS		
Indicador específico CO₂	0,69	t/MWh
Indicador específico SO₂	0,046	t/MWh
Indicador específico NO_x	0,022	t/MWh

Tabla 5. 8. Indicadores específicos gases emitidos. Fuente: Endesa

Para calcular el ahorro de emisiones de gases contaminantes únicamente se deben multiplicar los valores de la Tabla 5.8. por la energía anual producida por el aerogenerador. El ahorro de dióxido de carbono (CO₂) se establece en 2673,51 t/MWh. Para dióxido de azufre (SO₂) se reducen 177,74 t/MWh de emisiones. Por último, 84,80 t/MWh es la cantidad de ahorro de emisiones de óxidos de nitrógeno.

5.2. Planta de desalación

La construcción de una planta de desalación presenta aspectos negativos en mayor medida que los favorables.

- Se reduce la sobreexplotación de los recursos hídricos naturales.
- El consumo energético es elevado. La planta representa un 10% de la demanda total de la isla.

- Impacto visual. La construcción de una planta de desalación produce un impacto estético negativo en la zona.
- Fauna y flora. El vertido de salmuera puede alterar el ecosistema marino de la zona.

6. Conclusiones

Analizando los valores obtenidos a lo largo del estudio, se obtienen las siguientes conclusiones:

1. El sistema eólico requiere de un capital de inversión de 1.250.000 €. Por el contrario, el desembolso de la EDAD se establece en 517.860,18 €.
2. El aerogenerador, transcurrida su vida útil, ofrece un beneficio final de **4.838.030,08 €**. El Payback actualizado se sitúa alrededor de 3,5 años. Por el contrario, la planta de desalación únicamente logra un beneficio final de **12.839,13 €**. A consecuencia, el Payback actualizado se sitúa alrededor de 19,5 años, cerca del final de su vida útil.
3. La instalación de un sistema eólico con las características técnicas es económicamente viable incluso vendiendo el kWh a la mitad del precio estudiado. La desaladora es viable a largo plazo, sin embargo, se deben asumir ciertos riesgos respecto a la rentabilidad.
4. Unificando ambas instalaciones en el proyecto se consiguen mejores resultados. Se reduce el precio de venta del metro cúbico de agua. El **coste mínimo de venta es de 0,66 €/m³**. La tasa de rentabilidad interna disminuye un punto respecto al valor de la desaladora. Sin embargo, afectaría de forma negativa a la rentabilidad interna del sistema eólico.
5. Para una potencia instalada de 1,25 MW, el aerogenerador produce un ahorro anual de 850 toneladas equivalentes de petróleo. Considerando que una unidad posee 7,5 barriles de petróleo, el **ahorro económico anual** es de **337.679,09 €**.
6. El ahorro de emisiones de gases contaminantes con la instalación del aerogenerador: Dióxido de carbono (CO₂) 2673,51 t/MWh. Dióxido de azufre (SO₂) 177,74 t/MWh. Óxidos de nitrógeno (NO_x) 84,80 t/MWh.

