



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

Especialidad Mecánica

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO Y RECUPERADORES ENERGÉTICOS DE UNA PLANTA DESALADORA DE ÓSMOSIS INVERSA

Autor: Carlos de la Cámara Castillo

Director: Mar Cledera Castro

Director: Pilar Palomar Herrero

Madrid

Julio 2018

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Carlos de la Cámara Castillo

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: Diseño y dimensionamiento de los equipos de bombeo y recuperadores energéticos de una planta desaladora de ósmosis inversa, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 13 de Julio de 2018

ACEPTA



Fdo: Carlos de la Cámara Castillo

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Diseño y dimensionamiento de los equipos de bombeo y recuperadores
energéticos de una planta desaladora de ósmosis inversa
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2017-2018 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Carlos de la Cámara Castillo

Fecha: 09/07/2018

Autorizada la entrega del proyecto
LAS DIRECTORAS DEL PROYECTO



Fdo.: Maria del Mar Cledera Castro

Fecha: 09/07/2018



Fdo.: Pilar Palomar Herrero

Fecha: 09/07/2018

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO Y RECUPERADORES ENERGÉTICOS DE UNA PLANTA DESALADORA DE ÓSMOSIS INVERSA

Autor: Cámara Castillo, Carlos de la

Directores: Cledera Castro, Mar

Palomar Herrero, Pilar

Entidad Colaboradora: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto trata sobre diseño y dimensionamiento de los equipos de bombeo y recuperadores energéticos de una planta desaladora de ósmosis inversa proyectada en Escombreras.

En primer lugar se encuentra la motivación y objetivo del proyecto, aquí se explican las causas por las que se realiza este proyecto. Además se explica cuál es el objetivo principal del proyecto y como se va a plantear.

Después se encuentra la introducción, donde se observa la situación global del agua incluyendo su distribución, su escasez y su calidad. Con esta situación analizada se plantea la necesidad de las plantas desaladoras, así como sus diferentes tipos y evolución a lo largo de los años. Después se destacan algunas desaladoras del mundo y a continuación, se comenta la desalación en España.

Tras esto, se pasa a procesos de una planta desaladora por ósmosis inversa, en el cual se describen las etapas de captación, pretratamiento, ósmosis inversa y vertido. Durante esta descripción se hace mayor énfasis en las etapas que tienen un consumo eléctrico.

El siguiente apartado es descripción de bombas y recuperadores, en el cual se tratan los aspectos técnicos de las bombas y recuperadores. Además se comparan los diferentes tipos de recuperadores que se han utilizado a lo largo de los años y como ha ido evolucionado el consumo de las desaladores gracias a los avances en los recuperadores.

Finalmente se encuentra el dimensionamiento de los equipos de consumo eléctrico de la planta desaladora de Escombreras. Aquí es donde se realizan todos los cálculos para diseñar los equipos. Primeramente se comenta el emplazamiento, así como las características del agua que afectan al diseño. A continuación, se calculan y diseñan los equipos de bombeo y recuperación que se utilizarán en la planta.

El documento de la memoria descriptiva finaliza con una pequeña conclusión y la bibliografía.

A continuación se encuentra el documento de presupuesto. Aquí se encontrará el precio de las diferentes bombas seleccionadas diferenciadas según la etapa. También incluye el

coste que supone el consumo eléctrico de las bombas y una estimación del coste del metro cúbico de agua desalada.

En el documento de estudio sostenibilidad se valora como afecta la construcción de la planta a diferentes aspectos tanto económicos, de la naturaleza, sociales. También se comentan algunas propuestas que ayudarían a mejorar la sostenibilidad de la planta.

Para finalizar está el pliego de condiciones y los planos. En el pliego de condiciones se encuentran las bases que la desaladora tendría que cumplir. Y finalmente se encuentran tres planos, uno de la localización de la planta, otro de la distribución de las etapas y su consumo, y un esquema hidráulico de la planta.

DESIGN OF THE PUMPING AND ENERGY RECOVERY SYSTEMS FOR A DESALINATION PLANT BY REVERSE OSMOSIS

Author: : Cámara Castillo, Carlos de la

Directors: Cledera Castro, Mar

Palomar Herrero, Pilar

Collaborating Entity: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

First, the motivation and objective of project, here is where the reasons for doing this project are explained. It is also explained the main objective of the project and how it is going to be done.

In the introduction, it is discussed the current situation of water scarcity, its distribution and quality. Then, it is presented the need for desalination plants and their different types and evolution through time. To continue, some desalination plants of the world are point out, and then, the situation of desalination plants in Spain is commented.

Next, the processes that take place in a desalination plant by reverse osmosis are described. The different phases are described, the ones that consumes electricity are more detailed.

The following part includes a description of pumps and energy recovery systems. The technical aspects of both are exposed. In addition, the different types of recovery systems are compared. It is also analysed the reduction in consumption of desalination plants thanks to the developments in energy recovery systems.

The last part is about designing the pumps and energy recovery systems for a desalination plant in Escombreras. This part is where all the calculations are done. First, there is a description of the location of the desalination plant and the characteristics of the sea water. Then, the pumps and energy recovery systems are design and selected.

The document ends with a small conclusion and the bibliography.

The next document is the budget of the project. The prices of all the selected pumps and the cost of the electricity consumed by the pumps are presented. In addition, there is an estimation of the cost of the cubic meter of desalinated water.

Then, there is a document about sustainability. The impact of the desalination plant is evaluated in terms of economic, nature and social aspects. Therefore, some ways of improving the sustainability are presented.

The last documents are the specifications and the drawings. There are three drawings, one of the plant location, another one of the distribution and consumption of the stages, and a hydraulic diagram.

Índice general

Memoria descriptiva	13
Presupuesto	105
Estudio sostenibilidad	119
Pliego de condiciones	135
Planos.....	155

Índice de figuras

Memoria descriptiva

Figura 1. Escasez de agua 2010. (Fuente Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018, imagen original de Burek et al)	19
Figura 2. Cambios en la escasez de agua 2010-2050. (Fuente: Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018, imagen original de Burek et al)	20
Figura 3. Índice de riesgo en la calidad del agua 2000-2005, escenario medio del CSIRO. (Fuente: Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018, imagen original de Veolia/IFPRI 2015)	21
Figura 4. Índice de riesgo en la calidad del agua 2050, escenario medio del CSIRO. (Fuente: Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018, imagen original de Veolia/IFPRI 2015)	22
Figura 5. Gráfico de la evolución del consumo energético desaladoras. (Fuente: Etxaniz, J. (2005), Curso de Desalación AEDyR y elaboración propia)	23
Figura 6. Desaladora de Ras Al-Klair, Arabia Saudí. (Fuente: Doosan)	24
Figura 7. Precipitación media anual de España. (Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente)	26
Figura 8. Explotación de los acuíferos en España. (Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente)	27
Figura 9. Localización de las principales desaladoras de España. (Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente)	28
Figura 10. Esquema planta desaladora. (Fuente: CHG)	29
Figura 11. Torre de toma durante la fase de instalación. (Fuente: Mario de Miguel Bello)	30
Figura 12. Inmisario durante la fase de instalación (Fuente: Mario de Miguel Bello)	31
Figura 13. Esquema de captación mediante inmisario de toma abierta. (Fuente: El agua. Desalación, Capítulo 9: Captación de agua. Antonio Ros Moreno, junio 2011)	31
Figura 14. Bomba vertical tipo turbina SJT (Fuente: Sulzer)	32
Figura 15. Cámara de captación. (Fuente: El agua. Desalación, Capítulo 8: Captación de agua. Antonio Ros Moreno, junio 2011)	33

Figura 16. Cámara de captación con sondeos verticales. (Fuente: El agua. Desalación, Capítulo 8: Captación de agua. Antonio Ros Moreno, junio 2011)	33
Figura 17. Filtro de anillas. (Fuente: El Regante).....	36
Figura 18. Equipo de ultrafiltración (Fuente: EITGROUP)	37
Figura 19. Filtro de cartuchos de la desaladora de Escombreras, (Fuente: Dimasa grupo)	38
Figura 20. Proceso ósmosis inversa (Fuente: GEDAR Gestión de aguas y residuos).....	39
Figura 21. Módulo de ósmosis inversa. (Fuente: ósmosis inversa filtro agua)	40
Figura 22. Sistemas de una y tres etapas. (Fuente: software ROSA, Dow Water & Process Solutions).....	40
Figura 23. Desaladora del Prat, Barcelona. (Fuente: ATLL)	41
Figura 24. Gráfico presión de alimentación vs. Temperatura del agua. (Fuente: Befesa Agua). 42	
Figura 25. Gráfico concentración sales vs. Temperatura del agua. (Fuente: Befesa Agua)	43
Figura 26. Gráfico presión de alimentación vs. Salinidad de alimentación. (Fuente: Befesa Agua)	44
Figura 27. Gráfico presión de alimentación vs. Salinidad de alimentación. (Fuente: Befesa Agua)	44
Figura 28. Emisario con difusor. (Fuente: Aitor Díaz)	46
Figura 29. Dilución por mezcla mediante bomba. (Fuente: Aitor Díaz)	47
Figura 30. Efecto Venturi (Fuente: Buzzle.com).....	48
Figura 31. Difusor Venturi (Fuente: MIKE, DHI)	49
Figura 32. Difusor Venturi de Maspalomas II. (Fuente: Instituto tecnológico de Canarias)	50
Figura 33. Pulsación de caudal de una bomba volumétrica. (Fuente: Apuntes turbomáquinas, ICAI)	51
Figura 34. Rodete radial (Fuente: Shangai Pacific Pump Manufacture)	52
Figura 35. Rodete axial (Fuente: Sulzer).....	52
Figura 36. Rodete diagonal (Fuente: Somani Engineering Enterprise)	53
Figura 37. Rodete de simple aspiración (Fuente: Indiamart).....	53

Figura 38. Rodete de doble aspiración (Fuente: Defu pumps)	54
Figura 39. Curva característica de una bomba (Fuente: apuntes turbomáquinas, ICAI)	55
Figura 40 y 41. Curvas de funcionamiento de tres bombas en serie y paralelo. (Fuente: apuntes turbomáquinas, ICAI)	56
Figura 42. Curvas características según el diámetro del rodete. (Fuente: Taco)	57
Figura 43. Catálogo bombas. (Fuente: KDN Saci pumps)	58
Figura 44 y 45. Turbina Francis (Fuente: Hydrotu Engineering Co.) y su rodete (Fuente: Walter).	59
Figura 46. Ensayo turbina Francis (Fuente: ASIng Servicios de Ingeniería)	60
Figura 47. Turbina Pelton (Fuente: ESPE Group Preofessione Energía)	61
Figura 48. Ensayo turbina Pelton (Fuente: WKV, Wasserkraft Volk AG)	62
Figura 49. Recuperador de energía DWEER (Fuente: Flowserve)	63
Figura 50. PX Pressure Exchanger (Fuente: Energy Recovery)	63
Figura 51. Instalación de ósmosis inversa con cámaras de intercambio de presión. (Fuente: Considerations for Selection of Seawater Filtration Pretreatment System, Nikolay Voutchkov)	64
Figura 52. Comparación de consumos en la etapa de ósmosis inversa en función del recuperador. (Fuente Mejora de la eficiencia energética en la reforma de plantas desaladoras. Bartolomé Marón. II Seminario internacional de desalación en Antofagasta. Elaboración propia)	65
Figura 53. Valle de Escombreras. (Fuente: Google Maps)	66
Figura 54. Ubicación de la nueva desaladora. (Fuente: Google Earth)	67
Figura 55. Batimetría Escombreras. (Fuente: Google Earth y MAPAMA)	68
Figura 56. Altura de diferentes puntos de la finca seleccionada. (Fuente: Google Earth)	68
Figura 57. Temperatura del agua en Cabo de palos 2006-2018. (Fuente: Puertos del Estado) .	69
Figura 58. Salinidad del agua en Cabo de palos 2006-2018. (Fuente: Puertos del Estado)	71
Figura 59. Constante pérdida de carga. (Fuente: apuntes mecánica de fluidos, ICAI)	75
Figura 60. Gráfica pérdida de carga (mca) frente al caudal (m ³ /h). (Fuente: catálogo Filtro Lama MasterMegadisc)	77

Figura 61. Configuración filtros de anillas en paralelo. (Fuente: catálogo filtro Lama MasterMegadisc)	78
Figura 62. Cámara de intercambio de presión PX. (Fuente: Energy Recovery)	84
Figura 63. Esquema hidráulico instalación con cámara de intercambio de presión (plano 3). (Fuente: elaboración propia)	85
Figura 64. Gráfico comparativo consumo ósmosis inversa. (Fuente: elaboración propia).....	87
Figura 65. Plano de la planta completa con cámaras de intercambio de presión, plano 3. (Fuente: elaboración propia)	89
Figura 66. Bomba Andritz vertical sumergible CAT/SAT. (Fuente: Andritz).....	89
Figura 67. Curva característica bomba SAT a 1500 rpm. (Fuente: Andritz)	90
Figura 68. Bomba Andritz S de una etapa de eje horizontal. (Fuente: Andritz)	91
Figura 69. Gráfica curvas características bomba S a 1500 rpm. (Fuente: Andritz)	91
Figura 70. Bombas de alta presión Andritz MP. (Fuente: Andritz).....	92
Figura 71. Curva característica bomba MP para 50Hz. (Fuente: Andritz)	93
Figura 72. Bomba Andritz ACP/ARE. (Fuente: Andritz)	94
Figura 73. Curvas de funcionamiento bomba Andritz ACP/ARE. (Fuente: Andritz).....	94
Figura 74. Gráfico distribución consumos. (Fuente: elaboración propia).....	101

Presupuesto

Figura 75. Coste de las bombas de la planta. (Fuente: elaboración propia).....	111
Figura 76. Simulador tarifa luz para industria en la Península. (Fuente: Aura Energía)	112
Figura 77. Distribución tarifas horarias. (Fuente: Aura Energía).....	113
Figura 78. Simulación coste consumo eléctrico enero, febrero y diciembre. (Fuente: Aura Energía)	115
Figura 79. Simulación coste consumo eléctrico marzo y noviembre. (Fuente: Aura Energía) .	115
Figura 80. Simulación coste consumo eléctrico abril, mayo y octubre. (Fuente: Aura Energía)	115

Figura 81. Simulación coste consumo eléctrico 1 al 14 de junio y septiembre. (Fuente: Aura Energía)	116
Figura 82. Simulación coste consumo eléctrico 15 al 30 de junio y julio. (Fuente: Aura Energía)	116
Figura 83. Presupuesto luz mensual agosto. (Fuente: Simulador Aura Energía)	116

Estudio sostenibilidad

Figura 84. Fotografía antes y después de construir la planta de Torrevieja. (Fuente: La desaladora de Torrevieja. ¿Efectos nocivos para la flora y fauna marina? ¿Es necesaria y económicamente rentable? (1), Acciona Agua (2)).....	125
Figura 85. Espacios protegidos cercanos a Escombreras. (Fuente: Geoportal y elaboración propia)	126
Figura 86. Vertido salmuera. (Fuente: Acuamed, Sociedad estatal de aguas de la cuenca mediterránea)	127
Figura 87. Distribución de la energía eléctrica en GWh. (Fuente: Informe del sistema Eléctrico Español 2017)	128
Figura 88. Comparación del estado del embalse de Entrepeñas 2011-2015. (Fuente: artículo “El Gobierno autoriza un nuevo trasvase de 10 hm3 con la cabecera del Tajo agonizando”, septiembre 2015)	129
Figura 89. Estado de los acuíferos de la Demarcación hidrográfica del Segura. (Fuente: plan hidrológico de la demarcación del Segura 2015/21)	130

Índice de tablas

Memoria descriptiva

Tabla 1. Comparación captación abierta y cerrada. (Fuente: Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano. Ministerio de sanidad y política social).....	34
Tabla 2. Coeficiente de pérdidas de carga secundarias. (Fuente: Cátedra de Ingeniería Rural)	76
Tabla 3. Potencias consumidas en la etapa de ósmosis inversa. (Fuente: elaboración propia)	87
Tabla 4. Comparativa potencia total. (Fuente: elaboración propia)	88
Tabla 5. Consumos por etapas. (Fuente elaboración propia)	101

Presupuesto

Tabla 6. Bombas escogidas y bombas de referencia. (Fuente: datos del catálogo Grundfos 2018, elaboración propia)	110
Tabla 7. Relaciones y precios bombas escogidas y de referencia. (Fuente: datos del catálogo Grundfos 2018, Elaboración propia)	110
Tabla 8. Coste bombas por etapa y total. (Fuente: elaboración propia)	111
Tabla 9. Precios consumo eléctrico. (Fuente: datos de Aura Energía, elaboración propia)	113
Tabla 10. Costes agua desalada. (Fuente: elaboración propia)	114
Tabla 11. Distribución de los costes del agua desalada. (Fuente: Las técnicas de desalación y sus costes, de J. M. Cámara Zapata y M. A. Melián Navarro, y elaboración propia)	114



MEMORIA DESCRIPTIVA

Índice

	Pag.
1. Motivación y Objetivo del proyecto.....	17
2. Introducción	19
2.1 El problema del agua.....	19
2.2 Métodos de desalación	22
2.3 Desalación en el mundo	24
2.4 Desalación en España	25
3. Procesos de una planta desaladora por ósmosis inversa.	29
3.1 Captación.....	29
3.1.1 Tomas abiertas	30
3.1.2 Tomas cerradas mediante pozos de captación subterráneos	32
3.2 Pretratamiento	34
3.2.1 Coagulación	35
3.2.2 Desinfección	35
3.2.3 Ajuste de pH	35
3.2.4 Reducción de oxidantes	35
3.2.5 Antiincrustantes	36
3.2.6 Filtrado	36
3.3 Ósmosis inversa.....	38
3.4 Vertidos	45
4. Descripción de bombas y recuperadores.....	51
4.1 Tipos de bombas	51
4.2 Tipos de recuperadores energéticos.....	58
4.2.1 Turbina Francis	59
4.2.2 Turbina Pelton	60
4.2.3 Cámara de intercambio de presión	62
5. Dimensionamiento de los equipos de consumo eléctrico de una planta desaladora en Escombreras.....	66
5.1 Emplazamiento.....	66
5.2 Captación.....	71
5.3 Pretratamiento	77

5.4 Ósmosis inversa.....	79
5.5 Dimensionamiento de los recuperadores de energía	81
5.5.1 Turbina Pelton	81
5.5.2 Cámaras de intercambio de presión	84
5.6 Elección del dispositivo recuperador de energía	87
5.7 Elección de los equipos de bombeo.....	88
5.7.1 Captación.....	89
5.7.2 Pretratamiento.....	90
5.7.3 Ósmosis inversa.....	92
5.7.4 Bomba booster	93
5.8 Consumo eléctrico de los equipos.	95
5.8.1 Bombas captación	95
5.8.2 Bombas pretratamiento	97
5.8.3 Bombas ósmosis inversa	98
5.8.4 Bombas booster	99
5.8.5 Resumen de consumos	101
6. Conclusión	102
7. Bibliografía	103

1. Motivación y Objetivo del proyecto

El problema de la escasez de agua está muy presente hoy en día, y se está agravando debido al cambio climático. Las plantas desaladoras al no depender de las condiciones climáticas y al ser su fuente el agua de mar, que representa un 97.5% del agua total de la Tierra, son una buena solución para obtener agua dulce para abastecer el regadío, actividades industriales y el consumo.

Sin embargo, las desaladoras todavía tienen margen de mejora en cuanto a consumo eléctrico, es por ello por lo que es importante seguir investigando y trabajando sobre formas de aumentar la eficiencia y recuperación de energía. El mayor consumo eléctrico proviene de las bombas que están presentes a lo largo de toda la planta. Existen varios tipos de bomba en la planta, sirven para captar el agua de mar, transportarla por las diferentes etapas y aumentar su presión. Por otro lado, los recuperadores hacen que las plantas por ósmosis inversa sean económicamente viables, por eso también es otra parte fundamental de la planta.

En cuanto al método de desalación del proyecto se centrará únicamente en la ósmosis inversa para el diseño, aunque se incluirá una pequeña descripción de otros tipos de tecnologías de desalación. Se ha planteado así debido a que hoy en día la ósmosis inversa es el método de desalación más eficiente y con más ventajas, y por ello es el método que se implanta en las desaladoras de nueva construcción.

Todo esto es lo que lleva a que este proyecto se centre en los equipos de bombeo y recuperadores energéticos de las desaladoras por ósmosis inversa.

El objetivo principal del proyecto es diseñar los equipos de bombeo y los recuperadores energéticos de una nueva planta desaladora que se proyectará en el valle de Escombreras en Cartagena, Murcia. La desaladora tendrá una capacidad de producción de 165 000 m³/día de agua producto. La región sufre de escasez de agua desde hace tiempo debido a la sequía y su gran dependencia del Trasvase del Tajo-Segura. El Trasvase se cerró desde mayo de 2017 hasta abril de 2018 debido al bajo nivel de los embalses de Entrepeñas y Buendía, que son los que regulan la cantidad de agua que se puede trasvasar. Además, la zona cuenta con grandes zonas de regadío que demandan gran cantidad de agua.

Para ello habrá tres objetivos intermedios: identificación de las etapas de una desaladora, identificación de los equipos de bombeo en una planta desaladora, y finalmente el cálculo de los parámetros necesarios como la potencia, caudal, velocidades, etc.

La identificación de las etapas de una desaladora se trata de obtener una visión global de una desaladora. Entender e identificar cada parte del proceso que hacen posible la desalación, distinguiendo entre aquellas que implican un consumo energético.

La identificación de los equipos de bombeo consistirá en analizar el funcionamiento de una planta desaladora desde su captación hasta la distribución del agua. Durante este recorrido se identificarán los puntos donde sean necesarias bombas, de qué tipo y en qué configuración.

El cálculo y dimensionado de los equipos consistirá en, una vez conocido los puntos donde sean necesarias bombas, las características del emplazamiento y de las condiciones marinas; realizar los cálculos necesarios para seleccionar y dimensionar los equipos que mejor se ajusten y que proporcionen un funcionamiento óptimo de la planta.

2. Introducción

2.1 El problema del agua

El agua es un bien fundamental para la vida y a pesar de que el 71% de la superficie de la Tierra está cubierta con agua, solo el 2.5% es agua dulce, la cual en su mayoría se encuentra en glaciares y como agua subterránea, dejando tan solo el 0.4% del agua dulce como agua superficial y atmosférica. El consumo de agua sigue en aumento debido al crecimiento de la población, de la actividad industrial y otras actividades como la agrícola. Sin embargo, la disponibilidad del agua es cada vez menor debido al cambio climático, la sobreexplotación y su contaminación.

En la figura 1 se muestra la escasez de agua en el mundo en el año 2010.

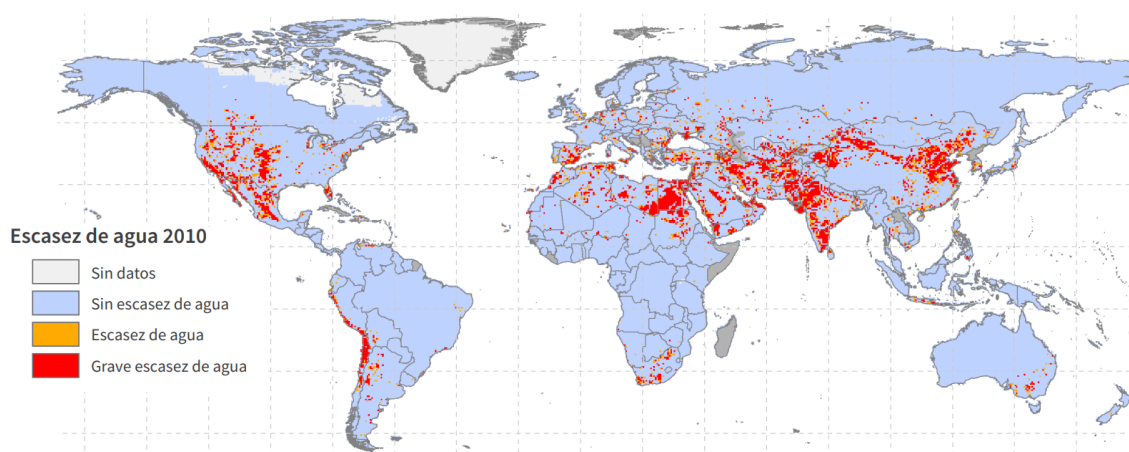


Figura 1. Escasez de agua 2010. (Fuente Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018, imagen original de Burek et al)

Como se puede ver en la figura 1 la escasez de agua es un problema que afecta a muchos lugares del mundo. Se estima que el 27% de la población mundial sufre una escasez de agua severa en 2010 según la UNESCO. Además, la demanda de agua es seis veces mayor que hace 100 años y se espera que siga creciendo en los próximos años. Gran parte de las extracciones de agua, alrededor del 70%, se destinan a la agricultura para el riego. La industria representa el 20 % del uso de agua y el 10% restante representa el uso doméstico. ¹

¹ Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018

En la figura 2 se muestra una proyección de los cambios en la escasez de agua mundial que se prevén hasta el año 2050.

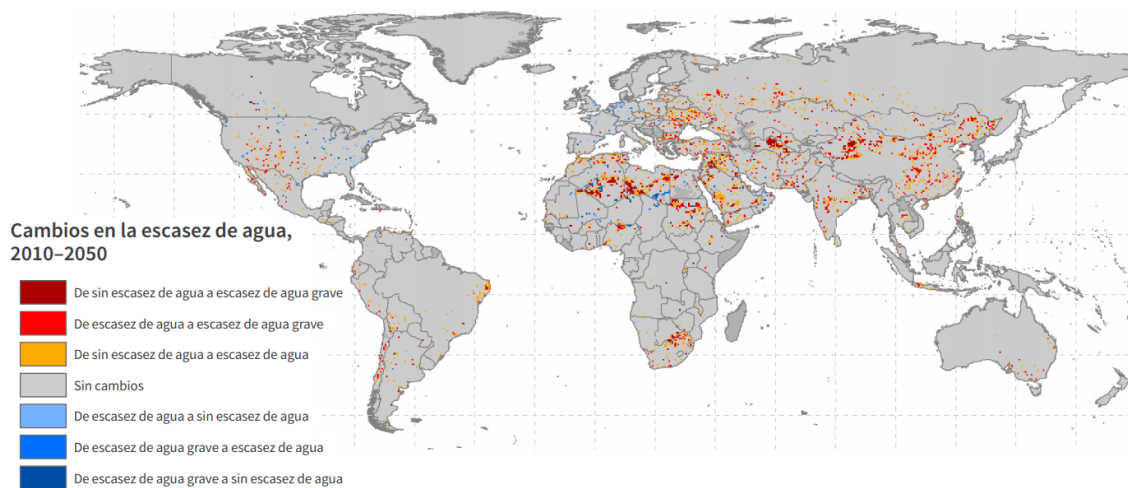


Figura 2. Cambios en la escasez de agua 2010-2050. (Fuente: Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018, imagen original de Burek et al)

Se espera que en 2050 la población mundial llegue a los 9700 millones², y el uso de agua aumente entre un 20% y un 30%. Con esto, se estima que la escasez de agua se incremente considerablemente, aumentando de 1900 a 3000 millones las personas que viven en una zona con un potencial de escasez de agua severa en 2050.³

Las sequías son cada vez más frecuentes y más severas. Sin embargo, la sequía no es el único causante de la escasez de agua, la sobreexplotación hídrica contribuye en gran medida. La sobreexplotación de acuíferos es un problema muy extendido en el que se extrae agua a mayor ritmo del que se recarga. Esto hace que el nivel freático descienda, lo que provoca a su vez otros problemas como la intrusión marina, lo cual contamina el agua dulce. Otros tipos de contaminación de los acuíferos son los pesticidas y las granjas de ganado ya que provocan que ciertas sustancias se filtren a través del terreno y acaben contaminando el agua. La eutrofización de los embalses es otro tipo de contaminación del agua que afecta a la calidad del agua. Es un fenómeno que ocurre debido al aumento de ciertos nutrientes principalmente el fósforo y el nitrógeno que produce un crecimiento desmesurado de algas y por lo tanto de ciertas especies provocando una disminución del oxígeno, el crecimiento de algas tóxicas, etc. Toda esta contaminación afecta a la calidad del agua.

² Población mundial. Naciones Unidas.

³ Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018

En la figura 3 se muestra el índice de riesgo en la calidad de agua durante los años 2000-2005 según el escenario medio del CSIRO⁴.

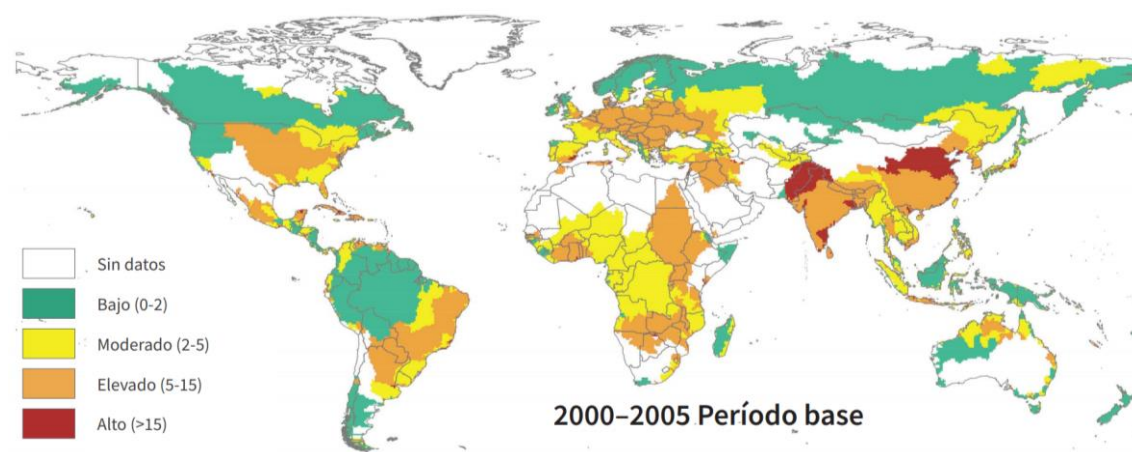


Figura 3. Índice de riesgo en la calidad del agua 2000-2005, escenario medio del CSIRO. (Fuente: Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018, imagen original de Veolia/IFPRI 2015)

En la figura anterior se puede ver como existen muchas zonas en riesgo de la calidad de agua, estas coinciden con las zonas que tienen mayor densidad de población y crecimiento económico. La WWAP⁵ de 2017 estima que el 80% de las aguas residuales son vertidas sin ningún tipo de tratamiento. Gran parte de esta contaminación se debe a ciertos nutrientes como el fósforo y el nitrógeno, la agricultura es causa del vertido de gran parte de estos contaminantes.⁶

En la figura 4 se representa el índice de riesgo en la calidad de agua para el año 2050 según el escenario medio del CSIRO.

⁴ CSIRO, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation.

⁵ WWAP, World Water Assessment Programme.

⁶ Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018

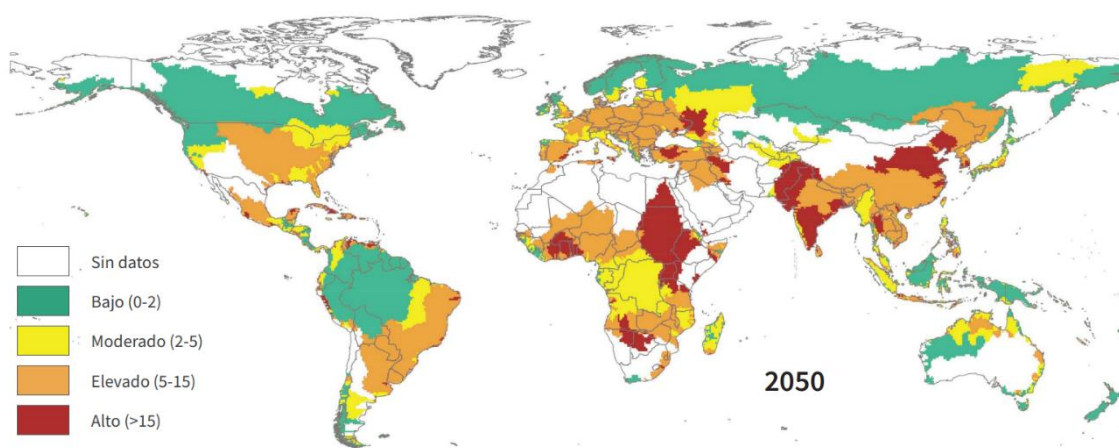


Figura 4. Índice de riesgo en la calidad del agua 2050, escenario medio del CSIRO. (Fuente: Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018, imagen original de Veolia/IFPRI 2015)

En esta proyección del riesgo de la calidad del agua para 2050 se observa que la situación mundial no solo no mejora, sino que se intensifica en muchas zonas.

Por todo esto, es necesario buscar soluciones y conseguir agua sin depender de las lluvias y reducir la explotación de los acuíferos. Una opción muy interesante es la desalación, ya que se puede aprovechar una fuente teóricamente inagotable como es el agua de mar, para producir agua dulce independientemente de las condiciones climatológicas.

2.2 Métodos de desalación

La desalación se puede definir como “una serie de procesos para eliminar parte o la totalidad de sal y otros minerales del agua de mar o salobre para transformarla en agua potable apta para el riego o el consumo humano. El proceso de desalación se lleva a cabo en una planta desaladora de agua, también conocidas como Instalación Desaladora de Agua de Mar (IDAM).”⁷ El producto de este proceso es el agua dulce y el subproducto es un fluido hipersalino llamado salmuera.

Existen varios métodos de desalinización, los cuales se pueden dividir en dos grandes grupos: tecnologías térmicas y tecnologías de membranas.

Entre las del primer grupo cabe destacar la destilación. Es un proceso en el cual se evapora agua de mar, consiguiendo así separar las sales del agua, luego el vapor se introduce en una serie de etapas donde se va disminuyendo la temperatura y la presión hasta conseguir condensar el

⁷ Definición de desalación por Acciona.

vapor. Es un proceso con un consumo muy alto de energía y también de un gran impacto ambiental y coste económico muy significativo que hoy en día ha sido remplazado por la ósmosis inversa en las plantas de nueva construcción. Sin embargo, muchas desaladoras siguen utilizando este método, sobre todo en la zona de Oriente Medio.

Por otro lado, en las tecnologías de membranas hay que destacar la ósmosis inversa. Es la opción más eficiente, de menor coste de instalación, menor consumo energético, menor impacto ambiental y mayor facilidad de ampliación. Hoy en día, es el proceso más extendido en las plantas desaladoras. La ósmosis consiste en que, en un recipiente que contiene dos líquidos con distintas concentraciones separados por una membrana semipermeable, parte del líquido con menor concentración pasará a través de la membrana hacia el de mayor concentración hasta equilibrar la concentración, elevando el nivel de este. La presión osmótica se corresponde con la diferencia de niveles. La desalación por ósmosis inversa se basa en que, si se eleva la presión del lado del agua de mar por encima de la presión osmótica, el agua salada pasará a través de la membrana filtrando así las sales. En las plantas desaladoras existen unos tratamientos previos a la ósmosis inversa, así como un procesado posterior y recuperación de energía.

Tradicionalmente, el consumo energético de las plantas desaladoras para poder llevar a cabo el proceso de separación de sales ha sido muy elevado. El consumo eléctrico de las desaladoras es bastante elevado todavía, si bien, se ha reducido mucho en los últimos años, como se puede observar en la figura 5 que muestra la evolución del consumo energético de las desaladoras en los últimos años.

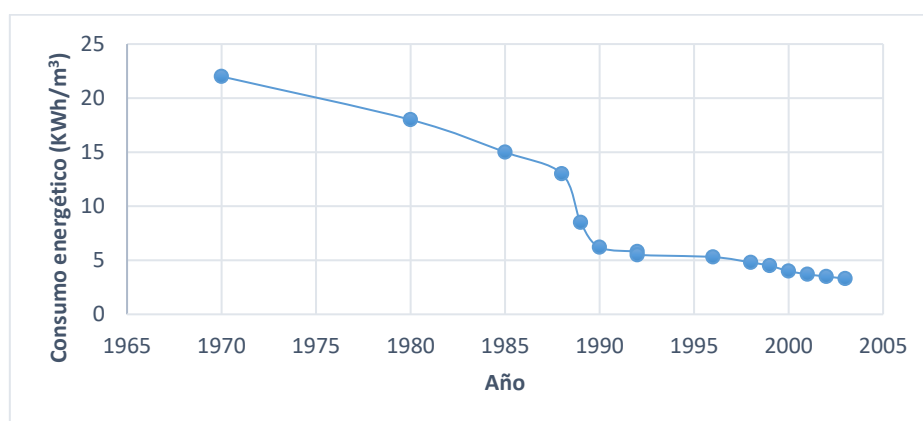


Figura 5. Gráfico de la evolución del consumo energético desaladoras. (Fuente: Etxaniz, J. (2005), Curso de Desalación AEDyR y elaboración propia)

En 1970 el consumo de una desaladora era de aproximadamente 22kWh/m³, se empleaban tecnologías térmicas, aunque en los 70 ya se empezó a utilizar la tecnología de membranas en

algunas plantas de nueva construcción. A finales de los 80 se puede observar una gran reducción de consumo debido a que muchas desaladoras utilizaban ya la ósmosis inversa como método de desalación. En el año 2000 se había reducido a 4kWh/m^3 gracias a la ósmosis inversa y hoy en día está alrededor de 3kWh/m^3 .⁸

Todavía las plantas desaladoras por ósmosis inversa siguen siendo muy costosas, por ello, es necesario seguir investigando nuevas tecnologías, formas de optimización y recuperadores de energía para aumentar la eficiencia.

2.3 Desalación en el mundo

La desalación tiene una gran importancia en diferentes zonas del mundo. En Oriente Medio las plantas desaladoras tienen un papel fundamental debido a la gran escasez de agua de esta zona. Muchos de estos países dependen fundamentalmente de la desalación para el agua de consumo. Es por ello por lo que las plantas desaladoras más grandes del mundo se encuentran esta zona. En Ras Al-Khair, Arabia Saudí, está la mayor planta desaladora del mundo (figura 6), con una producción máxima de $1\text{ hm}^3/\text{día}$.⁹ Es una desaladora híbrida que utiliza tanto la tecnología de membranas con la ósmosis inversa, como la desalación térmica flash multietapa. Fue puesta en funcionamiento en 2014 y abastece a 3.5 millones de personas.



Figura 6. Desaladora de Ras Al-Khair, Arabia Saudí. (Fuente: Doosan)

⁸ Etzaniz, J. (2005), Curso de Desalación AEDyR.

⁹ ¿Puede la desalinización ser la solución para la crisis mundial del agua?, BBC Mundo, Alejandra Martins. Marzo 2017.

La segunda más grande es la planta de Sorek, Israel, con 624.000 m³/día. Es una planta que utiliza la ósmosis inversa como método de desalación y lleva en funcionamiento desde 2013. Por otro lado, Australia tiene la planta más grande del hemisferio sur. Debido a su clima semiárido en gran parte de su extensión, han tenido que recurrir a la desalinización para hacer frente a la sequía. La planta de Adelaida tiene una producción diaria de 300.000 m³/día, que abastece a 2 millones de personas.¹⁰

Otro país donde la desalación tiene gran relevancia es Chile. Es un país que tiene mucho turismo, una gran actividad minera, además de otras actividades como la agricultura que demandan mucha agua. A pesar de contar con buenos recursos hídricos, están distribuidos de manera irregular. La zona norte tiene un clima desértico y una gran escasez de agua. Estas condiciones han sido las que impulsaron a Chile a implantar numerosas plantas desaladoras y hoy en día tiene muchos proyectos para aumentar el número de plantas y así como la capacidad de las actuales.

2.4 Desalación en España

La primera planta desaladora de Europa se construyó en España en 1965 en Canarias. Cuando se construyó producía 2500 m³/día mediante la evaporación súbita. Estas primeras plantas se basaban en procesos térmicos de desalación y tenían un consumo muy alto de energía. Sin embargo, se desarrollaron numerosas plantas debido a que era necesario asegurar el abastecimiento. Muchas de las primeras plantas se construyeron en las Islas Canarias y Baleares debido a sus mayores limitaciones para obtener agua dulce.

Más tarde, sobre finales de los 80 el consumo de las desaladoras se había reducido enormemente debido a la llegada de la ósmosis inversa. Gracias a esta tecnología de membranas el consumo se redujo hasta los 8 kWh/m³ lo cual originó que se construyeran más desaladoras.

Después, en los años 90, tiene lugar un gran desarrollo de las plantas desaladoras, sobre todo en las costas del Mediterráneo. Sin embargo, este desarrollo se vio frenado por un cambio de políticas. Ya no se siguió apoyando a las desaladoras y en su lugar se favoreció la implementación de trasvases.

De nuevo hubo otro cambio de políticas del agua en 2004. Hubo un gran cambio con la introducción del Plan Hidrológico Nacional de 2005. Se derogó el trasvase del Ebro y se invirtió en la construcción de nuevas desaladoras.

En los años siguientes ha habido nuevamente cambio de políticas debido a los cambios de gobierno. A pesar de ello existen hoy en día más de 900 desaladoras en nuestro país.¹¹ España

¹⁰ IDAM Adelaida, Acciona Agua.

¹¹ Dato de iagua, Las infraestructuras del agua españolas en números.

es un referente a nivel mundial en cuanto a la desalación; es el primer país de Europa y tercero del mundo en capacidad instalada, por detrás de Arabia Saudí y Emiratos Árabes¹². Muchos de los grandes proyectos de desalación se han llevado a cabo por empresas españolas, como, por ejemplo, la desaladora de Adelaida (Australia) de 300 000 m³/día por Acciona.

España es un país con unas condiciones climatológicas muy variadas y unas precipitaciones muy desiguales. Esto hace que la disponibilidad de agua sea muy dispar, teniendo la zona norte grandes aportaciones por la lluvia mientras que la zona sureste tiene frecuentes problemas de escasez.

En la figura 7 se puede ver la distribución de las precipitaciones en España.

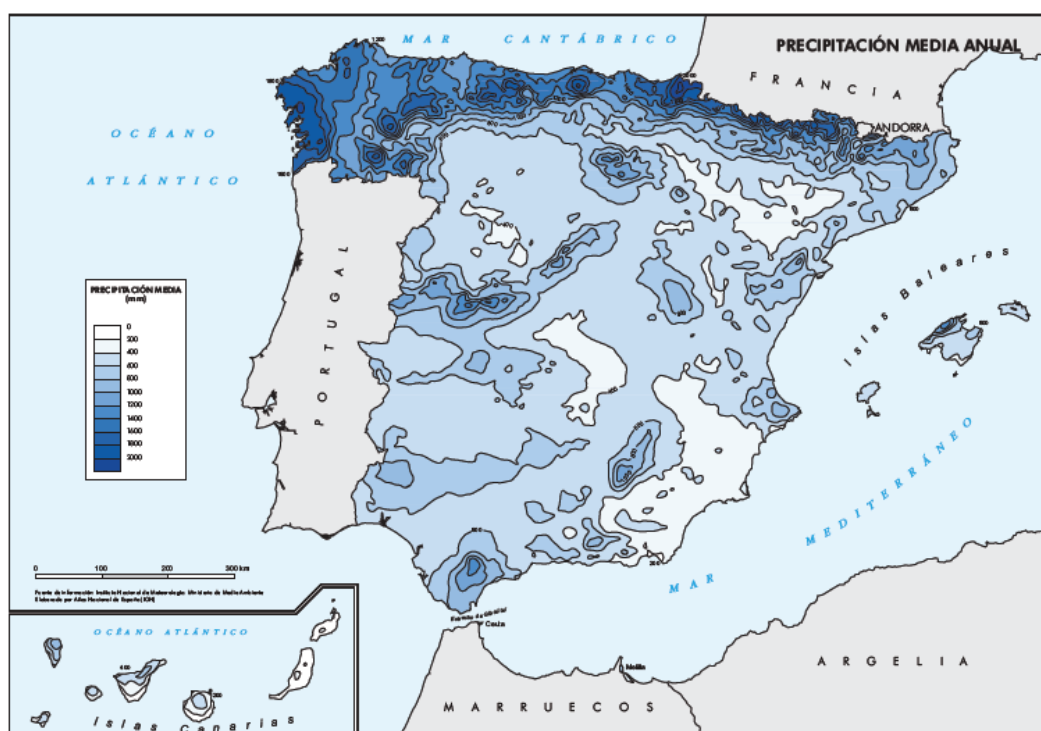


Figura 7. Precipitación media anual de España. (Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente)

En la figura anterior se puede observar que mientras la zona norte llega a tener más de 2000 mm de precipitación media en algunos puntos, la zona de la costa mediterránea cuenta con una media anual muy baja.

Otros recursos para obtener agua como pueden ser los acuíferos se encuentran en puntos críticos en algunas zonas.

En la figura 8 se representa la explotación de los acuíferos en España.

¹² Dato obtenido del artículo “¿La solución está en el mar?”, Francisco Rouco, dato original de IDA.

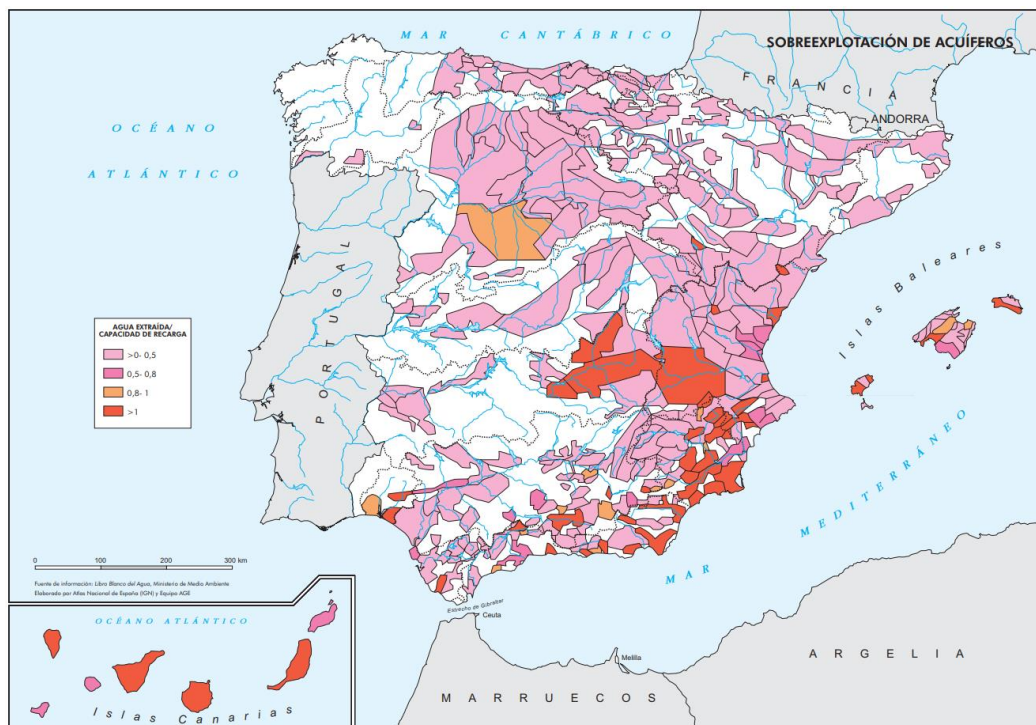


Figura 8. Explotación de los acuíferos en España. (Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente)

En la figura anterior se observa como muchos de los acuíferos de la costa mediterránea y las Islas Canarias se encuentran sobreexplotados, debido a que se extrae agua a mayor ritmo de la que se recarga. La sobreexplotación de los acuíferos no solo provoca un agotamiento de las cuencas, sino que también causa una menor calidad del agua e intrusión marina en las zonas de costa.

Además de estos factores, la situación se ve empeorada por las frecuentes sequías. La sequía de 2017 ha sido la peor de los últimos 20 años, con los embalses por debajo del 40% y precipitaciones considerablemente menores a las de años anteriores. Además, las altas temperaturas y los numerosos incendios han empeorado aún más la situación, llegando a limitar el uso del agua en varias zonas. Con esta situación las plantas desaladoras cobran cada vez más importancia.

En la figura 9 se pueden ver la localización de las principales plantas desaladoras de España.

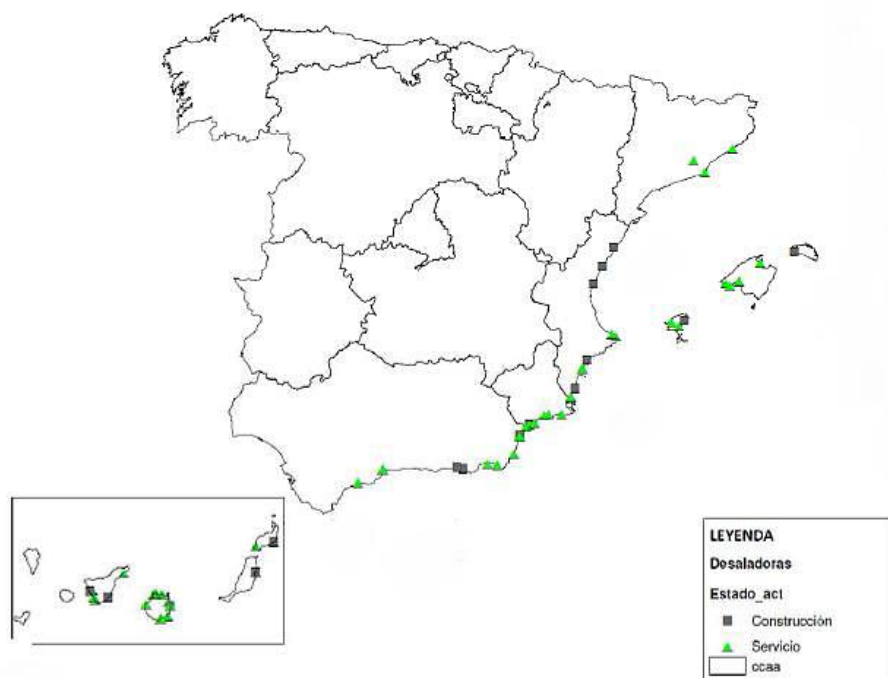


Figura 9. Localización de las principales desaladoras de España. (Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente)

Se observa que las principales desaladoras se encuentran en las zonas de menores precipitaciones y de mayor explotación de los acuíferos. Cabe destacar la importancia de la desalación en las Islas Canarias, que cuenta con 327 desaladoras ¹³. Esto ha supuesto una gran solución a la baja disponibilidad de agua de las islas. En las islas de Fuerteventura y Lanzarote el agua para el consumo proviene en su totalidad de plantas desaladoras.

Por otro lado, en la costa mediterránea se encuentran desaladoras de mucha mayor capacidad. Por ejemplo, la desaladora de Torrevieja con una capacidad de producción de 240 000 m³/día ¹⁴ mediante ósmosis inversa. Es la desaladora más grande de España y Europa. Durante mayo de 2017 y abril de 2018 ha sido la principal fuente de agua de la zona ya que el Trasvase Tajo-Segura ha estado cerrado durante este período.

¹³ 12º Seminario Internacional de Comarcas Sostenibles

¹⁴ Acciona agua, IDAM Torrevieja.

3. Procesos de una planta desaladora por ósmosis inversa.

En este apartado se describirán las etapas que existen en una planta desaladora. El proceso que se lleva a cabo en la desalación es el siguiente: primero, captación del agua de alimentación de la planta, después pretratamiento, a continuación, el proceso de ósmosis inversa para la separación de sales y recuperación de energía, y finalmente vertido de la salmuera. En la descripción de estos procesos se hará un mayor énfasis en las partes que impliquen un consumo eléctrico ya que este proyecto se centra en las bombas y recuperadores energéticos de las plantas desaladoras.

En la figura 10 se puede ver el esquema general de una desaladora por ósmosis inversa.



Figura 10. Esquema planta desaladora. (Fuente: CHG)

3.1 Captación

Para captar el agua marina (agua bruta) y conducirla hasta la planta desaladora, se construye una obra de toma. En el proceso de captación puede realizarse mediante dos tipos: toma abierta o toma cerrada mediante pozo subterráneo. En las plantas desaladoras siempre que se pueda se escogen las tomas cerradas ya que proporciona un agua de mayor calidad y características más homogéneas y estables debido a la acción filtrante de los pozos. Sin embargo, para plantas de grandes caudales no se utilizan, dado que el caudal que pueden proporcionar es limitado y es necesario recurrir a tomas abiertas.

3.1.1 Tomas abiertas

Las tomas abiertas tienen tres partes: la torre de toma, el inmisario y la cámara de bombeo. La torre de toma (figura 11) se coloca en el fondo marino y dispone de unas ventanas por donde se capta el agua. Estas ventanas constan de unas rejillas para evitar que se introduzcan sólidos o peces.

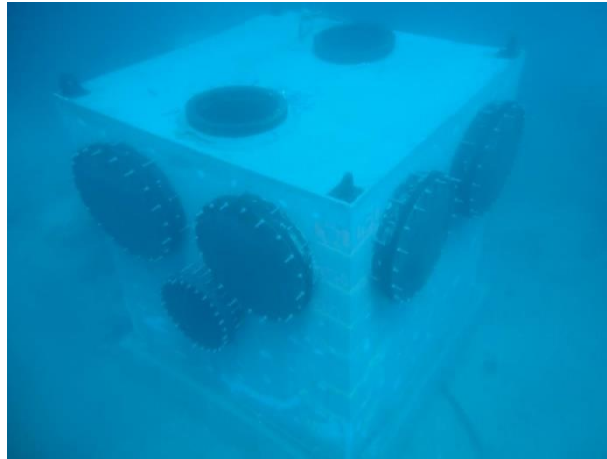


Figura 11. Torre de toma durante la fase de instalación. (Fuente: Mario de Miguel Bello)

El inmisario (figura 12) es la conducción por donde se transporta el agua desde la torre de captación hasta la cámara de bombeo. Pueden estar fabricados en diferentes materiales, pero el más utilizado es el polietileno de alta densidad. Esto es debido a que tienen unas características que lo hacen muy adecuado para este uso, como son, su gran flexibilidad, ligereza, bajo coste de instalación y de mantenimiento, baja pérdida de carga y resistencia a la corrosión.



Figura 12. Inmisario durante la fase de instalación (Fuente: Mario de Miguel Bello)

El inmisario lleva el agua hasta la cámara de bombeo, donde se encuentran las bombas que impulsarán el agua hasta el depósito regulador de la planta.

En la figura 13 se puede ver un esquema de este tipo de toma.

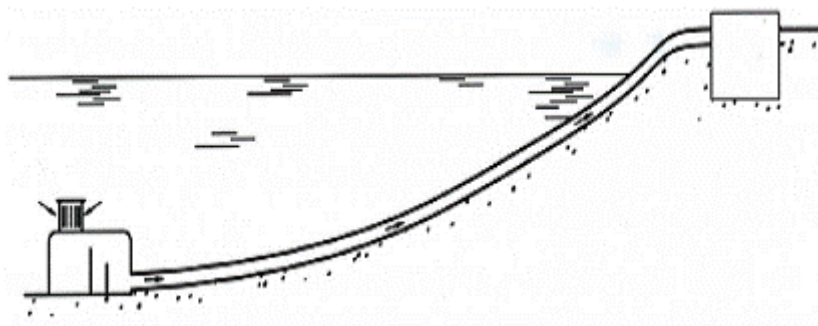


Figura 13. Esquema de captación mediante inmisario de toma abierta. (Fuente: El agua. Desalación, Capítulo 9: Captación de agua. Antonio Ros Moreno, junio 2011)

Las tomas abiertas tienen dos ventajas principales: posibilidad de proporcionar grandes caudales y un bajo mantenimiento. Sin embargo, tienen varios inconvenientes como: mayor coste de instalación, menor calidad del agua, mayor presencia de sólidos en suspensión y mayor impacto ambiental.¹⁵

En este tipo de tomas, las bombas más utilizadas en la cámara de bombeo son las verticales. Al estar en una configuración vertical ahorran bastante espacio en la cámara de captación.

¹⁵ Sistemas de captación en desaladoras de agua de mar (I). Tomas abiertas, Mario de Miguel Bello. Junio 2016.

Además, pueden ser tanto no sumergibles (figura 14) como sumergibles. La principal ventaja de las segundas es que al estar sumergidas no necesitan ser cebadas y empieza a bombear agua de forma inmediata cuando se arranca el motor. Otra ventaja importante es que se elimina los problemas de cavitación, ya que nunca va a estar a una presión menor que la de vapor. El principal inconveniente de estas bombas es su mantenimiento, ya que necesitan ser desmontadas y llevarlas a la superficie, lo cual incrementa su coste.

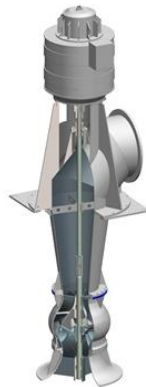


Figura 14. Bomba vertical tipo turbina SJT (Fuente: Sulzer)

3.1.2 Tomas cerradas mediante pozos de captación subterráneos

En cuanto a las tomas cerradas su principal ventaja es la de conseguir un agua de mayor calidad, debido a la acción filtrante del suelo. Esto hace que tenga menos sólidos en suspensión, menor actividad biológica y una temperatura más estable. Sin embargo, habrá que vigilar el contenido de algunas sustancias como el hierro y el manganeso que suelen estar presentes en los pozos.

Las captaciones en toma cerrada suelen reducir los costes del pretratamiento debido al agua de mejor calidad. Sin embargo, los caudales son más irregulares, ya que la filtración no es un proceso inmediato, y una sobreexplotación del pozo puede reducir drásticamente su caudal. Si los caudales son grandes, es necesario separar mucho cada pozo del otro, lo que lo hace inviable.

Las tomas cerradas pueden realizarse de diferentes tipos como, por ejemplo: cámara de captación y cámara de captación con sondeo vertical.

En las cámaras de captación (figura 15) se excava un depósito por debajo de la cota de agua a una cierta distancia del mar para que el agua se vaya filtrando en su recorrido al pozo. Luego el agua es captada con bombas colocadas en la parte superior.

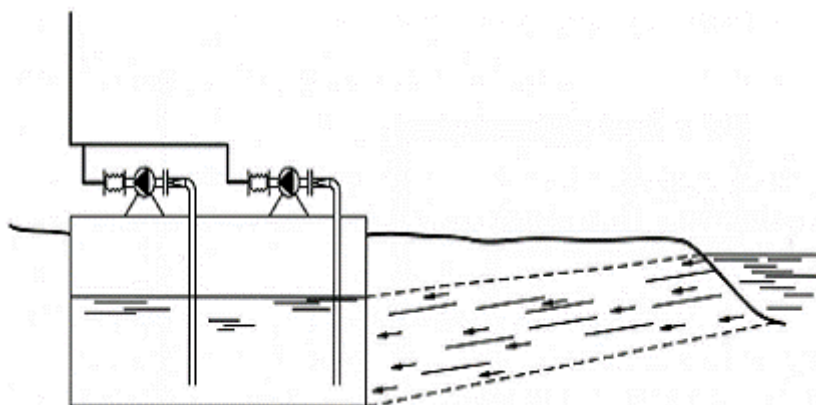


Figura 15. Cámara de captación. (Fuente: El agua. Desalación, Capítulo 8: Captación de agua. Antonio Ros Moreno, junio 2011)

Cuando el caudal requerido es mayor se utilizan cámaras de captación con sondeo vertical (figura 16). En este caso el depósito se coloca sobre una zona del terreno de mayor permeabilidad y mediante unas sondas se comunica esta parte del terreno con la cámara. Este método es más utilizado en zonas más alejadas de la costa.¹⁶

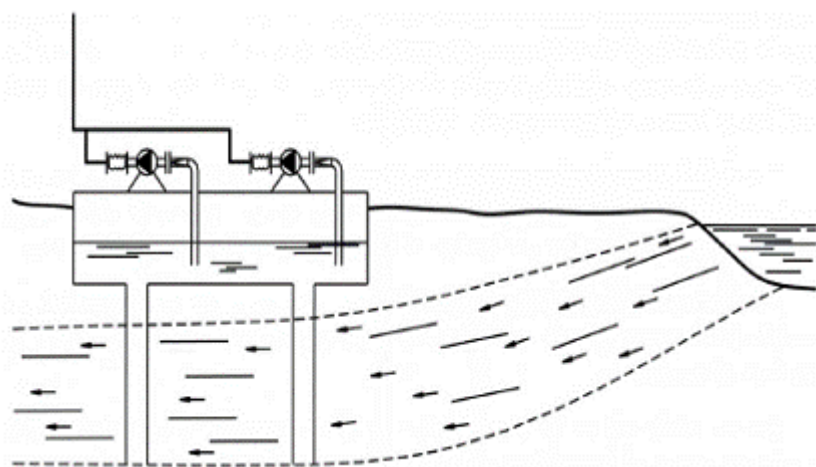


Figura 16. Cámara de captación con sondeos verticales. (Fuente: El agua. Desalación, Capítulo 8: Captación de agua. Antonio Ros Moreno, junio 2011)

Este tipo de toma suelen utilizar más las bombas de tipo vertical sumergibles que las horizontales. Las causas principales son que con las sumergibles se elimina el problema de cebado y cavitación y además se ahorra espacio en el pozo.

¹⁶ El agua. Desalación. Capítulo 8: Captación de agua, Antonio Ros Moreno. Junio 2011

En la tabla 1 se puede muestra un resumen comparativo de las características de las tomas abiertas y cerradas.

Captación cerrada	Captación abierta
• Agua limpia como consecuencia de la acción filtrante del terreno. • Mínima actividad orgánica o biológica. • Baja concentración de oxígeno disuelto. • Temperaturas estables. • 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.	• Contenido en sólidos en suspensión importante y variable. • Importante actividad biológica y presencia de materia orgánica. • Mayor exposición a la contaminación. • Importante concentración de oxígeno disuelto. • Composición química muy variable. • Posible presencia de gran variedad de contaminantes. • Temperaturas más variables.

Tabla 1. Comparación captación abierta y cerrada. (Fuente: Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano. Ministerio de sanidad y política social)

En cuanto al consumo energético de la fase de captación, independientemente de si es toma abierta o cerrada, no es muy elevado. Esto es debido a que a pesar de los grandes caudales que se bombean, no se requiere una gran presión o altura, ya que la planta suele estar cerca de la costa y por lo tanto está a poca altura y distancia de la captación. El consumo de esta etapa suele representar entre un 5% y un 10%¹⁷ de la energía total consumida en la planta, dependiendo de la altura de la planta y las pérdidas de carga.

3.2 Pretratamiento

El objetivo del pretratamiento es modificar las condiciones del agua para que sean las más idóneas para el tratamiento de ósmosis inversa. Con ello se pretende evitar dañar las membranas, reducir el número de limpiezas necesarias, reduciendo así también el tiempo en el que se paran las líneas de ósmosis inversa, todo esto alargará la vida útil de las membranas y mejorará su eficiencia.

¹⁷ Dato obtenido de Nikolay Voutchkov, PE, BCEE. 25th Annual WateReuse Sumposium, y cálculos propios.

El pretratamiento varía de una planta a otra, ya que depende de las condiciones del agua captada y su variabilidad a lo largo del tiempo. Sin embargo, hay ciertas etapas que suelen ser comunes a todas las plantas: coagulación, desinfección, ajuste de pH, reducción de oxidantes, antiincrustante y filtrado.

Durante la fase de pretratamiento además de las bombas que mantienen el caudal de agua, podrá haber otras bombas para suministrar los diferentes agentes químicos de algunos pretratamientos, sin embargo, estas últimas bombas son pequeñas y su consumo eléctrico es muy bajo.

3.2.1 Coagulación

La coagulación tiene como objetivo reducir los sólidos en suspensión y sustancias coloidales que pueda contener el agua. Para ello se añaden ciertos compuestos químicos al agua que neutralizan la carga de los coloides lo que provoca que se vayan agrupando, formando así microfloculos. Después, se añaden otros compuestos que favorecen su crecimiento formando floculos más grandes que irán sedimentando y se irán retirando.

3.2.2 Desinfección

En la desinfección se persigue reducir la carga biológica ya que la presencia de microorganismos puede dañar las membranas y reducir su eficiencia. Se suelen utilizar compuestos que contengan cloro, uno de los más utilizados es el NaClO .

3.2.3 Ajuste de pH

El ajuste del pH se realiza para evitar que se precipite CaCO_3 en las membranas de la ósmosis inversa, ya que podría dañarlas gravemente. A pesar de que normalmente no es necesario regular el pH, ya que el agua de mar suele tener un pH entre 7.5 y 8.4, se pone esta fase para evitar problemas en caso de variación brusca del pH.

3.2.4 Reducción de oxidantes

Esta etapa se introduce para eliminar los agentes oxidantes que pueda contener el agua como consecuencia de la desinfección, ya que la presencia de estos agentes es perjudicial para las membranas. El compuesto empleado suele ser NaHSO_3 .

3.2.5 Antiincrustantes

La adición de antiincrustantes se realiza para evitar que se precipiten cristales de sal en las membranas, lo que provocaría que se bloqueen y se reduzca su eficiencia.

3.2.6 Filtrado

Antes de que el agua pase por el proceso de ósmosis inversa, atraviesa una serie de filtros para eliminar las partículas en suspensión que hayan podido quedar, que dañarían las membranas. Se usan varios tipos de filtro como: los filtros de anillas, ultrafiltración, filtros de cartuchos, etc.

3.2.6.1 Filtros de anillas

Los filtros de anillas (figura 17) se utilizan para retener las partículas mayores de $200\ \mu\text{m}$. El filtro consiste en un tubo en cuyo interior se encuentran las anillas, el agua pasa hacia el interior pasando por las anillas, donde se quedan retenidas las partículas. La ventaja de estos filtros es que cuando la pérdida llega a cierto valor, alrededor de 5 mca, se limpian automáticamente invirtiendo el flujo de agua.

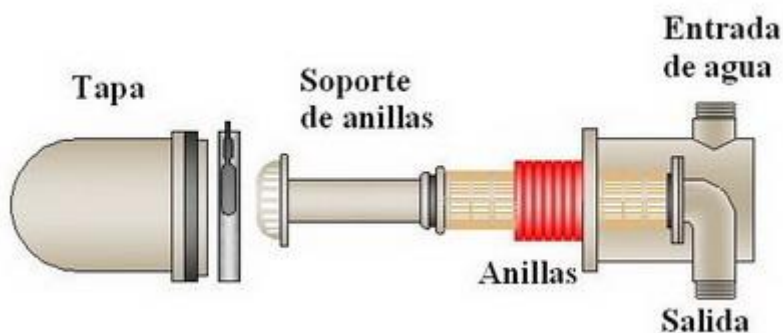


Figura 17. Filtro de anillas. (Fuente: El Regante)

3.2.6.2 Ultrafiltración

La ultrafiltración tiene un tamaño de poro entre 0.1 y $0.01\ \mu\text{m}$.¹⁸ Con esto se consigue eliminar partículas en suspensión, coloidales, virus y proteínas. La ultrafiltración se basa en la tecnología

¹⁸ Equipos de ultrafiltración fabricante WaterQ.

de membranas, que pueden ser tanto orgánicas como inorgánicas, con las que se consigue una gran eficiencia y calidad del agua. Sin embargo, para que funcionen correctamente requieren una limpieza periódica.

En la figura 18 se puede ver un equipo de ultrafiltración



Figura 18. Equipo de ultrafiltración (Fuente: EITGROUP)

3.2.6.3 Filtros de cartucho

Las membranas de la ósmosis inversa requieren que en el agua no existan sustancias en suspensión mayores de 5 μm , ya que de lo contrario se dañarían. Si bien la ultrafiltración ya habría eliminado partículas menores incluso que 5 μm , los filtros de cartucho se colocan justo antes de la ósmosis inversa como medida de protección en el caso de que alguna partícula haya sido arrastrada en parte intermedia. Los filtros de cartucho no requieren ser limpiados ya que cuando ya no filtran de forma correcta son sustituidos. Sin embargo, esto no supone un problema ya que normalmente no van a tener que filtrar muchas partículas ya que están puestos como medida de seguridad y no como un filtro adicional.

En la figura 19 se puede ver un ejemplo de un filtro de cartuchos.



Figura 19. Filtro de cartuchos de la desaladora de Escombreras, (Fuente: Dimasa grupo)

3.3 Ósmosis inversa

La ósmosis es un proceso que se produce de forma natural cuando dos líquidos con diferentes concentraciones están separados por una membrana semipermeable. Se producirá un flujo del líquido de menor concentración a través de la membrana, hasta que se iguale la concentración a ambos lados.

Si en el lado de mayor concentración se aplica una presión mayor a la presión osmótica se invertirá el proceso, originando así un flujo del líquido de mayor concentración hacia el menor, produciéndose así la ósmosis inversa.

En la figura 20 puede verse representado un esquema de funcionamiento de la ósmosis y la ósmosis inversa.

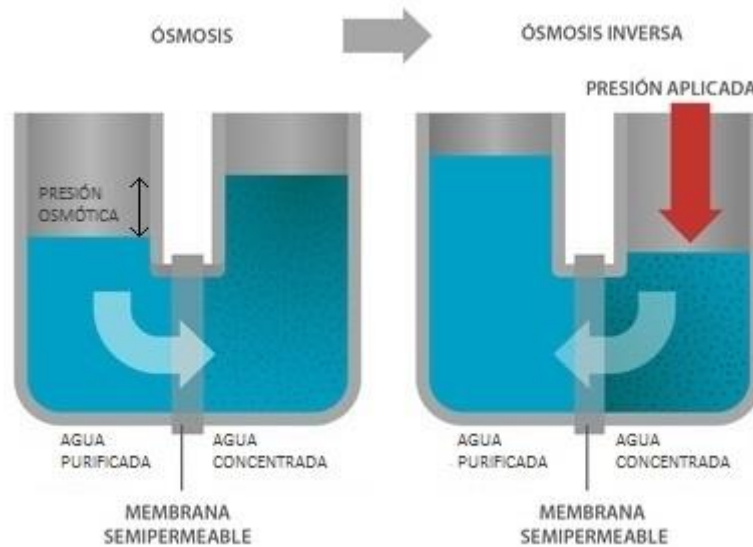


Figura 20. Proceso ósmosis inversa (Fuente: GEDAR Gestión de aguas y residuos)

En cuanto a los módulos de ósmosis inversa existen varios tipos de configuración: plato, tubular, fibra hueca y en espiral. Los empaquetamientos de plato y tubular fueron los primeros que se utilizaron, sin embargo, tienen una densidad de empaquetamiento baja, y es por ello por lo que se abandonaron ya que suponían un mayor coste.

Los siguientes que se utilizaron fueron los empaquetamientos de fibra hueca. Estos consisten en unas fibras de un diámetro muy reducido (unas micras) que se agrupan consiguiendo un gran empaquetamiento. Sin embargo, esto hace que se ensucien con mucha facilidad ya que el agua fluye con mayor dificultad, provocando un rendimiento menor.

Hoy en día se utilizan los arrollamientos en espiral como el representado en la figura 21, debido a que son los más compactos y económicos. Consisten en capas enrolladas en forma de cilindros donde se intercalan las membranas con capas de un espaciador. Con estos módulos las desaladoras consiguen un porcentaje de conversión alrededor del 45%. Esto significa que del total de agua que entra en la planta el 45% se convierte en agua desalada y 55% restante será el agua de rechazo con un gran contenido de sales, la salmuera.

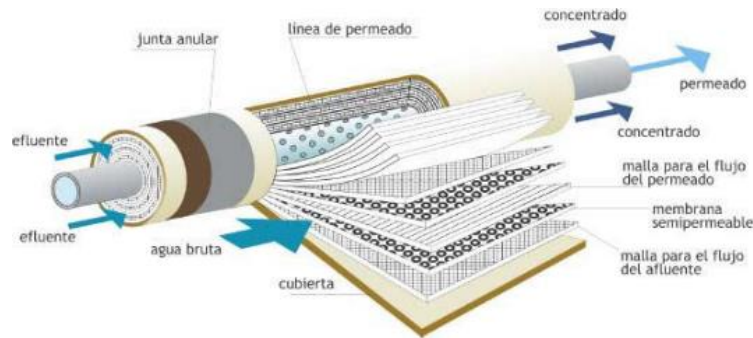


Figura 21. Módulo de ósmosis inversa. (Fuente: ósmosis inversa filtro agua)

Los módulos de ósmosis inversa pueden agruparse de diferentes formas. Los bastidores de una sola etapa son aquellos en los que el agua de rechazo no se vuelve a pasar por otro módulo de ósmosis inversa y va directamente al recuperador de energía. En los módulos multietapa el agua de rechazo de una etapa va a la entrada de la siguiente etapa, como se puede ver en la figura 22. Las configuraciones multietapa se emplean cuando se necesita un porcentaje de conversión superior.

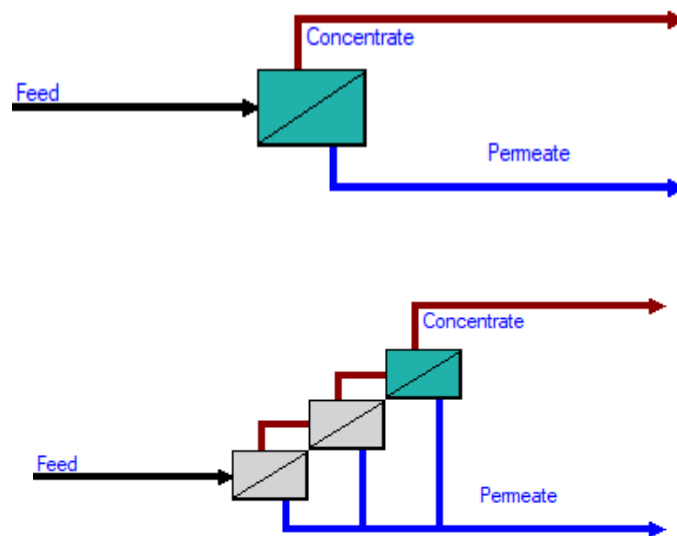


Figura 22. Sistemas de una y tres etapas. (Fuente: software ROSA, Dow Water & Process Solutions)

También se puede utilizar la recirculación del agua de rechazo a la entrada del módulo para aumentar la conversión. Además de estas agrupaciones se pueden utilizar sistemas más complejos, como por ejemplo combinando la recirculación con varias etapas.

En la figura 23 se puede observar la distribución típica de la etapa de ósmosis inversa en una planta desaladora.



Figura 23. Desaladora del Prat, Barcelona. (Fuente: ATLL)

Como se puede observar en la figura anterior el agua entra por el centro de la planta, mediante las tuberías blancas y verdes, hasta las bombas, que son los equipos que se encuentran al final de las tuberías de color verde en la imagen, y recuperadores energéticos, que son los equipos de color amarillo junto a las bombas. Finalmente, el agua pasa por los módulos de ósmosis inversa que se encuentran en los laterales de color azul.

Para que se produzca la ósmosis inversa se necesitan altas presiones. Se suele trabajar con una presión de 70 bar. Si se va aumentando la presión se conseguirá un mayor rendimiento, sin embargo, el coste también aumenta considerablemente debido al consumo eléctrico de las bombas. Por esto lo que se busca es intentar reducir la presión conservando el rendimiento. Para esta etapa se requieren bombas de altas presiones, estas suelen estar colocadas junto al bastidor de ósmosis inversa como se puede ver en la figura anterior. Suelen ser bombas de eje horizontal con rendimientos muy altos ya que trabajan con grandes alturas. Además, existen varios factores que influyen en el rendimiento de la ósmosis inversa. Los principales son la temperatura y el contenido de sales del agua, además de la edad de las membranas.

El aumento de la temperatura en el agua hace que se reduzca su viscosidad y, por lo tanto, aumenta la permeabilidad de la membrana. Esto provoca que la presión de alimentación

necesaria disminuya, 0.5 bar por cada 1°C que aumenta la temperatura del agua. A su vez el flujo de permeado aumenta, se considera que aumenta un 3% por cada 1°C de temperatura que aumenta el agua. Estos dos efectos son positivos y ayudan a reducir los costes de la ósmosis inversa. Sin embargo, existe una contrapartida a aumentar la temperatura del agua, y es que por cada 1°C que aumenta, el rechazo de sales disminuye un 6% aproximadamente, es decir, el agua producto aumenta su salinidad, lo que supone una menor calidad del agua.¹⁹

Para poder observar como varía la presión y la salinidad según la temperatura del agua se utilizarán los gráficos representados en las figuras 24 y 25.

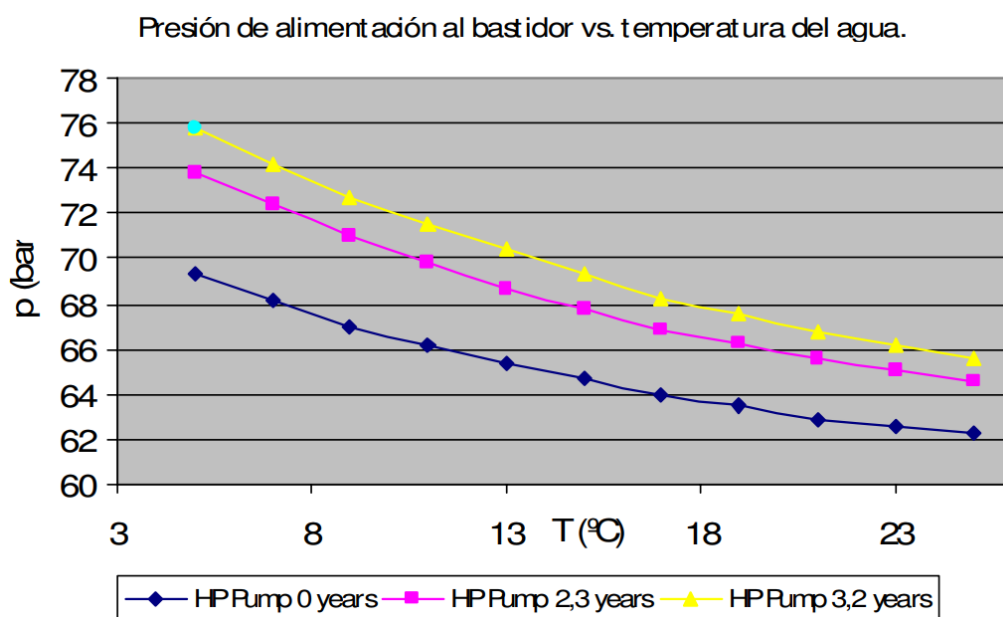


Figura 24. Gráfico presión de alimentación vs. Temperatura del agua. (Fuente: Befesa Agua)

¹⁹ Análisis de Configuraciones del Proceso O.I. en Desalación. Befesa Agua.

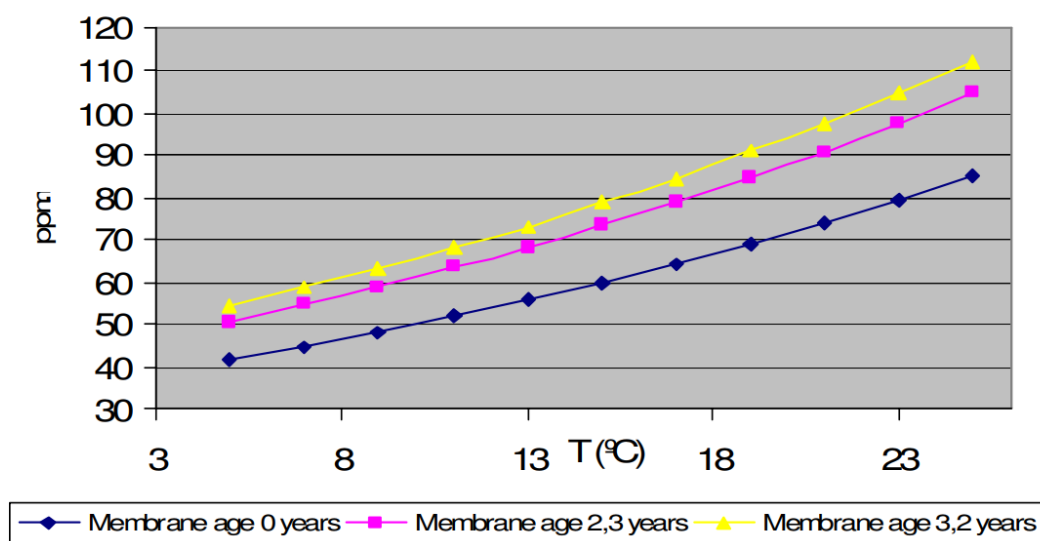


Figura 25. Gráfico concentración sales vs. Temperatura del agua. (Fuente: Befesa Agua)

En estos gráficos anteriores se puede ver cómo según aumenta la temperatura del agua de entrada va disminuyendo la presión necesaria a la vez que aumenta la salinidad. Por lo tanto, habrá que controlar la variación de temperatura a lo largo del año para prever como se va a comportar la planta.

Además, se pueden ver las diferencias de presión y concentración de sales que se producen según la membrana se va deteriorando a lo largo de los años. Se observa como en las mismas condiciones puede haber una diferencia de entre 4 y 7 bar entre una membrana nueva y una con 3.2 años. En la concentración de sales ocurre lo mismo con una variación de entre 15 y 25 ppm (mg/l) entre las dos membranas.

Por otro lado, está el efecto de la salinidad del agua de alimentación. Al aumentar la concentración de sales del agua de alimentación la presión osmótica aumenta y por lo tanto es necesario incrementar la presión a la entrada de la ósmosis inversa para mantener el caudal, esta variación se puede observar en la figura 26. Además, la concentración de sales del agua producto aumentará, como se puede ver en la figura 27, disminuyendo por tanto su calidad.²⁰

²⁰ Análisis de Configuraciones del Proceso O.I. en Desalación. Befesa Agua.

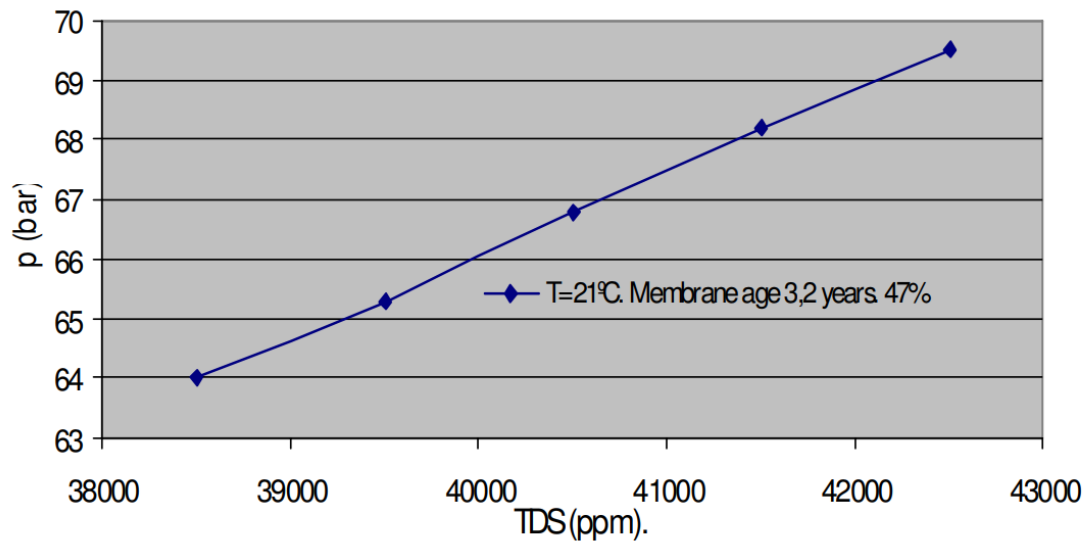


Figura 26. Gráfico presión de alimentación vs. Salinidad de alimentación. (Fuente: Befesa Agua)

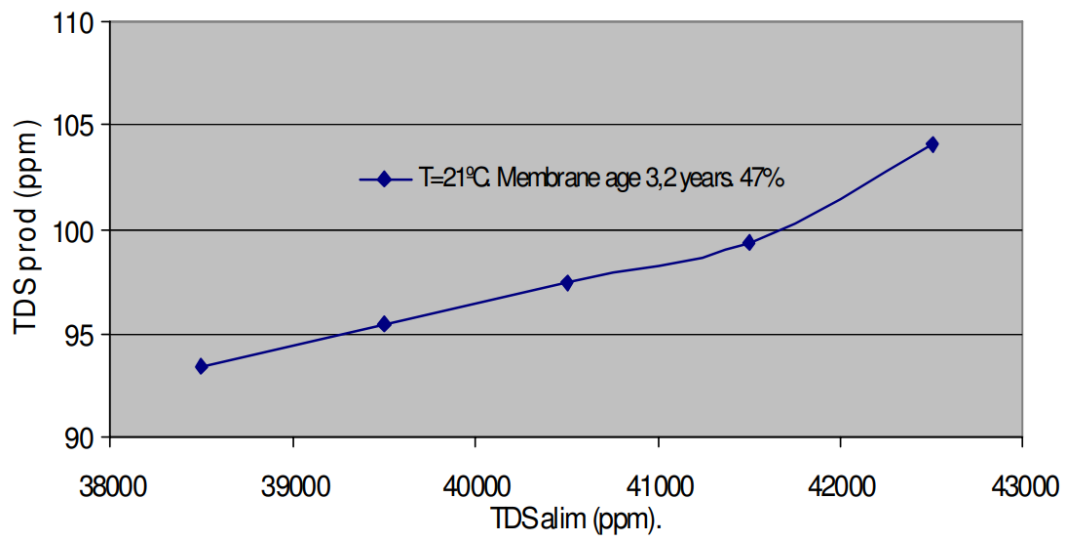


Figura 27. Gráfico presión de alimentación vs. Salinidad de alimentación. (Fuente: Befesa Agua)

En los gráficos anteriores se observa cómo según va aumentando la salinidad de entrada aumenta tanto la presión de entrada necesaria como la concentración de sales del agua producto. Por lo tanto, será importante vigilar la concentración de sales al igual que la temperatura.

3.4 Vertidos

El resultado de la ósmosis inversa es por un lado el agua producto que sale sin presión y el vertido que es la salmuera que sale a alta presión. Esta alta presión de la salmuera se utilizará para recuperar energía. En el caso de la planta que se proyectará, la conversión de esta etapa será del 45%, por lo que de cada 100 litros se obtienen 45 litros de agua dulce y 55 litros de salmuera. En la planta se trabajará con un caudal de 165 000 m³/día de agua desalada, y por lo tanto se tendrán 201 666.667 m³/día de salmuera. Si se tiene en cuenta que con los módulos de ósmosis inversa se obtendrá un agua producto con una salinidad de 200 g/m³ la concentración de la salmuera será la siguiente.

$$Q_a \cdot C_a = Q_p \cdot C_p + Q_v \cdot C_v$$

Q_a: caudal de alimentación

C_a: concentración de alimentación

Q_p: caudal del agua producto

C_p: concentración del agua producto

Q_v: caudal del vertido

C_v: concentración del vertido

$$366\,666.67 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot 37\,000 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 165\,000 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} + 201\,666.67 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot C_v \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$C_v = 67\,109.09 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Por lo tanto, al día se vierten al mar 201 666.67 m³ de salmuera con una concentración de 67 109.09 g/m³ lo que supone 1.8 veces la concentración del agua de mar. Con esta concentración, a presión ambiente y a una temperatura mínima de 15°C corresponde una densidad de la salmuera de 1052 kg/m³ siguiendo la ecuación de la UNESCO. La densidad del agua de mar es 1027 kg/m³, por lo que existe una diferencia de densidad notable, que puede provocar que la salmuera se acumule en el fondo del mar. Por ello en el vertido de la salmuera se utilizan sistemas para maximizar la dilución.

Existen dos tipos de sistemas para la dilución de la salmuera. El primero es la descarga mediante difusores en el emisario y el otro sistema se basa en una dilución previa con agua de mar.

El sistema más utilizado es el de emisarios submarinos con difusores debido a su mayor simplicidad y menor coste. En este sistema la salmuera es impulsada por gravedad

aprovechando la diferencia de cotas entre la planta y el mar, lo cual evita tener que introducir más bombas. En la figura 28 se puede ver un esquema de un difusor de salmuera.

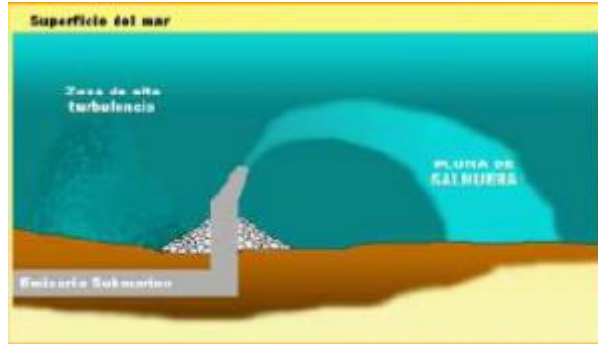


Figura 28. Emisario con difusor. (Fuente: Aitor Díaz)

En el tramo final del emisario se colocan unos difusores separados unos de otros, que ayudan a diluir la salmuera. Estos difusores se colocan con una cierta inclinación para favorecer la dilución. La velocidad de salida de los difusores está entre 2.5 y 7 m/s dependiendo de la altura de la planta.²¹

El otro sistema de dilución de salmuera es el de la mezcla previa. Consiste en mezclar la salmuera con agua de mar en una proporción de 1 a 4. Después es vertida la mezcla al mar provocando un impacto mucho menor que en el sistema anterior. Este sistema se puede ver en la figura 29.

²¹ ¹³ Dilución de salmuera en agua de mar: medición y estudio en una planta piloto dimensionalizada. Modelización mediante un sistema acoplado de ecuaciones diferenciales. Jesús Ildefonso Díaz, Departamento de Matemática Aplicada, Facultad de Matemáticas, Universidad Complutense de Madrid. Juan María Sánchez, Ecoagua Ingenieros. Noemí Sánchez, Ecoagua Ingenieros.

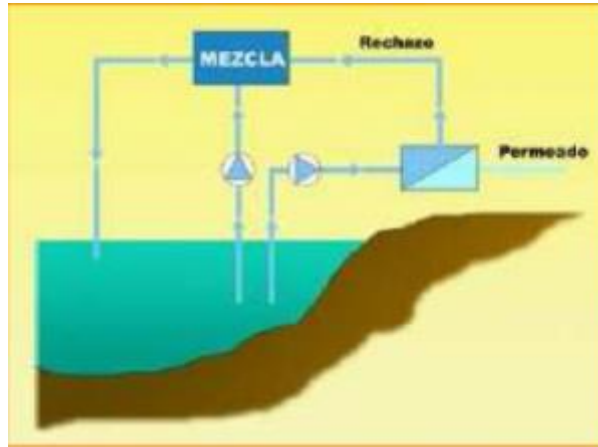


Figura 29. Dilución por mezcla mediante bomba. (Fuente: Aitor Díaz)

La mezcla se realiza en un depósito en el que se bombea el agua de mar y se lleva la salmuera proveniente del recuperador. El inconveniente de este método es el consumo energético de las bombas, ya que requiere bombear un caudal 4 veces mayor al de la salmuera. En el caso de la desaladora que se plantea, la potencia necesaria suponiendo una altura de 10 m sería la siguiente.

$$P = \rho_a \cdot 4Q_s \cdot g \cdot H$$

P: potencia de bombeo

ρ_a : densidad del agua de mar

Q_s : caudal de salmuera

g: aceleración de la gravedad

H: altura de la bomba

$$P = 1027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4 \cdot 2.33 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10 \text{ m} = 940.63 \text{ kW}$$

Esta bomba implicaría un incremento en el consumo eléctrico notable y una mayor complejidad de la instalación, que encarecería el agua ligeramente. Sin embargo, el impacto medioambiental de la salmuera se reduce de forma significativa. La concentración del vertido sería la siguiente.

$$5Q_s \cdot C_v = Q_s \cdot C_s + 4Q_s \cdot C_a$$

Q_s : caudal del vertido

C_v concentración del vertido

C_s concentración de salmuera

C_a : concentración del agua de mar

$$5 \cdot 2.33 \frac{m^3}{s} \cdot C_v = 2.33 \frac{m^3}{s} \cdot 67\,109.09 \frac{g}{m^3} + 4 \cdot 2.33 \frac{m^3}{s} \cdot 37\,000 \frac{g}{m^3}$$

$$C_v = 43\,021.82 \frac{g}{m^3}$$

Al realizar esta mezcla la diferencia de concentraciones entre el vertido y el agua de mar se reduce a tan solo 6 PSU²². Y si se calcula la densidad para esta concentración, una temperatura de 15°C y presión atmosférica se obtiene 1032.2 kg/m³. Ahora la diferencia será de 5.2 kg/m³ lo cual facilitará la dilución y tendrá el medio marino se verá menos afectado.

Recientemente se han llevado a cabo estudios sobre un método de mezcla que elimina la necesidad de utilizar bombas. El sistema se basa en unos difusores que aprovechan el efecto Venturi para realizar la mezcla.^{23 24}

El efecto Venturi se da cuando en una tubería se reduce su sección de paso, esto produce un aumento de la velocidad del fluido y una reducción de la presión, esto se puede apreciar en la figura 30.

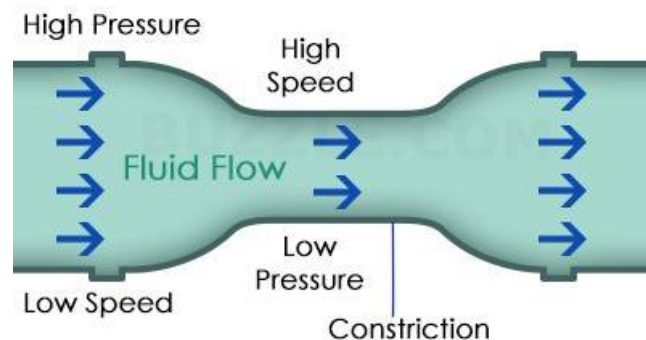


Figura 30. Efecto Venturi (Fuente: Buzzle.com)

²² La unidad PSU (Practical Salinity Units) se estableció como medida internacional para la medir la salinidad. Es una medida adimensional, 1 PSU equivale 1 gramo de sal por litro.

²³ Proyecto Venturi, Instituto Tecnológico de Canarias. Julio 2012.

²⁴ Efecto Venturi, María Sánchez Galán. Noviembre 2015.

El difusor basado en el efecto Venturi aprovecha la caída de presión provocada por el estrechamiento de la sección para succionar el agua de alrededor, consiguiendo así mezclar la salmuera con el agua de mar. Estos difusores requieren una velocidad de salida bastante alta, alrededor de los 11 m/s, para que la diferencia de presión sea la suficiente para succionar el caudal necesario. Con este sistema se consigue una mezcla de salmuera con el agua de mar con una relación de 1 a 4.

Se puede ver el esquema de funcionamiento en la figura 31.

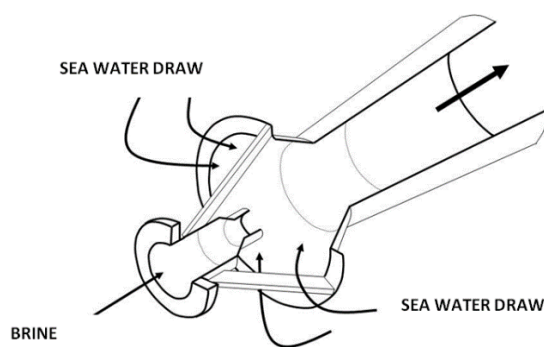


Figura 31. Difusor Venturi (Fuente: MIKE, DHI)

El prototipo del dispositivo se probó en la planta desaladora Maspalomas II en las islas Canarias (figura 32). Se realizó un ensayo para comprobar la dilución de la salmuera. Primero, con el difusor que tenía la planta instalado, se replantaron las praderas submarinas en la zona alrededor de la pluma de salmuera. Al cabo de siete meses desaparecieron todas las praderas plantadas. Después se instaló el difusor Venturi y se volvió a replantar la zona. El resultado fue que todas las praderas sobrevivieron y se detectaron nuevos crecimientos.²⁵

²⁵ Efecto Venturi, María Sánchez Galán. Noviembre 2015.



Figura 32. Difusor Venturi de Maspalomas II. (Fuente: Instituto tecnológico de Canarias)

El difusor Venturi demostró conseguir una dilución mayor a los dispositivos convencionales. La salinidad registrada en zona próxima a los difusores fue de 37.5 PSU, cuando antes con los difusores convencionales era de 46 PSU.²⁶ Este dispositivo ha ayudado a reducir considerablemente la concentración de salinidad del agua, además es un dispositivo que no supone una gran inversión económica, cuya instalación es sencilla y se puede colocar tanto en plantas de nueva construcción como plantas ya construidas con difusores convencionales.

²⁶ Proyecto Venturi, Instituto Tecnológico de Canarias. Julio 2012.

4. Descripción de bombas y recuperadores

4.1 Tipos de bombas

Las bombas se pueden agrupar en dos grandes grupos: bombas de desplazamiento positivo y las bombas rotodinámicas.

Las bombas de desplazamiento positivo o volumétricas se basan en el principio de desplazamiento positivo. Este principio establece que el caudal que atraviesa una máquina hidráulica volumétrica es función únicamente de la variación volumétrica de la cámara, suponiendo el fluido incompresible y ausencia de fugas. Este tipo de bombas están indicadas cuando se requieren presiones muy altas y caudales bajos. Este tipo de bombas tiene un inconveniente, la pulsación de caudal, esto quiere decir que el caudal que da la bomba no es constante, sino que presenta un caudal diferente en función de la posición del órgano intercambiador de energía. La pulsación de caudal depende del tipo de bombas, se puede ver un ejemplo en la figura 33.

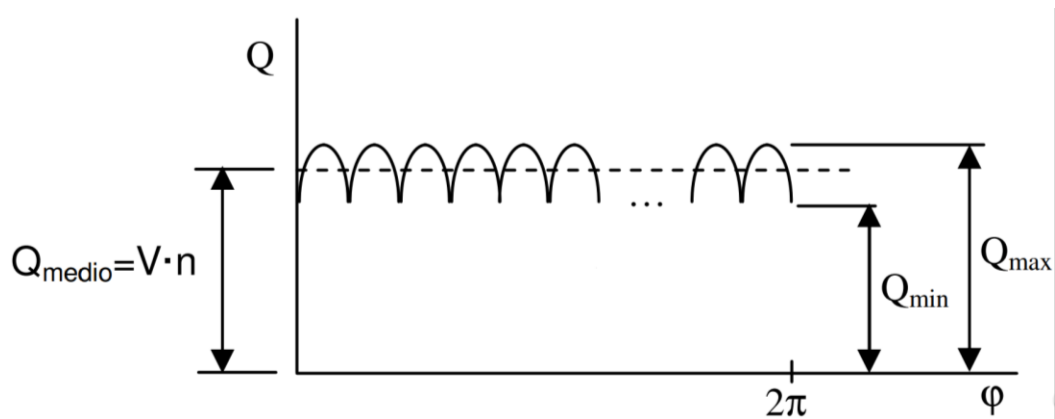


Figura 33. Pulsación de caudal de una bomba volumétrica. (Fuente: Apuntes turbomáquinas, ICAI)

Este tipo de bombas se usan en numerosas aplicaciones como: prensas, puentes elevadizos, grúas y diversos circuitos hidráulicos. Sin embargo, en las plantas desaladoras no se utilizan debido principalmente a la pulsación de caudal.

Por otra parte, las bombas rotodinámicas se basan en la variación del momento cinético del fluido para intercambiar la energía, se suponen fluidos con densidad constante. La parte fundamental de estas bombas es el rodete, es la parte encargada de realizar el intercambio de energía. El rodete se puede clasificar:

- Según la dirección de flujo en el rodete:

- Rodete radial: el flujo de fluido va desde el centro del rodete hacia fuera en dirección radial.



Figura 34. Rodete radial (Fuente: Shangai Pacific Pump Manufacture)

- Rodete axial: el fluido va en la dirección del eje del rodete.

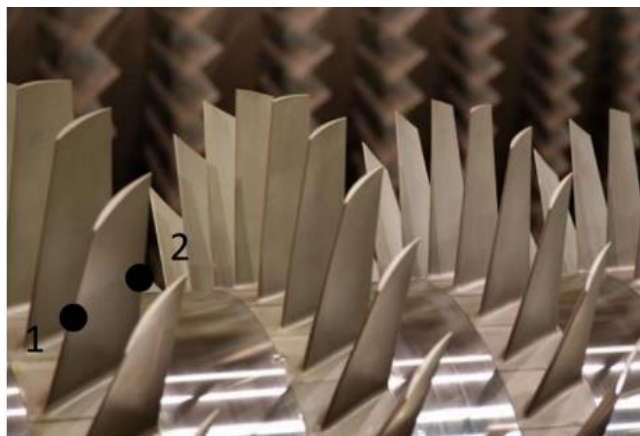


Figura 35. Rodete axial (Fuente: Sulzer)

- Rodete diagonal: el fluido se mueve en la dirección radial y axial del rodete.

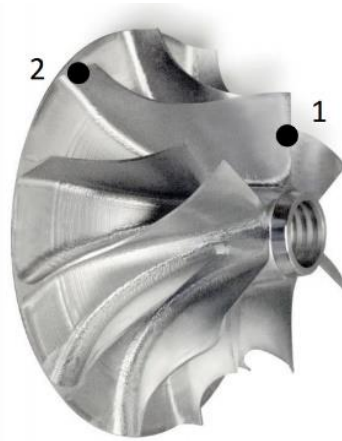


Figura 36. Rodete diagonal (Fuente: Somani Engineering Enterprise)

- Otras clasificaciones del rodete son según la aspiración:
 - Simple aspiración. Este tipo de rodete toma el fluido únicamente por un lado de este.



Figura 37. Rodete de simple aspiración (Fuente: Indiamart)

- Doble aspiración. Este tipo de rodete permite aspirar el fluido por ambos lados, consiguiendo así un mayor caudal.



Figura 38. Rodete de doble aspiración (Fuente: Defu pumps)

El rodete condicionará el funcionamiento de la bomba y su uso. Hay un parámetro que sirve para clasificar y comparar bombas, es el numero específico de revoluciones n_q y n_p .

$$n_q = n * Q^{\frac{1}{2}} * H^{-\frac{3}{4}} \quad n_p = n * P^{\frac{1}{2}} * H^{-\frac{5}{4}}$$

n : revoluciones, Q : caudal, H : altura de la bomba, P : potencia

El significado de n_q es: la velocidad a la que debe girar la bomba para obtener un caudal y altura unitarios. De la misma forma n_p es la velocidad a la que debe girar la bomba para obtener una potencia y altura unitarias. Con este parámetro se pueden clasificar las bombas en:

- Lentas, n_q bajos, aquellas bombas que dan caudales bajos y grandes alturas. Son las bombas con rodete radial.
- Rápidas, n_q altos, aquellas bombas que dan caudales altos y alturas pequeñas. Son las bombas con rodete diagonales y axiales.

Independientemente del tipo de bomba para trabajar con ellas se utilizan las curvas altura-caudal. Se representa la altura en el eje “y” y el caudal en el eje “x”, manteniendo siempre las revoluciones constantes. Con esta curva se pueden conocer todos los puntos de funcionamiento de una bomba. Adicionalmente se puede representar la potencia de funcionamiento y el rendimiento para saber cuál será el punto óptimo de funcionamiento.

Un ejemplo de curva característica de una bomba se representa en la figura 39.

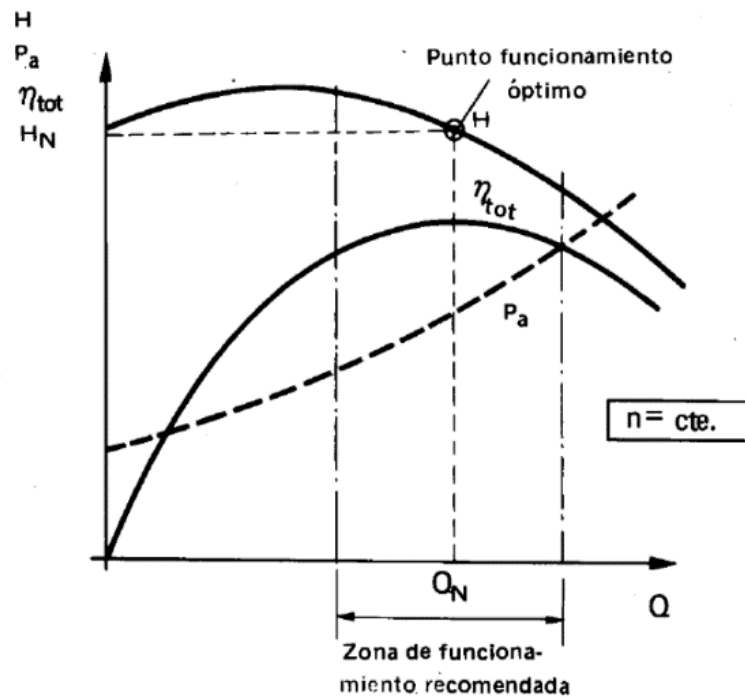


Figura 39. Curva característica de una bomba (Fuente: apuntes turbomáquinas, ICAI)

Si una instalación necesita unos valores determinados de altura y caudal, se pueden utilizar bombas en serie o paralelo, además de buscar otro tipo de bomba. La colocación de bombas en serie permite conseguir mayor altura al mismo caudal que con una sola bomba. Por otro lado, si se colocan varias bombas en paralelo se obtendrá un caudal mayor con la misma altura. En las figuras 40 y 41 se representan las curvas de funcionamiento de una configuración en serie y en paralelo respectivamente.

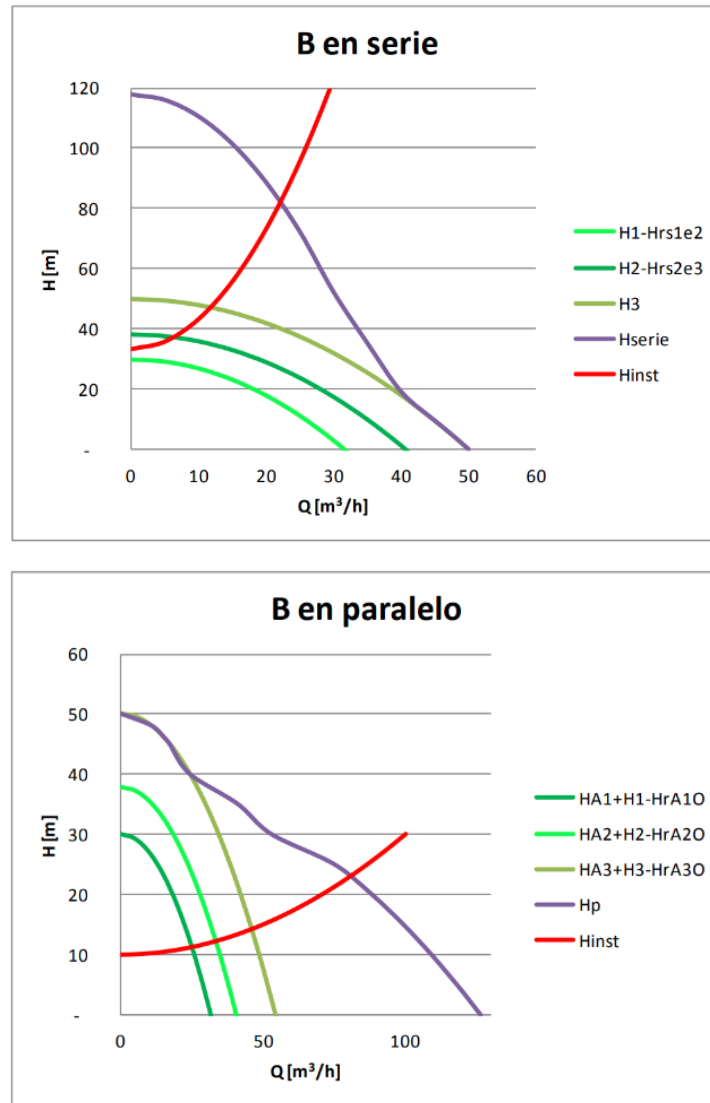


Figura 40 y 41. Curvas de funcionamiento de tres bombas en serie y paralelo. (Fuente: apuntes turbomáquinas, ICAI)

Otra forma de obtener puntos de funcionamiento diferentes es mediante el rebajado del diámetro exterior del rodete. En la figura 42 se puede observar las diferentes curvas de funcionamiento de una bomba según se va reduciendo el diámetro del rodete desde 439.4mm hasta 342.9mm.

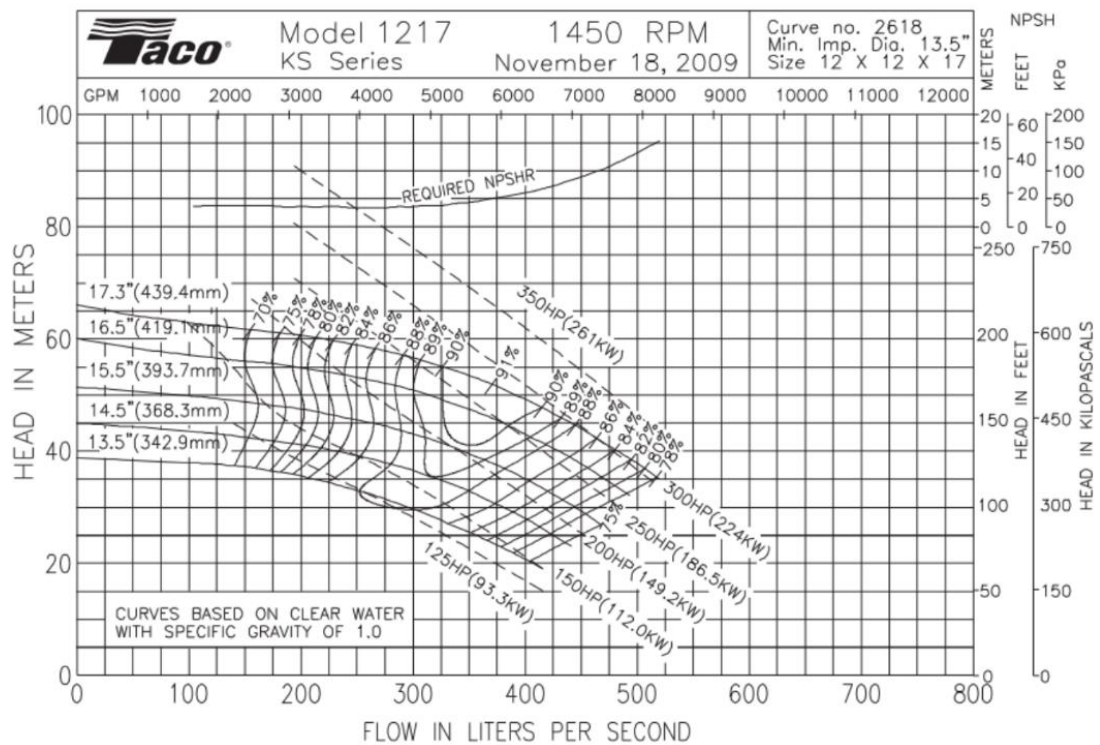


Figura 42. Curvas características según el diámetro del rodete. (Fuente: Taco)

Sin embargo, los fabricantes no dan las curvas características de las bombas, si no que dan áreas de funcionamiento, como las mostradas en la figura 43. Esto es debido a que una misma bomba puede trabajar en diferentes curvas según el rodete empleado.

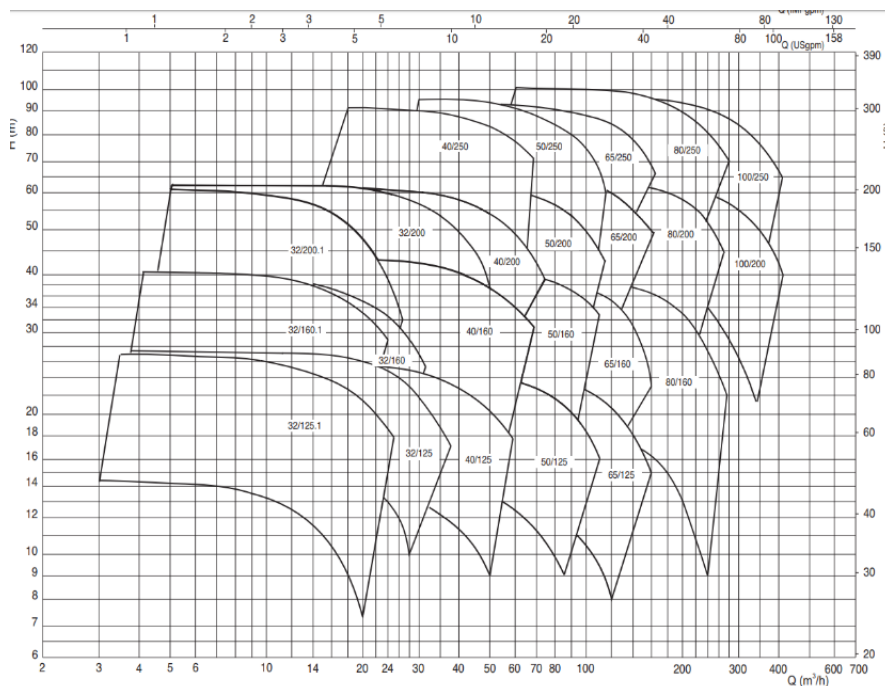


Figura 43. Catálogo bombas. (Fuente: KDN Saci pumps)

4.2 Tipos de recuperadores energéticos

Tras el proceso de ósmosis inversa el agua desalada obtenida no tiene presión. Sin embargo, la salmuera sale con alta presión, ya que en los módulos de las membranas de ósmosis inversa la presión se conserva salvo una pequeña parte que se pierde en forma de pérdidas de carga. Es por ello por lo que los sistemas de recuperación de energía se encuentran a continuación de los módulos de ósmosis inversa.

La recuperación de energía es una parte fundamental de las desaladoras ya que es lo que hace que la planta sea viable económicamente y reduce su consumo eléctrico.

Según se han ido desarrollando las plantas desaladoras, se han ido utilizando diferentes equipos para la recuperación de energía. Al principio se utilizaban turbinas, empezando por la Francis. Alrededor de 10 años más tarde se utilizaba la turbina Pelton como sistema recuperador de energía. A partir de 2005 se empezaron a utilizar las cámaras isobáricas en las desaladoras. Hoy en día, en las nuevas plantas que se construyen se utilizan cámaras de intercambio de presión ya que tienen un mayor rendimiento.

A continuación, se realizará una descripción de los distintos tipos de recuperadores que se han venido utilizando en las plantas desaladoras.

4.2.1 Turbina Francis

La turbina Francis tiene una geometría parecida a la de una bomba radial y funciona de forma inversa al de una bomba. La turbina Francis es de tipo radial y de álabes fijos, en las figuras 44 y 45 puede ver la carcasa de una turbina Francis y su rodete respectivamente. Debido a esta geometría trabaja con grandes alturas y pequeños caudales.



Figura 44 y 45. Turbina Francis (Fuente: Hydrotu Engineering Co.) y su rodete (Fuente: Walter).

Las turbinas Francis cuentan con el distribuidor Fink que permite orientar el flujo de agua de entrada regulando también el caudal. Con esto, la turbina puede alcanzar rendimientos altos, pero solo para caudales cercanos al nominal. Para caudales más bajos del nominal, a pesar del distribuidor Fink, el rendimiento de la turbina cae considerablemente. A continuación, se muestra el ensayo de una turbina Francis trabajando con diferentes caudales (figura 46).

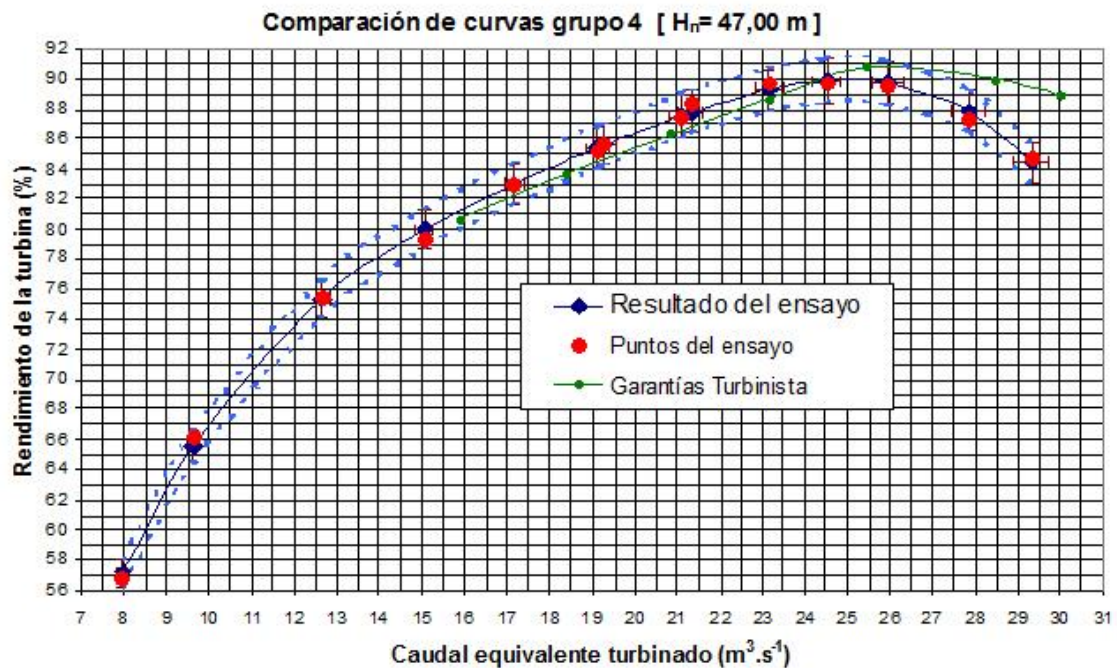


Figura 46. Ensayo turbina Francis (Fuente: ASIng Servicios de Ingeniería)

En la gráfica se ve claramente como el rendimiento máximo se alcanza en una ventana pequeña de funcionamiento, aproximadamente el 90% del caudal nominal. Además, se observa que según el punto de trabajo se aleja de ese caudal, el rendimiento va cayendo de forma cada vez más pronunciada. Esta fue una de las principales razones por las que se cambió a turbinas Pelton en las plantas desaladoras.

Un ejemplo de planta desaladora con turbinas Francis como recuperador energético es la planta de San Antonio de Portmany, Ibiza. En esta planta las turbinas tienen un rendimiento del 82% y consigue un consumo de 3.786 kWh/m^3 en el bombeo de alta presión en la etapa de ósmosis inversa.²⁷

4.2.2 Turbina Pelton

La turbina Pelton tiene una geometría y un funcionamiento diferente a la Francis. La principal diferencia entre una turbina Francis y una Pelton, es la existencia de inyector. Los inyectores son los encargados de transformar la energía de presión en energía cinética. El chorro de agua generado por los inyectores incide sobre las cucharas del rodete, haciéndolo girar y consiguiendo así la energía mediante un alternador.

²⁷ Mejora de la eficiencia energética en la reforma de plantas desaladoras. Bartolomé Marón. II Seminario internacional de desalación en Antofagasta.

En la figura 47 se puede ver el rodete y los inyectores de una turbina Pelton.

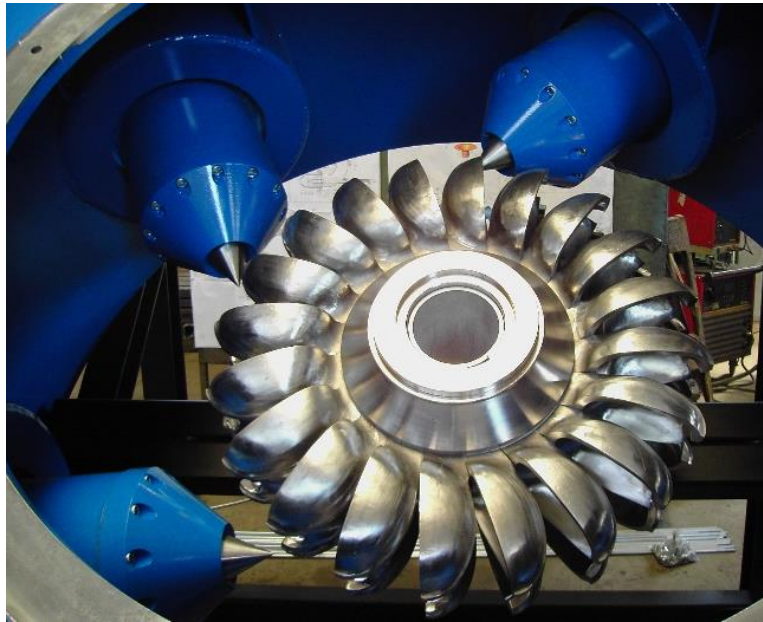


Figura 47. Turbina Pelton (Fuente: ESPE Group Preofessione Energía)

Este tipo de turbina trabaja con grandes alturas y pequeños caudales. Además, los inyectores cuentan con una aguja que permite variar la sección de salida del agua y por lo tanto regular así el caudal. La ventaja de esta turbina es que tiene una curva de funcionamiento mucho más plana que la Francis. Esto quiere decir que el rendimiento se mantiene prácticamente constante ante la variación de caudal, como se puede observar en la figura 48.

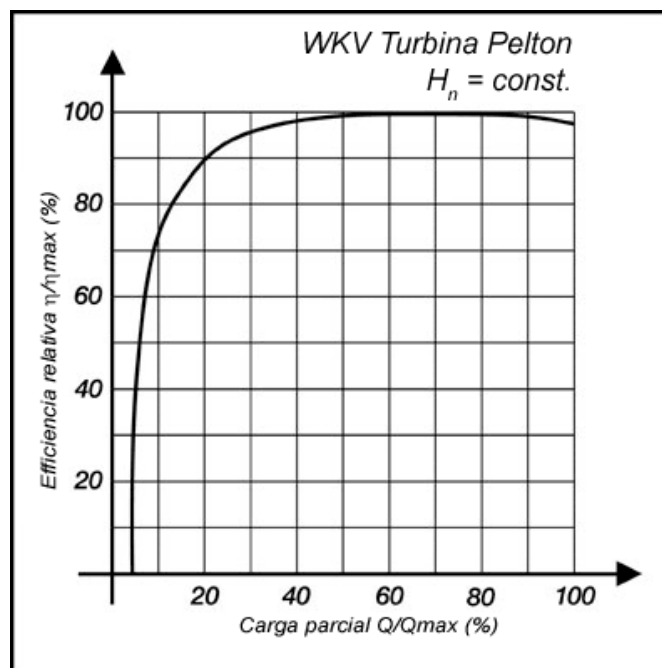


Figura 48. Ensayo turbina Pelton (Fuente: WKV, Wasserkraft Volk AG)

En la gráfica se puede ver que a partir del 30% del caudal nominal, el rendimiento se mantiene prácticamente constante hasta el caudal nominal. El rendimiento máximo de las Pelton ronda el 90%.

La planta nombrada anteriormente de San Antonio de Portmany, Ibiza, contaba con una turbina Pelton con un 88% de rendimiento. Se calculó cuanto consumiría la planta utilizando únicamente turbinas Pelton y se estimó en 3.166 kWh/m³. Esto supone un ahorro de 0.62 kWh/m³ respecto a las turbinas Francis.

Otros ejemplos de plantas desaladoras con turbinas Pelton son las plantas de Tordera e Ibiza capital, con unos rendimientos del 88% y 86%, y consumos de 3.068 kWh/m³ y 3.422 kWh/m³ respectivamente en la etapa de bombeo de alta presión para la ósmosis inversa.²⁸

4.2.3 Cámara de intercambio de presión

Finalmente, están las cámaras de intercambio de presión. Estos tipos de recuperadores han desplazado a las turbinas debido a su gran rendimiento de hasta el 98% de recuperación.²⁹ Estos

²⁸ Mejora de la eficiencia energética en la reforma de plantas desaladoras. Bartolomé Marón. II Seminario internacional de desalación en Antofagasta.

²⁹ Eficiencia del PX Pressure Exchanger, Energy recovery.

equipos se basan en el principio de desplazamiento positivo. Existen dos tipos de cámaras de intercambio de presión: por desplazamiento y por rotación.

Las cámaras de intercambio de presión por desplazamiento se basan en unos cilindros con una serie de válvulas (figura 49). La salmuera entra por un lado del equipo y empuja el pistón transmitiéndole la presión al agua de entrada. Luego se cambian las válvulas y el agua de entrada empuja el pistón provocando la salida de la salmuera sin presión.



Figura 49. Recuperador de energía DWEER (Fuente: Flowserve)

Por otro lado, están las cámaras de intercambio de presión por rotación (figura 50). Tienen un funcionamiento parecido a las anteriores, pero en vez de utilizar válvulas se utiliza la geometría de la cámara combinada con un movimiento de rotación. Por un lado, del dispositivo entra la salmuera y transmite la presión al agua de entrada por contacto directo. Luego, cuando la parte interna ha girado el agua de entrada expulsa la salmuera sin presión. Este dispositivo no necesita de ningún motor eléctrico que lo haga girar, ya que la presión de la salmuera combinada con la geometría es lo que lo hace girar.

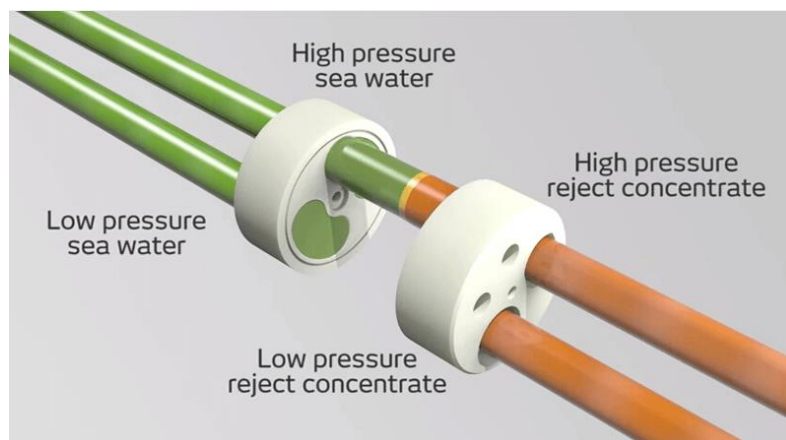


Figura 50. PX Pressure Exchanger (Fuente: Energy Recovery)

En la figura 51 se muestra un esquema de cómo suele ser la instalación de ósmosis inversa con las cámaras de intercambio de presión.

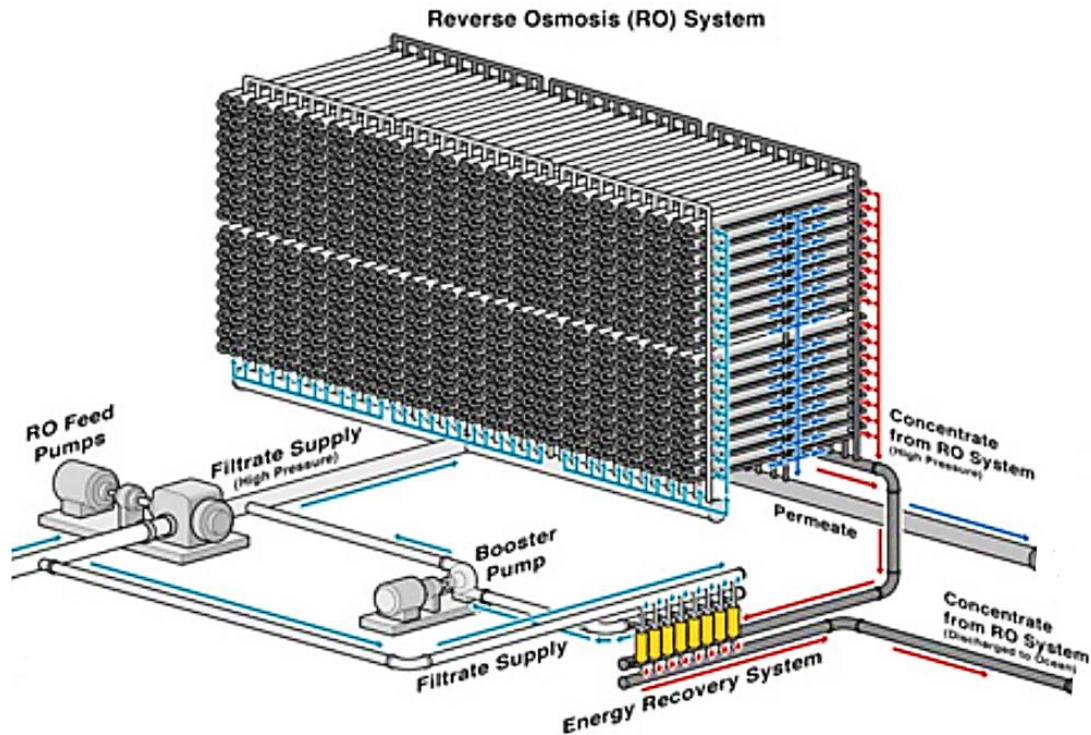


Figura 51. Instalación de ósmosis inversa con cámaras de intercambio de presión. (Fuente: Considerations for Selection of Seawater Filtration Pretreatment System, Nikolay Voutchkov)

En la figura se puede ver como la introducción de estos equipos no supone una instalación complicada. Estos equipos requieren desviar una parte del caudal total hacia las cámaras e incluir una bomba booster que eleve la presión ligeramente hasta la presión de la ósmosis inversa. Por ello estos equipos se pueden introducir en plantas más antiguas para mejorar su consumo.

En las plantas nombradas anteriormente de San Antonio de Portman, Ibiza y Tordera y se realizó una mejora de las plantas sustituyendo los sistemas de recuperación de energía por cámaras de intercambio de presión. En la figura 52 se puede ver una comparación de los consumos de la etapa de bombeo de alta presión para las tres plantas en función del tipo de recuperador empleado.

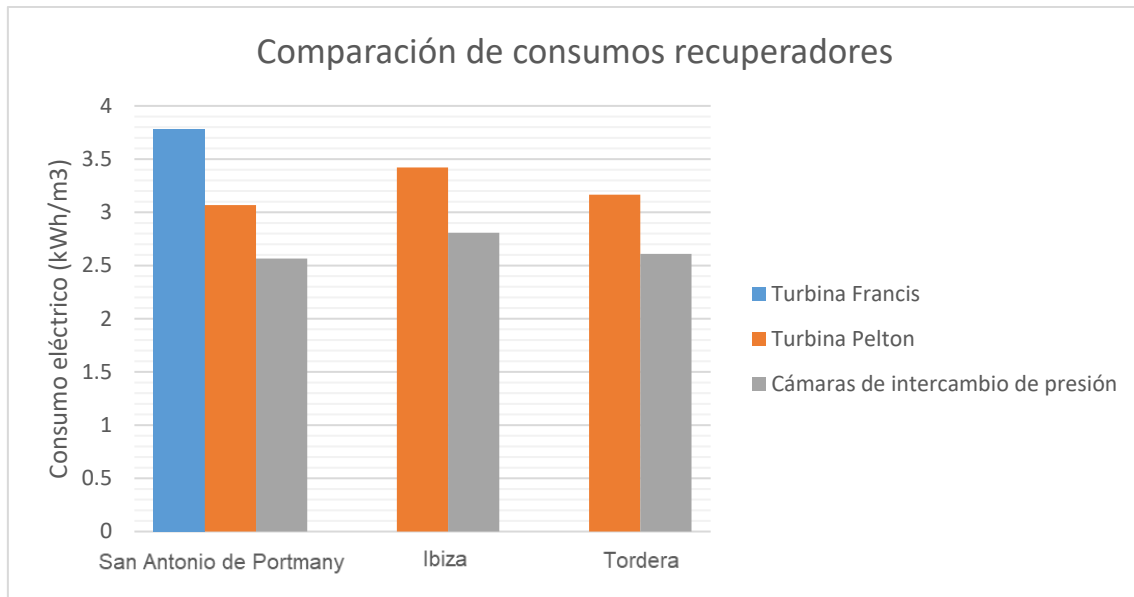


Figura 52. Comparación de consumos en la etapa de ósmosis inversa en función del recuperador. (Fuente Mejora de la eficiencia energética en la reforma de plantas desaladoras. Bartolomé Marón. II Seminario internacional de desalación en Antofagasta. Elaboración propia)

Se puede observar en figura anterior que el ahorro conseguido es claro al utilizar las cámaras de intercambio de presión en lugar de las turbinas. Respecto a las turbinas Pelton las cámaras de intercambio de presión consiguen un ahorro de entre 0.5 kWh/m³ y 0.6 kWh/m³. Y comparadas con las turbinas Francis, el ahorro es de 1.1 kWh/m³.

5. Dimensionamiento de los equipos de consumo eléctrico de una planta desaladora en Escombreras

Este apartado se centrará en la nueva planta que se está proyectando en Escombreras, Murcia. En primer lugar, se describirá el emplazamiento de la desaladora además de una breve descripción de la situación hidrológica que atraviesa la zona, incluyendo algunas características del agua de mar. A continuación, se procederá al diseño de los equipos, para ello se harán los cálculos necesarios de cada etapa (captación, pretratamiento, ósmosis inversa y recuperación de energía). Finalmente se seleccionarán los equipos utilizando el catálogo de un fabricante según los requerimientos calculados.

5.1 Emplazamiento

El diseño de la planta está enfocada a una nueva desaladora en la zona el valle de Escombreras en Cartagena, Murcia. Se localizará en la ubicación marcada en la figura 53.



Figura 53. Valle de Escombreras. (Fuente: Google Maps)

La región sufre de escasez de agua desde hace tiempo debido a la sequía y su gran dependencia del Trasvase del Tajo-Segura. El Trasvase permaneció cerrado desde mayo de 2017 hasta abril de 2018 debido al bajo nivel de los embalses de Entrepeñas y Buendía, que son los que regulan la cantidad de agua que se puede trasvasar. Además, la zona cuenta con grandes zonas de regadío que demandan gran cantidad de agua. Gran parte del caudal desalado estaría dirigido al regadío debido a los problemas que han tenido y a las múltiples peticiones de mayor

suministro de agua. Varias organizaciones están estudiando la construcción de una nueva planta en la zona.

En las peticiones se piden entre 40 y 100 hectómetros cúbicos al año para la zona de Escombreras.^{30 31} Por lo tanto, la planta se va a diseñar para 60 hm³/año, lo que equivale a 165 000 m³ al día.

Para seleccionar la parcela donde se ubicará la planta se ha estudiado la zona y se ha encontrado una parcela disponible que se encuentra en la costa y no está en una zona elevada, lo cual supondrá un menor consumo eléctrico. Se ha consultado en el catastro la parcela con número de referencia 0392401XG8509S y está disponible. La parcela seleccionada se encuentra marcada en la figura 54.



Figura 54. Ubicación de la nueva desaladora. (Fuente: Google Earth)

También se consultaron las isobatas (líneas batimétricas) de la zona, proporcionadas por el ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente.³² Se observa que la profundidad del mar crece rápidamente en esta zona, con lo cual no será necesario un inmisario de gran longitud, lo que reduce la potencia de bombeo necesaria y con ello, el consumo energético de la planta. La figura 55 muestra las isobatas de la zona próxima a la parcela seleccionada.

³⁰Desaladora de Escombreras, agua regional. José María Martínez de Haro. Febrero 2018.

³¹Los promotores de las dos nuevas desaladoras reciben peticiones para 100 hm³. Manuel Buitrago. Febrero 2018

³² Batimetría de la región de Murcia, proporcionada por ministerio de agricultura, pesca y alimentación. (<http://www.mapama.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costas/ecocartografias/ecocartografia-murcia.aspx>)



Figura 55. Batimetría Escombreras. (Fuente: Google Earth y MAPAMA)

Como se puede observar en la figura 55 se alcanzan los 20 metros de profundidad muy cerca de la costa, a tan solo 110 metros de esta. Normalmente esta profundidad se alcanza a mayor distancia de la costa, pero debido a la zona de carácter rocoso se alcanza a tan solo 110 metros de la costa. Esto beneficia la planta ya que la toma de captación se encontrará mucho más cerca de la planta permitiendo ahorrar muchos metros de inmisario. Esto se traduce en menos pérdidas de carga y menor potencia de bombeo necesaria, bajando así el consumo energético de la planta.

Además, en la figura 56 se puede ver la altitud de diferentes puntos de la finca. La altura media se encuentra a tan solo 5 metros. Esto beneficia la planta desaladora ya que será necesaria una menor presión en las bombas de captación, lo cual ayudará a reducir el consumo.



Figura 56. Altura de diferentes puntos de la finca seleccionada. (Fuente: Google Earth)

En cuanto a las características del agua de mar captada se tendrán en cuenta la temperatura y salinidad. Otros parámetros como el pH o los sólidos disueltos no se tendrán en cuenta ya que serán controlados y tratados en la etapa de pretratamiento pero no afectarán al diseño de las bombas y recuperadores. El diseño del pretratamiento escapa del alcance de este proyecto.

En primer lugar, para la temperatura del agua de mar se ha empleado la información proporcionada por Puertos del Estado. La boya más cercana es la ubicada en Cabo de palos. En la figura 57 se puede observar el registro de la temperatura de la boya durante el período de tiempo comprendido entre 2006 y 2018. La imagen se ha dividido en dos partes para facilitar la lectura.

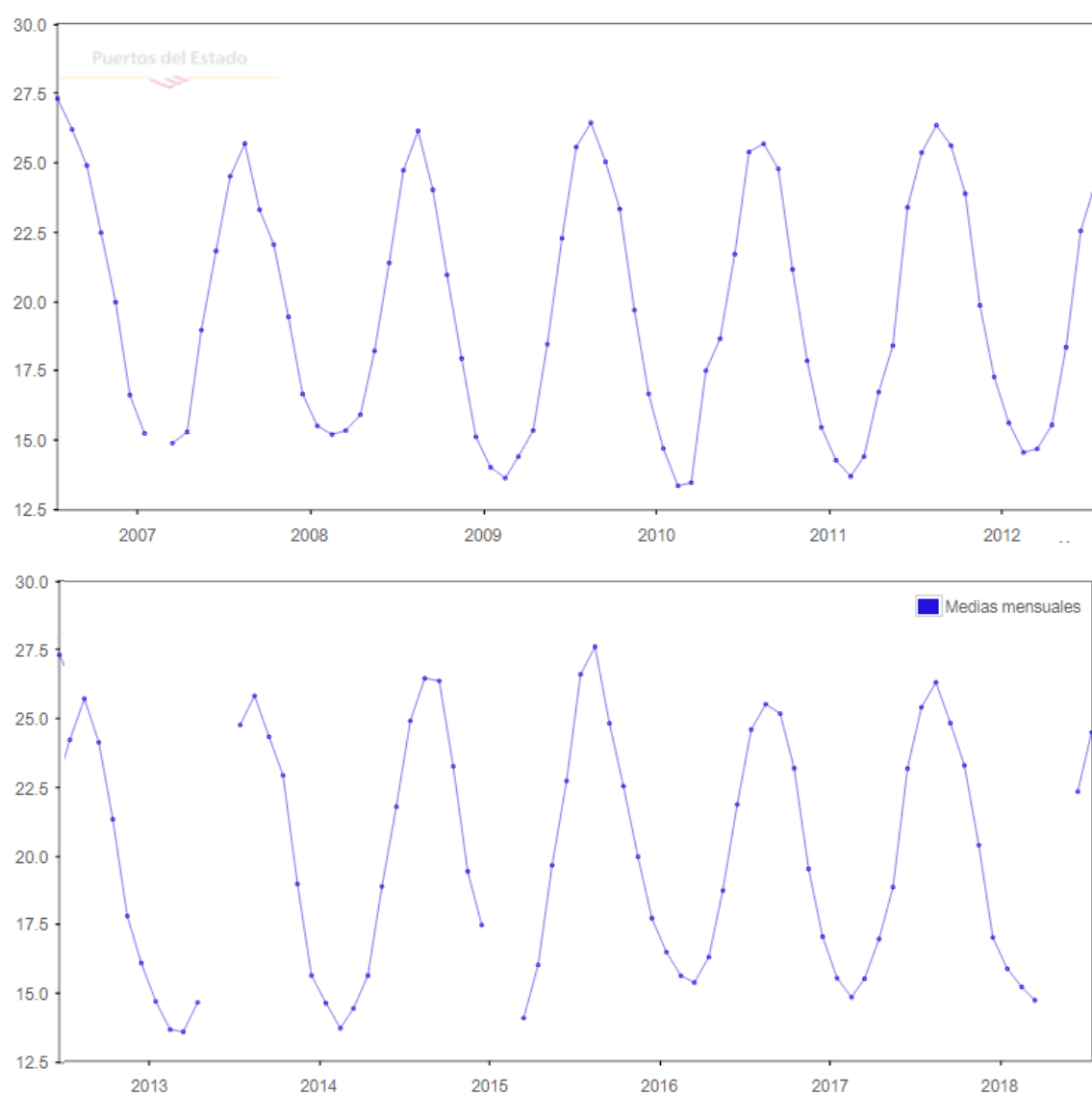
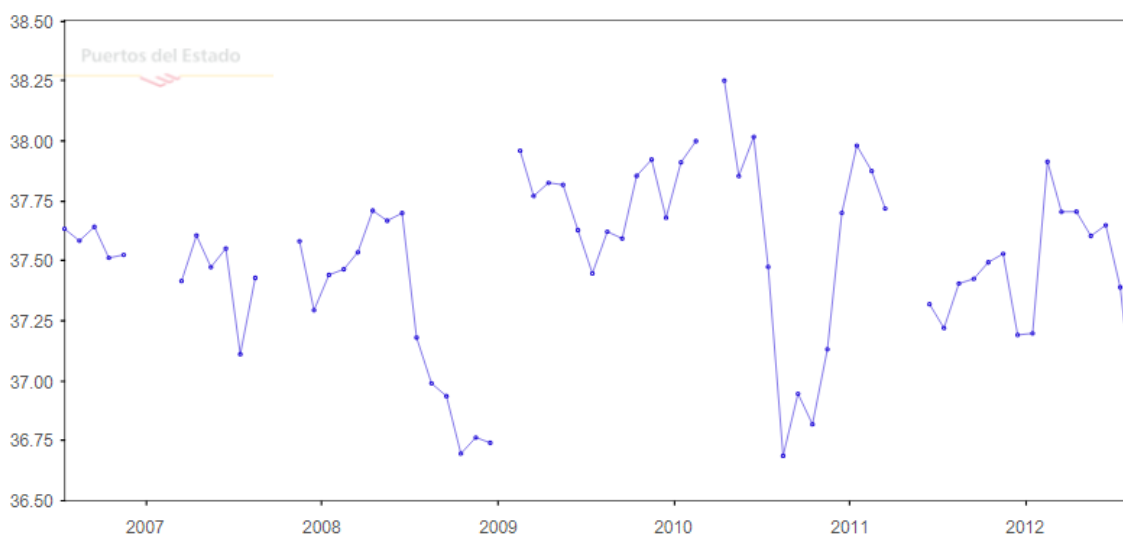


Figura 57. Temperatura del agua en Cabo de palos 2006-2018. (Fuente: Puertos del Estado)

La temperatura media del agua entre los años 2006 y 2018 es de 20°C. La temperatura máxima registrada es de 27.5°C y la mínima de 13°C. Además, se puede observar como el ciclo de variación de temperatura permanece estable a lo largo de los años. Con esta información y atendiendo a la variación de presión necesaria en función de la temperatura de la figura 24, se puede prever que la presión de entrada variará 5.5 bar entre verano e invierno aproximadamente. Y de la misma forma, la salinidad del agua producto variará 25 ppm (mg/l) a lo largo del año teniendo en cuenta únicamente la temperatura. Para los cálculos se utilizará el valor de 15°C como temperatura de diseño ya que es la temperatura mínima la que provoca un mayor consumo energético debido a la mayor presión necesaria. En consecuencia, todos los equipos seleccionados deben estar preparados para trabajar en las condiciones más desfavorables.

Por otro lado, para conocer los datos de la salinidad del agua de mar de la zona se utilizarán también información proporcionada por la boya de Cabo de Palos. Los datos de la salinidad registrados por esta boya durante los años 2006 y 2018 están reflejados en la figura 58. De nuevo se ha dividido la figura para facilitar la lectura.



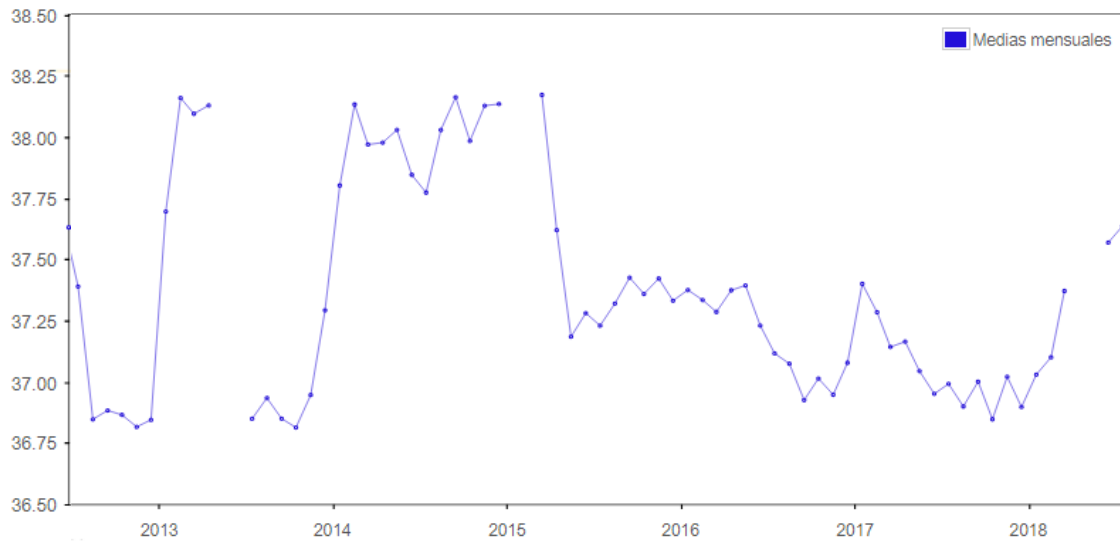


Figura 58. Salinidad del agua en Cabo de palos 2006-2018. (Fuente: Puertos del Estado)

Según la figura anterior se puede ver que la variación de la salinidad es pequeña, con máximos de 1.50 PSU. Además, en los últimos años se ha estabilizado bastante alrededor 37 PSU. Para todos los cálculos se tomará se utilizará el valor de 37 PSU de salinidad.

Con estos parámetros que afectan a la ósmosis inversa, habrá que tenerlos en cuenta para el consumo eléctrico de la planta, ya que por cada 1 bar de presión que hay aumentar el agua de alimentación, la potencia necesaria se incrementa en 600 kW aproximadamente. Por ello para diseñar los equipos se hará tomando el punto más desfavorable. Este punto se dará en invierno cuando la temperatura es mínima y las membranas lleven varios años en servicio. La presión máxima necesaria en estas condiciones será de 69 bar aproximadamente. Por ello, para asegurar el funcionamiento de la planta en cualquier situación se harán todos los cálculos tomando como referencia 70 bar de presión para el agua de alimentación.

5.2 Captación

La captación de agua se realizará mediante una toma abierta, debido a las limitaciones del terreno, y al gran caudal que tendrá la planta. Estas características hacen que la toma cerrada por pozo subterráneo no sea viable y por lo tanto hace descartar esta opción.

La toma de agua estará colocada a 110 metros de la planta y 20 metros de profundidad. Para evitar que los peces u objetos entren en la tubería se dispondrá de una rejilla. La torre de toma suele tener una velocidad del agua en la entrada de 0.2m/s para tratar de evitar la absorción de peces durante el bombeo de agua de alimentación hacia la planta desaladora. Sin embargo, como el diseño de la torre de toma no es objeto de este proyecto y no influye en el resto de la captación salvo en una pequeña pérdida de carga, no se realizará su diseño.

Por lo tanto, se comenzará con el diseño del inmisario. Para ello, primero se calculará el caudal necesario partiendo como dato los 165 000 m³/día de agua producto que se quieren obtener y el 45% de conversión de las membranas de ósmosis inversa.

$$Q_c = \frac{Q_d}{C} = \frac{165\,000 \frac{m^3}{día}}{0.45} = 366\,666.67 \frac{m^3}{día}$$

Q_c: Caudal de captación

Q_d: Caudal desalado

C: Porcentaje de conversión

$$Q_c = \frac{366\,666.67 \frac{m^3}{día}}{24} = 15\,277.78 \frac{m^3}{h}$$
$$Q_c = \frac{15\,277.78 \frac{m^3}{h}}{3600} = 4.24 \frac{m^3}{s}$$

Ahora se procederá al cálculo de la tubería de captación desde la torre de toma hasta el depósito en la planta. El inmisario suele tener un diámetro entre 1000 y 2000 mm ³³ dependiendo del caudal. El diseño se hace de tal forma que la velocidad sea normalmente menor a 2 m/s para tratar de reducir las pérdidas de carga. Se tomará como referencia la desaladora de Águilas (Murcia) de toma abierta que tiene un caudal de 180 000 m³/día ya que es muy parecida a los 165 000 m³/día de este proyecto. Y como diámetro el mismo que el de la desaladora de Águilas que es de 2000 mm ³⁴. Una vez escogido el diámetro se comprará que la velocidad sea baja para que tratar de minimizar las pérdidas de carga.

$$A_i = \frac{\pi \cdot D(m)^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2^2}{4} = 3.14 m^2$$

A_i: Área de la sección del inmisario

D_i: Diámetro del inmisario

$$v_i = \frac{Q_c}{A_i} = \frac{4.24 (\frac{m^3}{s})}{3.15 (m^2)} = 1.35 m/s$$

³³ Referencias de obra desalación. Navart S.L.

³⁴ Inmisario desaladora de Águilas. Mediterráneo servicios marinos.

v_i : *velocidad inmisario*

Q_c : *caudal captado*

A_i : *Área de la sección del inmisario*

La velocidad que resulta con un inmisario con un diámetro de 2000 mm es de 1.35 m/s. Este valor se encuentra dentro de los márgenes típicos para un inmisario.

Para calcular los parámetros necesarios para escoger la bomba de captación, primero se calculará la altura necesaria de la bomba teniendo en cuenta las pérdidas de carga. Para ello se empleará la ecuación de Bernouille, tomando la entrada en la torre de captación y la salida en la descarga del inmisario al depósito de agua de alimentación en la planta desaladora.

$$\frac{p_e}{\rho \cdot g} + z_e + \frac{v_e}{2 \cdot g} - h_f - h_m + h_b = \frac{p_s}{\rho \cdot g} + z_s + \frac{v_s}{2 \cdot g}$$

p_e : *presión a la entrada*

z_e : *altura a la entrada*

v_e : *velocidad a la entrada*

h_f : *pérdida de carga primaria*

h_m : *pérdida de carga secundaria*

h_b : *altura de la bomba*

p_s : *presión a la salida*

z_s : *altura a la salida*

v_s : *velocidad a la salida*

Antes de poder resolver la ecuación de Bernouille se deberá calcular las pérdidas de carga primarias y secundarias. Para la primaria se utilizará la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$h_f = f \cdot \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g}$$

f : *factor de fricción de Darcy – Weisbach*

L : *longitud de la tubería*

v : *velocidad en la tubería*

D : *diámetro de la tubería*

g : *aceleración de la gravedad*

Para poder calcular h_f es necesario obtener primero el factor de fricción de Darcy, “f”, mediante la ecuación de Colebrook. Para ello se calculará el número de Reynolds previamente. La densidad del agua de mar es de 1027.39 kg/m^3 ³⁵, y la presión dinámica, μ , que se empleará es $1.21 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ ³⁶.

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} = \frac{1.35 \frac{m}{s} \cdot 2 \text{ m} \cdot 1027.39 \frac{kg}{m^3}}{1.21 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}} = 2\,279\,412.68$$

ρ : densidad del agua

μ : viscosidad dinámica del agua

Con el número de Reynolds obtenido queda determinado que es flujo turbulento y en consecuencia se utilizará la ecuación para este tipo de flujo. Para la rugosidad se tomó el valor de 0.007 mm ³⁷.

$$\frac{1}{f^{\frac{1}{2}}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.7} + \frac{2.51}{Re \cdot f^{\frac{1}{2}}} \right)$$

ε : rugosidad

$$\frac{1}{f^{\frac{1}{2}}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\frac{0.000007 \text{ m}}{2 \text{ m}}}{3.7} + \frac{2.51}{2\,279\,412.68 \cdot f^{\frac{1}{2}}} \right)$$

$$f = 1.03 \cdot 10^{-2}$$

Conocido el factor de fricción, f, se introduce su valor en la ecuación anterior de Darcy-Weisbach y se calculan las pérdidas primarias.

³⁵ Densidad obtenida con la ecuación de la UNESCO para una temperatura de 15º y salinidad de 37 PSU.

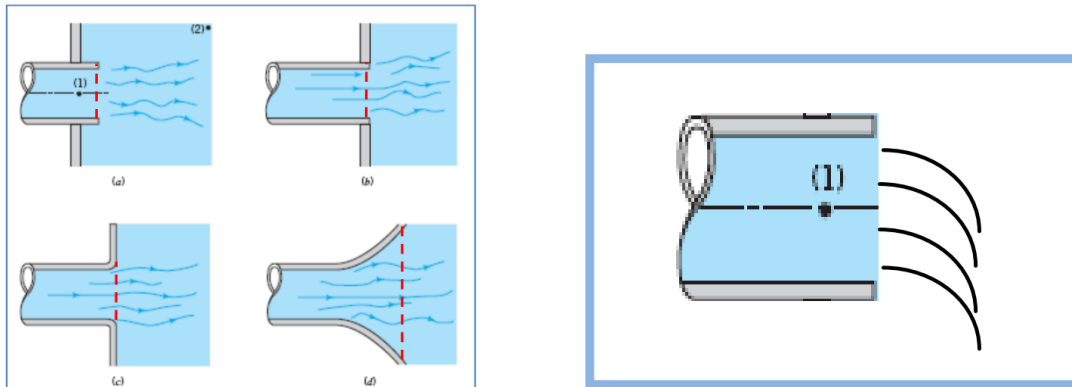
³⁶ Viscosidad dinámica obtenida con la ecuación de la UNESCO para una temperatura de 15º y salinidad de 37 PSU.

³⁷ Valor de rugosidad del polietileno FerroPlast. Obtenida del catálogo Sistemas de presión en polietileno FerroPlast

$$h_f = f \cdot \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} = 1.03 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{110 \text{ m} \cdot (1.35 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 \text{ m} \cdot 2 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \mathbf{0.05m}$$

Llama la atención las pocas pérdidas primarias que hay, sin embargo, este número es debido a la baja rugosidad del polietileno, la poca longitud del inmisario y una velocidad bastante contenida.

Una vez obtenido el valor de las pérdidas primarias, se calculan las secundarias. Se tendrá en cuenta la conexión del inmisario con la torre de captación y la descarga del inmisario al depósito. Las constantes de pérdida de carga se encuentran en la figura 59.



Salida sumergida $k=1$

Salida no sumergida $k=0$.

Figura 59. Constante pérdida de carga. (Fuente: apuntes mecánica de fluidos, ICAI)

La pérdida de carga en la conexión del inmisario con la torre de captación y la descarga del inmisario al depósito será la misma, ya que ambas serán en salida sumergida y con la misma velocidad. Será la calculada a continuación para ambas.

$$h_{m, salida} = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = 1 \cdot \frac{1.35^2}{2 \cdot 9.81} = 0.09 \text{ m}$$

Además, se tendrán en cuenta la pérdida de carga que introducirán los codos a 90° que se utilizarán. Se supondrá que se utilizaran cuatro codos. El coeficiente de pérdida de carga de los codos se puede ver en la tabla 2.

Accesorios	K	L/D
Válvula esférica (totalmente abierta)	10	350
Válvula en ángulo recto (totalmente abierta)	5	175
Válvula de seguridad (totalmente abierta)	2.5	-
Válvula de retención (totalmente abierta)	2	135
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	0.2	13
Válvula de compuerta (abierta $\frac{3}{4}$)	1.15	35
Válvula de compuerta (abierta $\frac{1}{2}$)	5.6	160
Válvula de compuerta (abierta $\frac{1}{4}$)	24.0	900
Válvula de mariposa (totalmente abierta)	-	40
"T" por la salida lateral	1.80	67
Codo a 90° de radio corto (con bridas)	0.90	32
Codo a 90° de radio normal (con bridas)	0.75	27
Codo a 90° de radio grande (con bridas)	0.60	20
Codo a 45° de radio corto (con bridas)	0.45	-
Codo a 45° de radio normal (con bridas)	0.40	-
Codo a 45° de radio grande (con bridas)	0.35	-

Tabla 2. Coeficiente de pérdidas de carga secundarias. (Fuente: Cátedra de Ingeniería Rural)

El valor de "K" observado en la tabla para un codo a 90° de radio corto es de 0.9. La pérdida de carga será por tanto la siguiente.

$$h_{m,codo\ 90^\circ} = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = 0.9 \cdot \frac{1.35^2}{2 \cdot 9.81} = 0.08\ m$$

Por lo tanto, las pérdidas secundarias totales serán las siguientes.

$$h_m = 3 \cdot h_{m,salida} + 4 \cdot h_{m,codo\ 90^\circ} = 3 \cdot 0.09 + 4 \cdot 0.08 = 0.52\ m$$

Una vez conocidas las pérdidas de carga primarias y secundarias se procederá a calcular la altura necesaria de la bomba. Para ello solo se tienen que sumar las pérdidas de carga con la altura del depósito respecto al nivel del mar. La altura del depósito se considera que es de 5 metros respecto al suelo. Y dado que la altura media de la parcela son 5 metros como se vio en la figura 56, la altura del depósito respecto al nivel del mar son 10 metros.

$$h_b = h_f + h_m + z = 0.05 + 0.52 + 10 = 10.57\ m$$

Finalmente, la altura que tienen que proporcionar las bombas de captación es de 10.57 metros, la cual es menor a lo normal debido a las condiciones particulares favorables de la situación de la planta. Las bombas que se escogerán serán de tipo vertical sumergible para minimizar el espacio utilizado y evitar que las bombas se estropeen con las variaciones de las mareas. Estarán colocadas en una cámara de bombeo sobre la costa.

5.3 Pretratamiento

En este apartado no se diseñará el pretratamiento completo, sino que se calculará las bombas necesarias de esta etapa. Para ello se considerarán los requerimientos de presión de la etapa de filtrado. Las otras fases del pretratamiento que se realizan añadiendo diferentes compuestos al agua, no se tendrán en cuenta ya que no presentan una pérdida de carga ni un requerimiento de presión.

Para calcular la bomba necesaria para impulsar el agua a través de los equipos de filtrado habrá que tener en cuenta la pérdida de carga que presenta cada uno. Además, habrá que proporcionar una presión mínima para que los equipos trabajen correctamente. Para ello se tomará como referencia los filtros de anillas MasterMegadisc de Lama Sistemas de filtrado. En la figura 60 se representa la pérdida de carga en mca de este filtro en función del caudal en m^3/h .

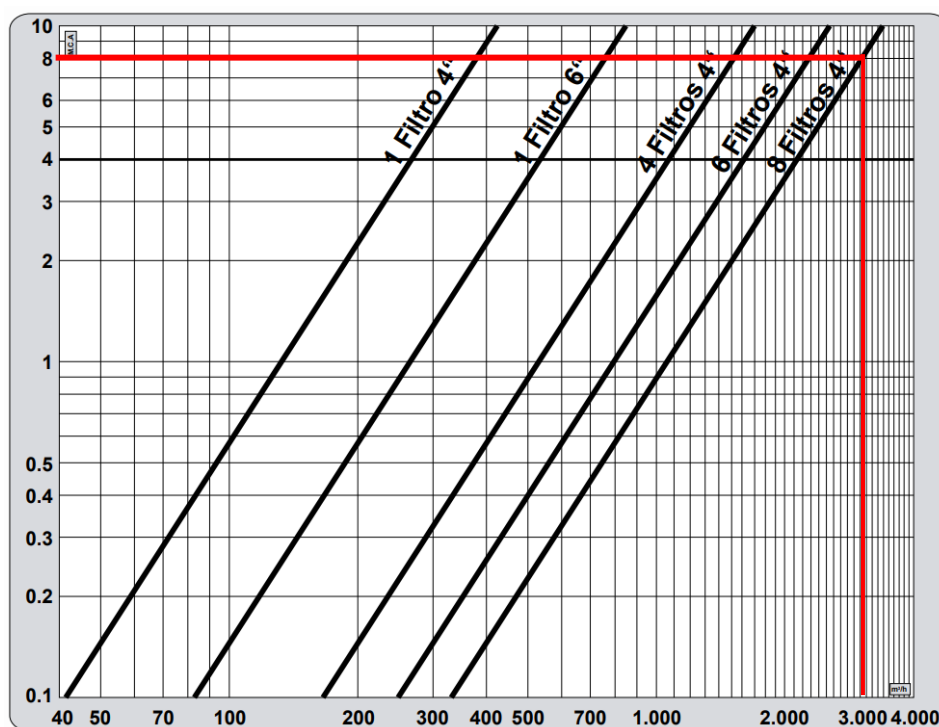


Figura 60. Gráfica pérdida de carga (mca) frente al caudal (m^3/h). (Fuente: catálogo Filtro Lama MasterMegadisc)

En cuanto a la presión de funcionamiento de los equipos, en el catálogo marca una presión máxima de 10 kg/cm² (9.81 bar).

Para los cálculos se ha escogido la configuración de 8 filtros de 4 pulgadas ya que proporcionará el mayor caudal. Se considera que se colocan 5 filas de filtros en paralelo de tal forma que cada una tenga un caudal de 3100 m³/h y una pérdida de carga de 8 metros. Los filtros se dispondrán en una configuración similar a la de la figura 61.



Figura 61. Configuración filtros de anillas en paralelo. (Fuente: catálogo filtro Lama MasterMegadisc)

Además del filtro de anillas, se considerará una etapa de ultrafiltración. Para los cálculos se tomará como referencia los equipos de ultrafiltración Culligan ULF. Según el catálogo estos equipos tienen una pérdida máxima de carga de 2.1 bar y una presión máxima de alimentación de 6 bar.

Por lo tanto, para calcular la potencia necesaria de las bombas se tendrán en cuenta las pérdidas de carga de los dos equipos (8 m y 2.1 bar) y se considera una presión de trabajo de 3 bar que se encuentra dentro del rango de funcionamiento de ambos equipos. La altura necesaria de la bomba será la siguiente.

$$H = 8 \text{ m} + \frac{2.1 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{1027.39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + \frac{3 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{1027.39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 58.60 \text{ m}$$

La altura resultante que tendrán que proporcionar las bombas es de 58.60 metros, la cual es considerablemente mayor a la captación debido a las condiciones particulares de la captación y también debido a que se ha considerado una etapa de ultrafiltración con la máxima pérdida de carga posible. En condiciones normales de trabajo las pérdidas de carga serán menores y por lo tanto la altura necesaria menor, sin embargo, el diseño se ha hecho para que los equipos estén preparados para trabajar en todas las condiciones posibles. Las bombas para esta etapa serán centrífugas de eje horizontal.

5.4 Ósmosis inversa

Los equipos de bombeo para la ósmosis inversa son los que mayor consumo tienen en una planta desaladora. Es debido a que el proceso de ósmosis requiere una presión alta, esto sumado a los grandes caudales con los que se trabaja resulta en un gran consumo eléctrico.

La presión de trabajo típica de las membranas está entre 60 y 70 bar. Dado que, como se ha visto anteriormente, la temperatura y la edad de las membranas hacen que aumente la presión requerida, se ha fijado 70 bar como presión de trabajo. Así se asegura que las bombas pueden proporcionar la presión suficiente a lo largo de toda la vida útil de las membranas.

Para el cálculo de las bombas, la entrada será el final de la fase de pretratamiento y la salida el punto de entrada a los módulos de ósmosis inversa. Se considera que la entrada y la salida están a la misma altura. De la misma forma se considera que la velocidad a la entrada y la salida son iguales.

$$\frac{p_e}{\rho \cdot g} + z_e + \frac{v_e}{2 \cdot g} + h_b = \frac{p_s}{\rho \cdot g} + z_s + \frac{v_s}{2 \cdot g}$$

p_e : presión a la entrada

z_e : altura a la entrada

v_e : velocidad a la entrada

h_f : pérdida de carga primaria

h_m : pérdida de carga secundaria

h_b : altura de la bomba

p_s : presión a la salida

z_s : altura a la salida

v_s : velocidad a la salida

Eliminando los términos de altura y velocidad queda la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \frac{p_e}{\rho \cdot g} + h_b &= \frac{p_s}{\rho \cdot g} \\ \frac{3 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{1027.39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + h_b &= \frac{70 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{1027.39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \\ h_b &= 664.77 \text{ m} \end{aligned}$$

En este caso se calculará la potencia consumida por esta etapa, ya que será necesario para escoger el equipo de recuperación de energía. Primero se calculará la potencia teórica de las bombas.

$$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H = 1027.39 \frac{kg}{m^3} \cdot 4.24 \frac{m^3}{s} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 664.77 m = 28\,433.64 \text{ kW}$$

Los 28 433.64 kW son la potencia efectiva o útil. Sin embargo, las bombas tienen una serie de pérdidas que hacen que la potencia requerida sea mayor. Esas pérdidas son hidráulicas, volumétricas y mecánicas. Teniendo todas estas pérdidas en cuenta se obtiene un rendimiento total de la bomba, que suele estar entre el 70% y 90% en función de la calidad de la bomba. La potencia de accionamiento que tiene que suministrar el motor será mayor. Para esta primera aproximación se tomará un rendimiento del 70% y más adelante, una vez escogidos los equipos se utilizará el rendimiento de la bomba seleccionada.

$$P_a = \frac{P}{\eta_t}$$

P_a: Potencia de accionamiento

P: potencia útil

η_t: rendimiento total de la bomba

$$P_a = \frac{28\,433.64 \text{ kW}}{0.70} = 40\,619.49 \text{ kW}$$

A su vez el motor que accionará la bomba también tiene unas pérdidas y por lo tanto un rendimiento asociado. Los motores eléctricos tienen un rendimiento bastante alto, se utilizará un rendimiento del 95% para los motores. Calcular esta potencia servirá para conocer el consumo eléctrico que tendrá la esta etapa de la planta.

$$P_m = \frac{P_a}{\eta_t}$$

P_m: Potencia del motor

P_a: Potencia de accionamiento

η_t: rendimiento total del motor

$$P_m = \frac{40\,619.49\text{ kW}}{0.95} = 42\,757.36\text{ kW}$$

Esta etapa es la de mayor consumo de toda la planta, esto es debido a que las membranas de ósmosis inversa requieren altas presiones para que se produzca la separación de sales. Si se comparan los 664.77 metros de altura necesaria para esta etapa con los 10.57 y 58.60 metros de la etapa de captación y pretratamiento se ve claramente las diferencias de consumo que tendrán las bombas. Las bombas de la ósmosis inversa serán bombas de alta presión de eje horizontal.

5.5 Dimensionamiento de los recuperadores de energía

Ahora se diseñarán los equipos de recuperación energía necesarios para la planta, y se calculará el ahorro energético que suponen. Estos equipos estarán colocados a la salida de las membranas de ósmosis inversa, para aprovechar la presión de la salmuera.

A continuación, se comparará la potencia consumida por la planta en función del tipo de equipo de recuperación. Los tipos de equipos de recuperación que se han comentado anteriormente son: la turbina Francis, la turbina Pelton y las cámaras de intercambio de presión. Dado que la turbina Francis y la Pelton funcionan de forma similar y para los cálculos su principal diferencia es el rendimiento, se calculará únicamente la turbina Pelton que es la de mayor rendimiento, además de las cámaras de intercambio de presión.

5.5.1 Turbina Pelton

Para calcular la potencia recuperada por las turbinas Pelton se necesita conocer la altura de trabajo, además de la densidad y caudal que ya son conocidas. Para calcular la altura se aplicará la ecuación de Bernouille entre la entrada de la turbina y su salida con el agua ya en reposo.

$$\frac{p_e}{\rho \cdot g} + z_e + \frac{v_e^2}{2 \cdot g} - h_f - h_m + h_t = \frac{p_s}{\rho \cdot g} + z_s + \frac{v_s^2}{2 \cdot g}$$

p_e : presión a la entrada

z_e : altura a la entrada

v_e : velocidad a la entrada

h_f : pérdida de carga primaria

h_m : pérdida de carga secundaria

h_t : altura de la turbina

p_s : presión a la salida

z_s : altura a la salida

v_s : velocidad a la salida

Se considera que el punto de entrada y salida están a la misma altura y que las pérdidas de carga están incluidas en el rendimiento de la turbina. Además, debido a que el punto de salida se ha tomado en el depósito de salida con la salmuera en reposo, su presión relativa y su velocidad son cero. La presión de entrada se considera la presión de trabajo de la ósmosis inversa menos un 5% por las pérdidas de carga de las membranas. Teniendo esto en cuenta resulta:

$$\frac{p_e}{\rho \cdot g} + \frac{v_e}{2 \cdot g} + h_t = 0$$

$$\frac{(70 \cdot 0.95) \cdot 10^5 \text{ Pa}}{1027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + \frac{3}{2 \cdot 9.81} + h_t = 0$$

$$h_t = -660.21 \text{ m}$$

El símbolo menos es coherente ya que se trata de una turbina y por lo tanto no aporta energía al fluido. Ahora se calculará la potencia absorbida por la turbina utilizando unidades positivas para evitar confusiones. Primero se debe conocer el caudal de salmuera. Debido a que se está diseñando la planta con un 45% de permeado, el caudal de salmuera será el 55% del total.

$$Q_s = Q_t \cdot C = 366\,666.67 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot 0.55 = 201\,666.67 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Q_s : Caudal de salmuera

Q_t : Caudal total

C : Porcentaje de conversión de salmuera

$$Q_s = \frac{201\,666.67 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{24} = 8\,402.78 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$Q_s = \frac{8\,402.78 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{3600} = 2.33 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Ahora se calcula la potencia total recuperada con el caudal total. Sin embargo, el caudal estaría repartido entre varias turbinas.

$$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H$$

P: potencia de turbinada

ρ : densidad de la salmuera

Q: caudal de la turbina

g: aceleración de la gravedad

H: altura de la turbina

$$P = 1052 \frac{kg}{m^3} \cdot 2.33 \frac{m^3}{s} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 660.21 m = 15\,903.32 kW$$

Ahora hay que aplicar el rendimiento de la turbina, que se ha tomado de un 90%, que es el que se podría esperar de una turbina Pelton de alto rendimiento.

$$P_a = P \cdot \eta_t$$

P_a: Potencia en el eje

P: potencia útil

η_t : rendimiento total de la turbina

$$P_a = 15\,903.32 kW \cdot 0.90 = 14\,312.99 kW$$

Y falta aplicar el rendimiento del alternador, que se tomado un valor de 95%.

$$P_{rec} = P_a \cdot \eta_{alt}$$

P_{rec}: Potencia recuperada

P_a: Potencia en el eje

η_t : rendimiento del alternador

$$P_{rec} = 14\,312.99\text{ kW} \cdot 0.95 = 13\,592.11\text{ kW}$$

Con este ahorro, la potencia consumida en la etapa de ósmosis inversa será la siguiente.

$$P_{osm} = 42\,757.36\text{ kW} - 13\,592.11\text{ kW} = 29\,165.24\text{ kW}$$

5.5.2 Cámaras de intercambio de presión

A continuación, se planteará la recuperación mediante cámaras de intercambio de presión. Para ello se va a utilizar como referencia los equipos PX Pressure Exchanger de Energy Recovery (figura 62).



Figura 62. Cámara de intercambio de presión PX. (Fuente: Energy Recovery)

Para el cálculo se supondrá una pérdida de carga de un 5% en la presión de las membranas de ósmosis inversa. Y el rendimiento se tomará del 98% ³⁸ siguiendo el catálogo del fabricante.

Primero se calculará la presión de salida de las membranas de ósmosis inversa utilizando el dato del 5% de pérdida de presión que se ha supuesto supuesto.

$$p_s = p_e \cdot \eta_{osm}$$

p_s : presión salida ósmosis inversa

p_e : presión entrada ósmosis inversa

η_{osm} : rendimiento por pérdidas de carga de las membranas

³⁸ Rendimiento del recuperador PX-Q300, Energy Recovery

$$p_{rec} = 70 \text{ bar} \cdot 0.95 = 66.5 \text{ bar}$$

Ahora se calculará la presión de salida del recuperador utilizando el 98% como rendimiento.

$$p_{rec} = p_{osm} \cdot \eta_{osm} \cdot \eta_{dis}$$

p_s : presión salida recuperador

p_e : presión entrada recuperador

η_{dis} : rendimiento dispositivo de recuperación

$$p_{rec} = 66.5 \text{ bar} \cdot 0.98 = 65.17 \text{ bar}$$

Para calcular el ahorro energético del sistema de cámaras de intercambio de presión, se tendrá que recalcular las bombas siguiendo el esquema de la figura 63.

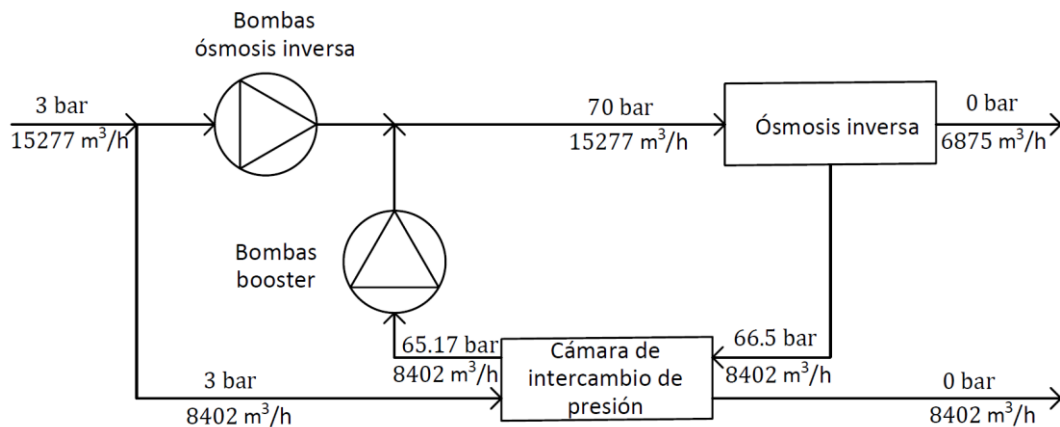


Figura 63. Esquema hidráulico instalación con cámara de intercambio de presión (plano 3). (Fuente: elaboración propia)

Primero se calculará la bomba booster que eleva la presión del agua de salida de la cámara de intercambio de presión de 65.17 bar a 70 bar. Para ello se calculará la altura necesaria de la bomba mediante la diferencia de presión.

$$h_b = \frac{p_s - p_e}{\rho \cdot g} = \frac{(70 - 65.17) \cdot 10^5 \text{ Pa}}{1027.39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 47.92 \text{ m}$$

Ahora, se calculará la potencia de la bomba booster. Para poder tener una referencia de consumo se tomará un rendimiento del 70% para las bombas y un 95% para el motor. Más adelante, una vez seleccionados los equipos se aplicará el rendimiento de las bombas escogidas.

$$P = 1027.39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2.33 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 47.92 \text{ m} = 1127.37 \text{ kW}$$

$$P_a = \frac{P}{\eta_t} = \frac{1127.37 \text{ kW}}{0.7} = 1610.53 \text{ kW}$$

$$P_m = \frac{P_a}{\eta_t} = \frac{1610.53 \text{ kW}}{0.95} = 1695.30 \text{ kW}$$

A continuación, se va a obtener la altura y potencia necesarias para las bombas de ósmosis inversa del nuevo esquema de la planta siguiendo el mismo procedimiento que el utilizado anteriormente. El caudal que tendrán estas bombas será el de captación menos el que va a los dispositivos de recuperación de energía.

$$Q = Q_{cap} - Q_{dis} = 4.24 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} - 2.33 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1.91 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$h_b = \frac{p_s - p_e}{\rho \cdot g} = \frac{(70 - 3) \cdot 10^5 \text{ Pa}}{1027.39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 664.77 \text{ m}$$

$$P = 1027.39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1.91 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 665.02 \text{ m} = 12795.14 \text{ kW}$$

$$P_a = \frac{P}{\eta_t} = \frac{12795.14 \text{ kW}}{0.7} = 18278.77 \text{ kW}$$

$$P_m = \frac{P_a}{\eta_t} = \frac{18278.77 \text{ kW}}{0.95} = 19240.81 \text{ kW}$$

La potencia total de la etapa de ósmosis inversa con el sistema de cámaras de intercambio de presión es la siguiente.

$$P_{t,osm} = P_{m,booster} + P_{m,principal} = 1695.30 \text{ kW} + 19\,240.81 \text{ kW} = 20\,936.11 \text{ kW}$$

5.6 Elección del dispositivo recuperador de energía

Para escoger el recuperador óptimo para la planta se utilizarán los datos calculados anteriormente y se comparará el consumo eléctrico de la etapa de ósmosis inversa con la turbina Pelton y las cámaras de intercambio de presión. El consumo de cada etapa según el sistema de recuperación se muestra en la tabla 3 y en la figura 64.

Etapa	Potencia (kW)		
	Planta sin recuperación	Planta con turbina Pelton	Planta con cámara de intercambio de presión
Ósmosis inversa	42 757.36	29 165.24	20 936.11
Ahorro	-	13 592.11	21 821.25

Tabla 3. Potencias consumidas en la etapa de ósmosis inversa. (Fuente: elaboración propia)

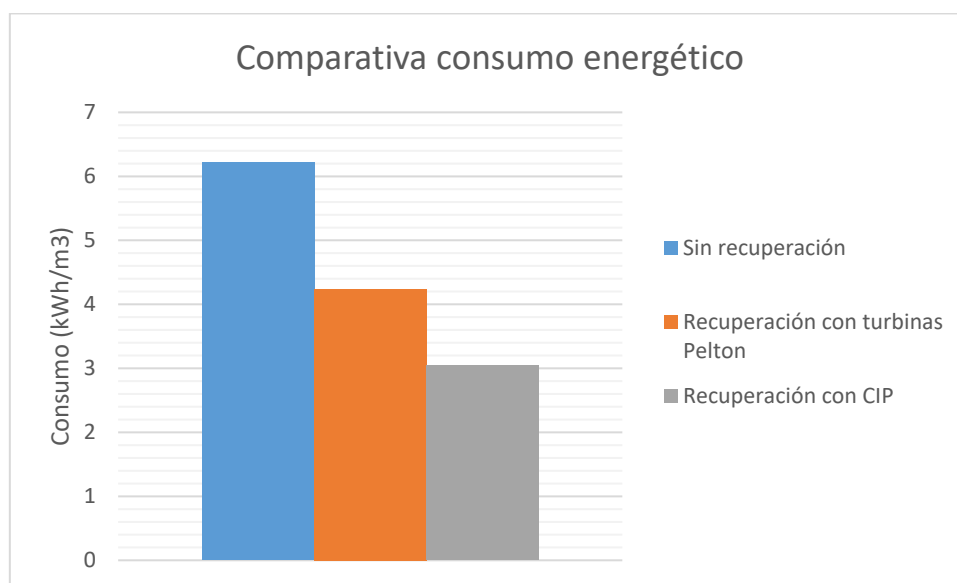


Figura 64. Gráfico comparativo consumo ósmosis inversa. (Fuente: elaboración propia)

El consumo en kW/m³ mostrado en la figura 64 se ha calculado de la siguiente forma. Primero se ha calculado el consumo total diario en kWh considerando que la planta trabaja 24 horas al día.

$$P_{diaria} (kWh) = P_{planta}(kW) \cdot 24 h$$

Después se ha calculado la potencia necesaria por m³ de agua desalada. Para ello se ha dividido la potencia diaria entre los 165 000 m³ de agua que desala la planta al día.

$$P_{necesaria} \left(\frac{kWh}{m^3} \right) = \frac{P_{diaria}(kWh)}{Q_{desalado} (m^3)}$$

En la tabla 4 se pueden ver los valores intermedios obtenidos para el cálculo del consumo en kWh/m³.

	Sin recuperación	Turbina Pelton	Cámara de intercambio de presión
Potencia ósmosis inversa (kW)	42 757.36	29 165.24	20 936.11
Potencia diaria (kWh)	1 026 176.55	699 965.86	502 466.58
Potencia necesaria (kWh/m ³)	6.22	4.24	3.05

Tabla 4. Comparativa potencia total. (Fuente: elaboración propia)

Observando los gráficos y tablas anteriores se observan claras diferencias de consumo entre los dos tipos de recuperadores. Las turbinas Pelton consiguen reducir el consumo en un 32% y las cámaras de intercambio de presión un 51% respecto a la planta sin ningún sistema de recuperación de energía. Por lo tanto, como es evidente, se seleccionará la cámara de intercambio de presión. Además de su mayor reducción de consumo, presenta otras ventajas como un menor mantenimiento.

5.7 Elección de los equipos de bombeo

La selección de equipos se hará siguiendo el esquema de la planta con recuperación de energía (figura 65), por lo habrá bombas de captación, pretratamiento, ósmosis inversa y booster.

La planta planteada requiere un gran caudal y altas presiones por lo que será necesario unas bombas industriales de gran rendimiento. Entre diferentes fabricantes se ha seleccionado Andritz debido a que es un fabricante de bombas orientado al sector industrial para aplicaciones de grandes caudales y alturas.

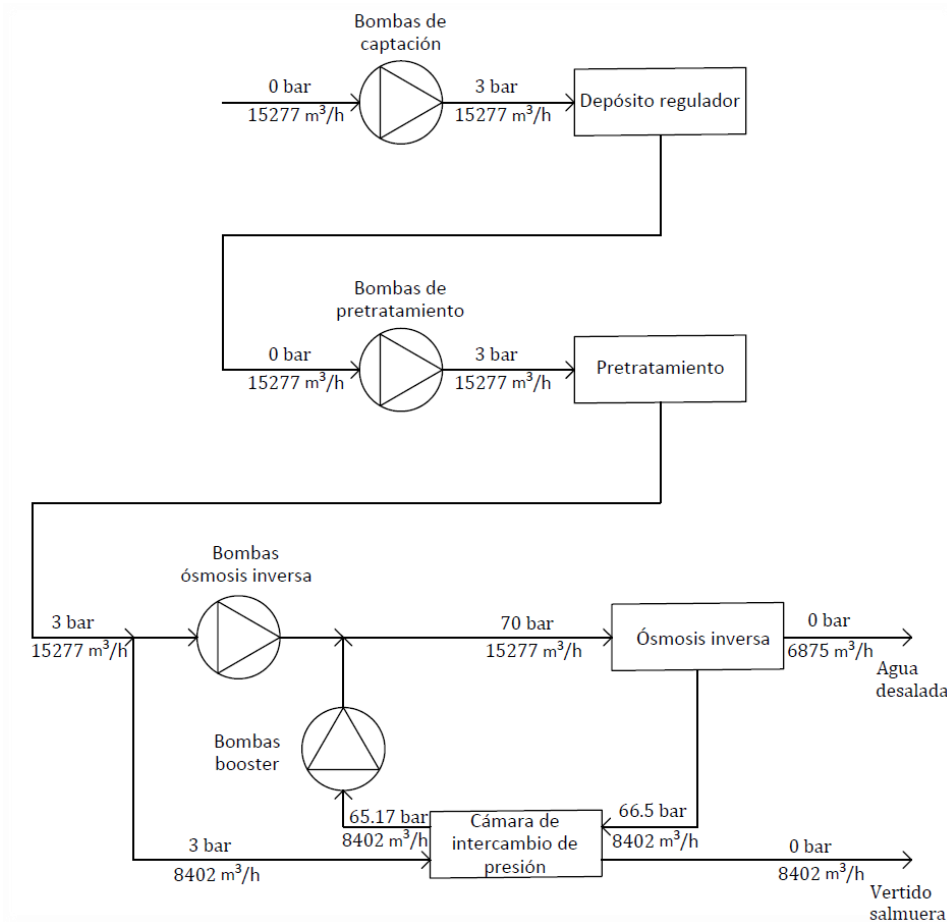


Figura 65. Plano de la planta completa con cámaras de intercambio de presión, plano 3. (Fuente: elaboración propia)

5.7.1 Captación

Para la captación se emplearán bombas verticales del tipo SAT (figura 66). El fabricante indica que este tipo de bombas son aptas para líquidos con partículas o líquidos abrasivos. Dentro de esta familia de bombas existen variaciones en función de la caudal y altura requerida.

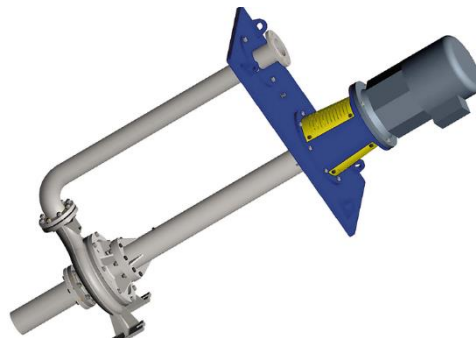


Figura 66. Bomba Andritz vertical sumergible CAT/SAT. (Fuente: Andritz)

Para seleccionar la bomba se utilizarán las curvas de funcionamiento proporcionadas por el fabricante (figura 67). Para ello se buscará el máximo caudal para la altura de 10.57 metros que se ha calculado.

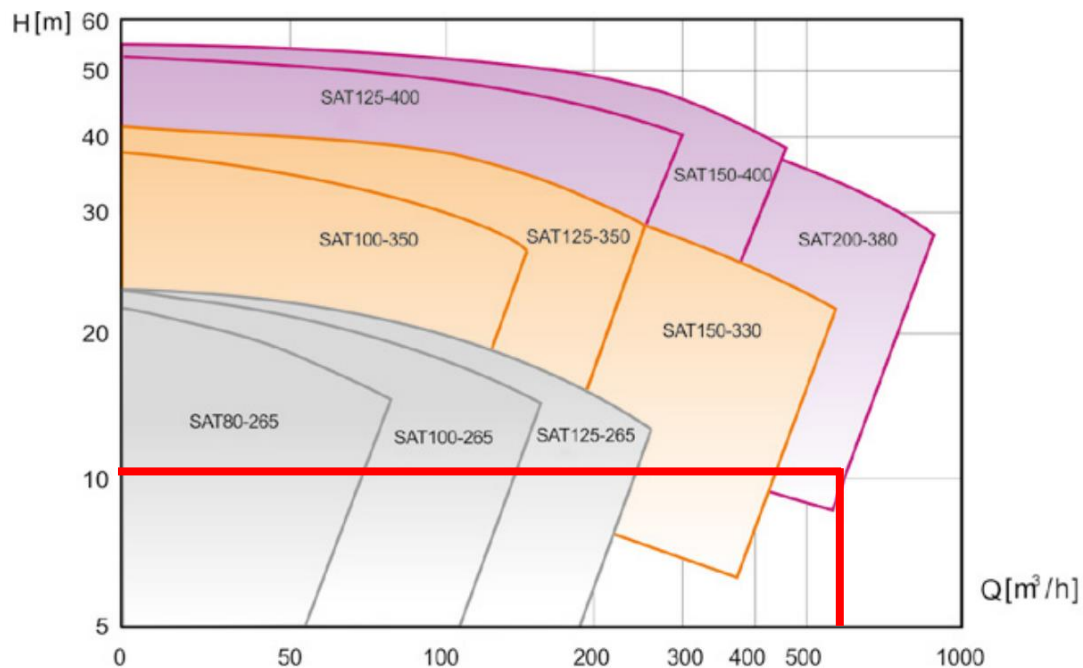


Figura 67. Curva característica bomba SAT a 1500 rpm. (Fuente: Andritz)

La bomba escogida será la SAT 200-380. Para una altura de 10.57 metros se obtiene un caudal de 605 m³/h por cada bomba. Teniendo en cuenta que el caudal total es de 15 277.78 m³/h, serán necesarias 26 bombas más 2 de reserva. Si se calcula el número específico de revoluciones adimensional, ($n_0 = w \cdot Q^{1/2} / (g \cdot H)^{3/4}$) se obtiene un valor de 0.33 lo cual corresponde con un rodete radial, se podría clasificar como una bomba lenta.

5.7.2 Pretratamiento

Para el pretratamiento se utilizarán la familia de bombas S (figura 68), se trata de bombas de una sola etapa de eje horizontal. Además, está indicada para diferentes usos entre ellos para desaladoras.



Figura 68. Bomba Andritz S de una etapa de eje horizontal. (Fuente: Andritz)

Para el pretratamiento hará falta una bomba que proporcione una altura de 58.60 m. Para seleccionar el modelo de la bomba se utilizarán las curvas de funcionamiento proporcionadas por el fabricante (figura 69).

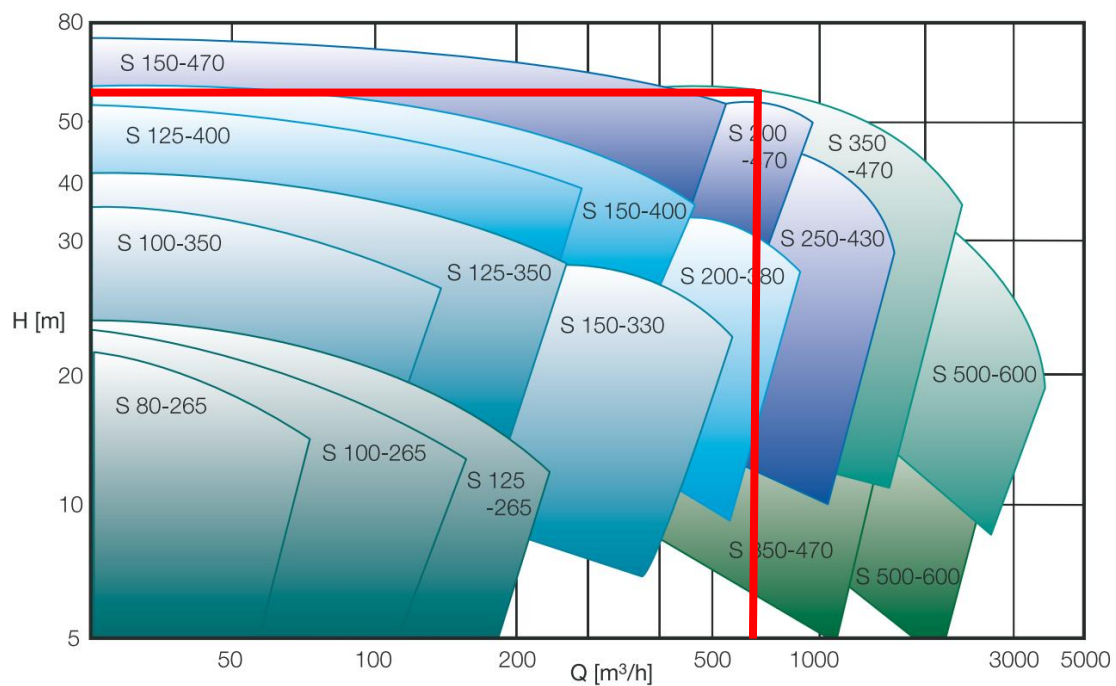


Figura 69. Gráfica curvas características bomba S a 1500 rpm. (Fuente: Andritz)

Para una altura de 58.60 metros la bomba S 125-400 proporciona un caudal de 700 m³/h. Por lo tanto, para alcanzar el caudal total de 15 277.78 m³/h se utilizarán 22 bombas y habrá dos de

reserva. El número específico de revoluciones adimensional en este caso es de 0.1 por lo que sería una bomba lenta de rodete radial.

5.7.3 Ósmosis inversa

Para la ósmosis inversa son necesarias bombas de alta presión. En Andritz cuentan con las bombas de la serie MP (figura 70) que alcanzan presiones de más de 800 metros. Además, está recomendada para el uso en desaladoras.



Figura 70. Bombas de alta presión Andritz MP. (Fuente: Andritz)

La altura que deberán proporcionar las bombas es de 665.02 metros. De la misma forma que en las bombas anteriores, se seleccionará el modelo según las curvas de funcionamiento de la bomba (figura 71).

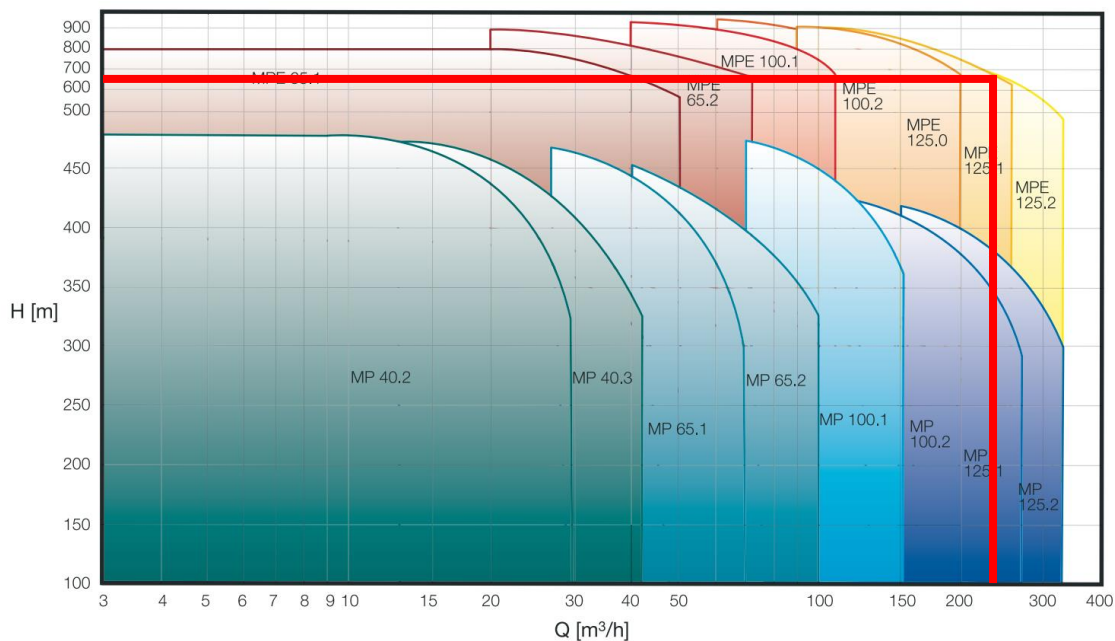


Figura 71. Curva característica bomba MP para 50Hz. (Fuente: Andritz)

Para la altura de 665.02 metros necesaria se utilizará la bomba MPE 125.1 que proporciona un caudal de 238 m³/h. En este caso el número específico de revoluciones adimensional estaría de nuevo por debajo de 0.1, por lo que la es una bomba lenta de rodete radial. Teniendo en cuenta que se empleará la cámara de intercambio de presión como sistema de recuperación de energía, el caudal que pasará por la bomba principal de ósmosis inversa será el 45% del total. Por lo tanto, para alcanzar el caudal de 6875 m³/h harán falta 29 bombas y dos de reserva.

5.7.4 Bomba booster

Para las bombas booster, que aumentarán la presión del agua proveniente de las cámaras de intercambio de presión, se utilizarán las bombas de la familia ACP/ARE (figura 72). Este tipo de bombas proporciona una presión media y grandes caudales y es apta para aplicaciones de desalación.



Figura 72. Bomba Andritz ACP/ARE. (Fuente: Andritz)

La altura que debe suministrar la bomba es de 47.94 metros. Dado el gran caudal que puede proporcionar una bomba de esta clase se utilizarán solo dos bombas repartiendo el caudal por igual más una bomba de reserva. Para ello se debe comprobar que la bomba puede funcionar en ese punto (figura 73).

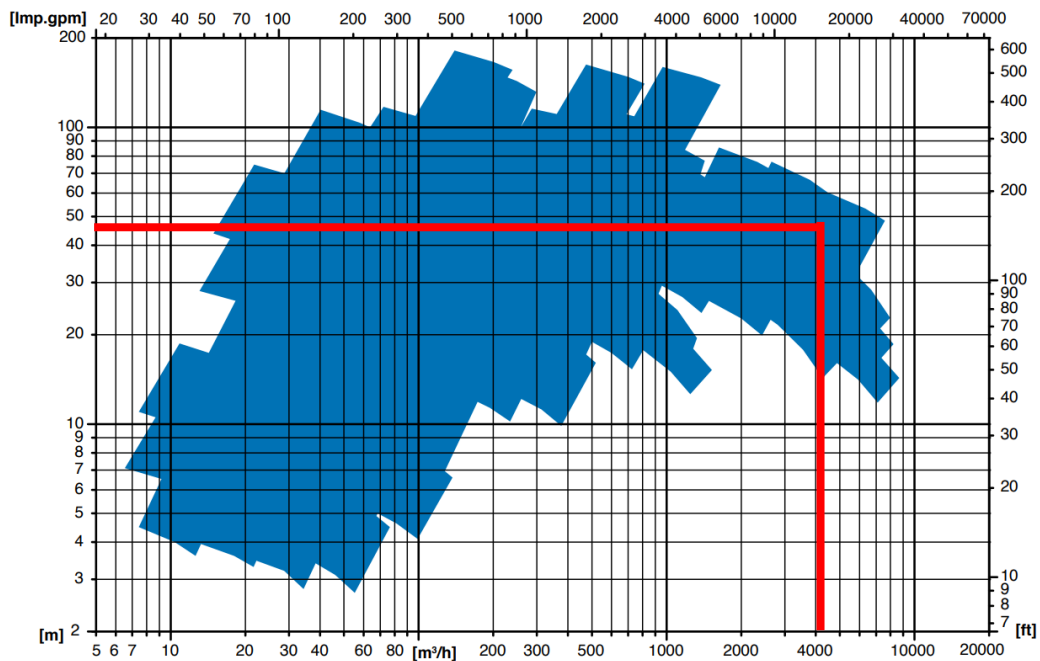


Figura 73. Curvas de funcionamiento bomba Andritz ACP/ARE. (Fuente: Andritz)

El caudal que atraviesa el recuperador de energía es de 8402.78 m³/h y por lo tanto cada bomba tendrá que impulsar 4201.39 m³/h. Para esta bomba no se proporciona las revoluciones de

trabajo de la bomba pero se puede estimar un número específico de revoluciones adimensional mayor a 0.5 con lo seguiría siendo una bomba lenta de rodete radial como se puede observar en la figura 72.

5.8 Consumo eléctrico de los equipos.

A continuación, se calculará la potencia y consumo eléctrico de las bombas de cada etapa de la planta. Se hará utilizando los parámetros de las bombas seleccionadas. Al final del apartado se mostrará los consumos resumidos además de una comparación mediante un gráfico.

5.8.1 Bombas captación

Según la selección de equipos realizada en el apartado anterior, habrá 26 bombas con una altura de 10.57 m y un caudal 605.91 m³/h. Pero para que el caudal sea uniforme en todas las bombas, se dividirá el caudal total entre 26.

$$Q = \frac{15\,277.78 \frac{m^3}{h}}{26} = 587.61 \frac{m^3}{h}$$

Una vez con estos datos, se calculará la potencia de la bomba.

$$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H = 1027.39 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{587.61 \frac{m^3}{h}}{3600} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 10.57 m = 17.39 kW$$

P: potencia de bombeo

ρ : densidad del agua

Q: caudal de la bomba

g: aceleración de la gravedad

H: altura de la bomba

Ahora, aplicando el rendimiento total de la bomba se obtiene la potencia de accionamiento. El fabricante de la bomba escogida no proporciona la curva de rendimiento de todas las bombas. Sin embargo, las bombas de alto rendimiento del fabricante tienen un rendimiento entre el 70%

y el 90% en la zona de funcionamiento. Con esta información y tomando como referencia otras bombas similares de otros fabricantes se ha tomado un rendimiento del 80%.

$$P_a = \frac{P}{\eta_t}$$

P_a : Potencia de accionamiento

P : potencia útil

η_t : rendimiento total de la bomba

$$P_a = \frac{17.39 \text{ kW}}{0.80} = 21.74 \text{ kW}$$

Y aplicando el rendimiento del motor se obtiene la potencia consumida.

$$P_m = \frac{P_a}{\eta_t}$$

P_m : Potencia del motor

P_a : Potencia de accionamiento

η_t : rendimiento total del motor

$$P_m = \frac{21.74 \text{ kW}}{0.95} = 22.89 \text{ kW}$$

Finalmente, las 26 bombas de la etapa de captación consumirán lo siguiente.

$$P = 26 \cdot 22.89 \text{ kW} = 595.07 \text{ kW}$$

5.8.2 Bombas pretratamiento

Según la selección de equipos realizada en el apartado anterior, habrá 22 bombas con una altura de 58.60 m y un caudal 700 m³/h. Sin embargo, para que todas las bombas tengan el mismo caudal se dividirá el caudal total entre las 22 bombas.

$$Q = \frac{15\,277.78 \frac{m^3}{h}}{22} = 694.44 \frac{m^3}{h}$$

Ahora se calculará la potencia de la bomba

$$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H = 1027.39 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{694.44 \frac{m^3}{h}}{3600} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 58.60 m = 113.93 kW$$

De la misma forma que antes, se calculará la potencia de accionamiento de cada bomba tomando un rendimiento del 85%, ya que existe una bomba muy similar del fabricante que en esas condiciones tiene ese rendimiento.

$$P_a = \frac{P}{\eta_t}$$

P_a : Potencia de accionamiento

P : potencia útil

η_t : rendimiento total de la bomba

$$P_a = \frac{113.93 kW}{0.85} = 134.04 kW$$

Y a continuación se calcula la potencia del motor eléctrico con un rendimiento del 95%.

$$P_m = \frac{P_a}{\eta_t}$$

P_m : Potencia del motor

P_a : Potencia de accionamiento

η_t : rendimiento total del motor

$$P_m = \frac{134.04 \text{ kW}}{0.95} = 141.09 \text{ kW}$$

El consumo total de las 22 bombas será el siguiente.

$$P_t = 22 \cdot 141.09 \text{ kW} = 3104.06 \text{ kW}$$

5.8.3 Bombas ósmosis inversa

Según la selección de equipos realizada en el apartado anterior, habrá 26 bombas con una altura de 664.77 m y un caudal 238 m³/h. Sin embargo, para que todas las bombas tengan el mismo caudal se dividirá el caudal entre las 29 bombas. Hay que tener en cuenta que el caudal que pasará por estas bombas no será el total captado, ya que una parte de este irá a la recuperación de energía y la otra parte, 6875 m³/h irá a las bombas principales de la ósmosis inversa.

$$Q = \frac{6875 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{29} = 237.07 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Ahora se calculará la potencia de la bomba

$$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H = 1027.39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{237.07 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{3600} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 664.77 \text{ m} = 441.21 \text{ kW}$$

De la misma forma que antes, se calculará la potencia de accionamiento de cada bomba. El fabricante anuncia que este tipo de bombas pueden llegar hasta un 90% de rendimiento, además en otras bombas del fabricante parecidas a la escogida se observa que el rendimiento se encuentra entre el 80% y el 90% en el rango de funcionamiento. Por lo tanto, se tomará un rendimiento del 85%.

$$P_a = \frac{P}{\eta_t}$$

P_a : Potencia de accionamiento

P : potencia útil

η_t : rendimiento total de la bomba

$$P_a = \frac{441.21 \text{ kW}}{0.85} = 519.07 \text{ kW}$$

Y a continuación se calcula la potencia del motor eléctrico con un rendimiento del 95%.

$$P_m = \frac{P_a}{\eta_t}$$

P_m : Potencia del motor

P_a : Potencia de accionamiento

η_t : rendimiento total del motor

$$P_m = \frac{519.07 \text{ kW}}{0.95} = 546.39 \text{ kW}$$

El consumo total de las 29 bombas será el siguiente.

$$P_t = 29 \cdot 546.39 \text{ kW} = 15\,845.37 \text{ kW}$$

5.8.4 Bombas booster

Según la selección de equipos realizada en el apartado anterior, habrá 2 bombas con una altura de 47.92 m y un caudal 4200 m³/h. Sin embargo, para que ambas las bombas tengan el mismo caudal se dividirá el caudal total entre las dos. El caudal que pasará por estas bombas será el que provenga de la recuperación de energía, 8402.78 m³/h.

$$Q = \frac{8402.78 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{2} = 4201.39 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Ahora se calculará la potencia de la bomba

$$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H = 1027.39 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{4201.39 \frac{m^3}{h}}{3600} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 47.92 m = 563.69 kW$$

Siguiendo la metodología anterior, se calculará la potencia de accionamiento de cada bomba tomando un rendimiento del 85%, ya que el fabricante asegura un rendimiento máximo de hasta el 90% y al tratarse de una bomba de gran potencia los rendimientos tienden a estar muy optimizados.

$$P_a = \frac{P}{\eta_t}$$

P_a : Potencia de accionamiento

P : potencia útil

η_t : rendimiento total de la bomba

$$P_a = \frac{563.69 kW}{0.85} = 663.16 kW$$

Y a continuación se calcula la potencia del motor eléctrico con un rendimiento del 95%.

$$P_m = \frac{P_a}{\eta_t}$$

P_m : Potencia del motor

P_a : Potencia de accionamiento

η_t : rendimiento total del motor

$$P_m = \frac{663.16 kW}{0.95} = 698.06 kW$$

El consumo total de las 2 bombas será el siguiente.

$$P_t = 2 \cdot 698.06 \text{ kW} = 1396.12 \text{ kW}$$

5.8.5 Resumen de consumos

Finalmente, con todas las potencias de las bombas, se puede comparar el consumo de cada etapa ver que repercusión tiene en el consumo de la planta. Estos datos están representados en la figura 74 y la tabla 5.

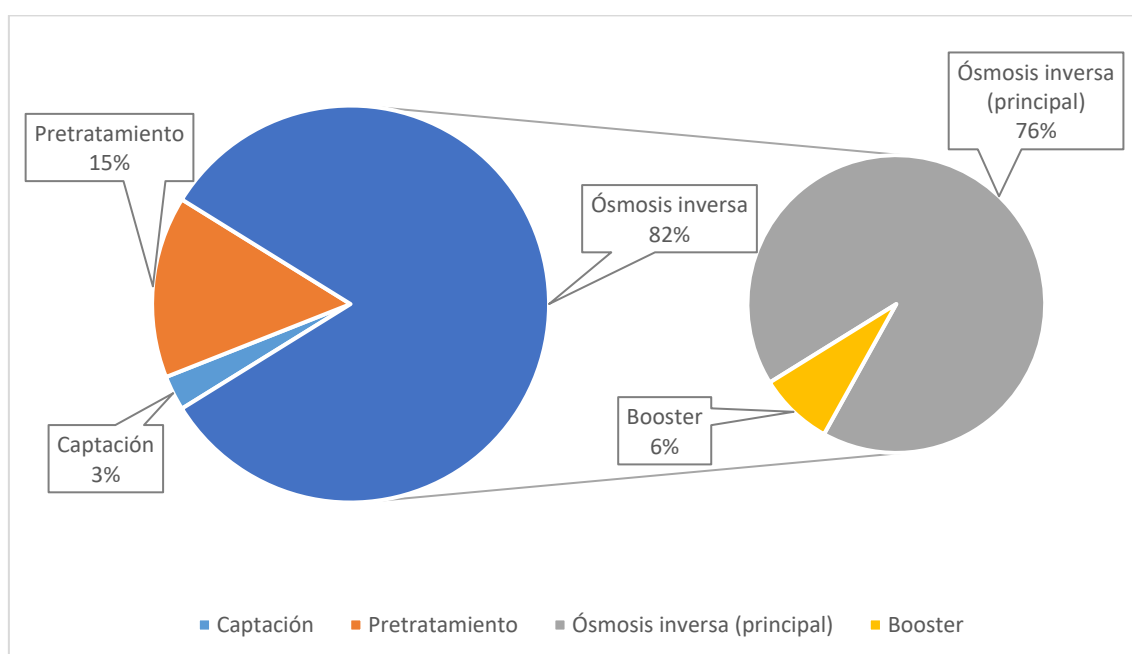


Figura 74. Gráfico distribución consumos. (Fuente: elaboración propia)

Etapas	Potencia total (kW)	Potencia diaria (kWh)	Potencia necesaria (kWh/m ³)	Porcentaje
Captación	595.07	14 281.72	0.09	3%
Pretratamiento	3104.06	74 497.53	0.45	15%
Ósmosis inversa	15 845.37	380 288.96	2.30	76%
Booster	1396.13	33 507.05	0.20	7%
TOTAL	20 940.64	502 575.26	3.05	100%

Tabla 5. Consumos por etapas. (Fuente elaboración propia)

6. Conclusión

El objetivo del proyecto era diseñar los equipos de bombeo y recuperadores para una planta desaladora, y finalmente se ha conseguido alcanzar un diseño para estos equipos en una planta desaladora proyectada en Escombreras, Murcia.

Para el diseño se han tenido que tener en cuenta numerosos factores como la profundidad del mar y la altura de la parcela para la captación, las condiciones del agua como la temperatura y salinidad para determinar la presión de trabajo, los filtros para determinar la pérdida de carga y el tipo de recuperador para la configuración de la instalación hidráulica entre otros.

Este diseño resultó en 26 bombas verticales sumergibles para la captación, 22 bombas de eje horizontal para el pretratamiento, 29 bombas de alta presión de eje horizontal para la ósmosis inversa y 2 bombas booster de gran caudal. Además, se han incluido cámaras de intercambio de presión como equipos recuperadores de energía. Con todo esto se consigue un consumo eléctrico de las bombas de 3.05 kWh/m³, el cual concuerda con el consumo de las desaladoras actuales.

A continuación de este documento, se encontrarán el presupuesto, estudio de sostenibilidad, pliego de condiciones y planos.

7. Bibliografía

- “Sistemas de captación en desaladoras de agua de mar. Tomas abiertas.” Mario de Miguel Bello, 7 de junio 2016.
- “El agua. Desalación. Capítulo 8: Captación de agua.” Antonio Ros Moreno, 13 de junio 2016.
- “Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano.” Ministerio de sanidad y política social, 2009.
- “Análisis de Configuraciones del proceso O.I. en desalación.” Befesa Agua.
- “La importancia de los sistemas de recuperación de energía en la desalación de aguas en Canarias.” Baltasar Peñate Suárez, 25 de julio 2016.
- “Turbina Francis”. Pedro Fernández Díez.
- “Captación de agua: tenemos en cuenta sus necesidades.” Sulzer.
- Geoportal espacios naturales protegidos, Europarc España.
- PORTUS, Puertos del Estado.
- “Descripción oceanográfica del litoral de la región de Murcia.” Servicio de información oceanográfica de la región de Murcia.
- “Impacto ambiental de la salmuera de rechazo de las plantas desalinizadoras y su posible solución.” Hugo Gilarranz Municio, 18 de febrero 2014.
- “Efecto Venturi.” María Sánchez Galán, 26 de noviembre 2015.
- “Venturi - Estudio de los difusores Venturi en vertidos de salmuera.” Instituto tecnológico de Canarias.
- Catálogo de bombas Andritz.
- Catálogo de bombas Grundfos.
- “Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018.” World Water Development Report, 2018.

- “La desalinización en España.” España, technology for life, enero 2017
- “¿Puede la desalinización ser la solución para la crisis mundial del agua?” Alejandra Martins, 22 de marzo 2017.
- “La situación actual de la desalinización.” Juan Carlos García.
- “Los promotores de las dos nuevas desaladoras reciben peticiones para 100 hm³.” Manuel Buitrago, 18 de febrero 2018.
- “World Population Prospects.” Naciones unidas, revisión 2017
- “Mejora de la Eficiencia Energética en la Reforma de Plantas Desaladoras. Un Compromiso de Sostenibilidad - II Seminario Internacional de Desalación en Antofagasta.” Bartolomé Marín Fernández y Eva Arnaiz García, 2010.
- “Recuperación energía mediante turbinado de salmuera en plantas desaladoras.” Elena Crespo Olazábal (Acciona Agua), octubre 2017.
- “Tema 8. Pérdidas de carga localizadas o accidentales.” Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real.
- “Las infraestructuras del agua españolas en números.” Locken, 11 de julio 2017.
- “Agua y sal: La historia de la desalación.” Águeda García de Durango, 23 de octubre 2015.



PRESUPUESTO

Índice

	Pag.
1.Introducción	109
2.Coste de los equipos	110
3.Coste de operación del bombeo	112
3. Simulaciones tarifa electricidad	115
4. Bibliografía	117

1. Introducción

En este documento se calculará el presupuesto de los equipos de bombeo seleccionados, además se hallará el coste del agua desalada debido únicamente al consumo eléctrico de equipos de bombeo. No se podrá determinar un precio final del agua desalada ya que en este proyecto no se ha diseñado la planta completa y por lo tanto no se conocen los costes de los demás equipos y gastos de la planta desaladora. Sin embargo, se utilizarán otros datos como referencia para aproximar el precio final del agua.

2. Coste de los equipos

En este apartado se realizará el presupuesto de los equipos seleccionados. Debido a que el fabricante Andritz no proporciona el precio de sus bombas, se utilizarán como referencia las bombas de la marca Grundfos. Para ello se muestran en la tabla 6 las bombas seleccionadas y las bombas de referencia para el precio, además de sus alturas y caudales.

Etapas	Tipo de bomba	Altura (m)	Caudal (m ³ /h)	Bomba referencia	Altura (m)	Caudal (m ³ /h)
Captación	SAT 200-380	10.57	587.61	NB 150-200/216-176	32	650
Pretratamiento	S 125-400	58.60	694.44	NB 125-250/263	86	500
Ósmosis inversa	MPE 125.1	665.02	237.07	NB 80-315/328	160	220
Booster	ACP/ARE	47.94	4201.39	NB 150-250/235	46	900

Tabla 6. Bombas escogidas y bombas de referencia. (Fuente: datos del catálogo Grundfos 2018, elaboración propia)

En la tabla 7 se muestran las relaciones de altura y caudal entre la bomba escogida y la de referencia, también se muestra el precio de la bomba de referencia y el multiplicador escogido según las relaciones para determinar el precio de la bomba escogida.

Etapas	Relación de alturas	Relación de caudales	Precio bomba de referencia	Multiplicador	Precio bomba escogida
Captación	0.33	0.90	14 475.00 €	0.8	11 580.00 €
Pretratamiento	0.68	1.39	26 626.00 €	1	26 626.00 €
Ósmosis inversa	4.16	1.08	26 246.00 €	3	78 738.00 €
Booster	1.04	4.67	27 688.00 €	3.5	96 908.00 €

Tabla 7. Relaciones y precios bombas escogidas y de referencia. (Fuente: datos del catálogo Grundfos 2018, Elaboración propia)

Una vez se han fijado los precios de cada bomba, se calculará el precio de las bombas de cada etapa y coste total de las bombas. Estos datos se muestran en la tabla 8.

Etapa	Tipo de bomba	Precio unidad	Nº de bombas	Precio total
Captación	SAT 200-380	11 580.00 €	28	324 240.00 €
Pretratamiento	S 125-400	26 626.00 €	24	639 024.00 €
Ósmosis inversa	MPE 125.1	78 738.00 €	31	2 440 878.00 €
Booster	ACP/ARE	96 908.00 €	3	290 724.00 €
Total	-	-	86	3 694 866.00 €

Tabla 8. Coste bombas por etapa y total. (Fuente: elaboración propia)

El coste total de todas las bombas es de 3 694 866 €. Gran parte de este coste es debido a las bombas de alta presión para la etapa de ósmosis inversa, representa dos tercios del coste total de las bombas. La siguiente etapa de mayor coste es el pretratamiento que supone un sexto del coste. Y finalmente, las bombas de captación y las bombas booster tienen un coste similar cercano al 10%. Estas suponen un menor coste ya que la captación no tiene que proporcionar una gran presión, únicamente un gran caudal, y las bombas booster la tienen que proporcionar una pequeña diferencia de presión, pero solo para el 55% del caudal captado.

En la figura 75 se representan los costes de las diferentes bombas.

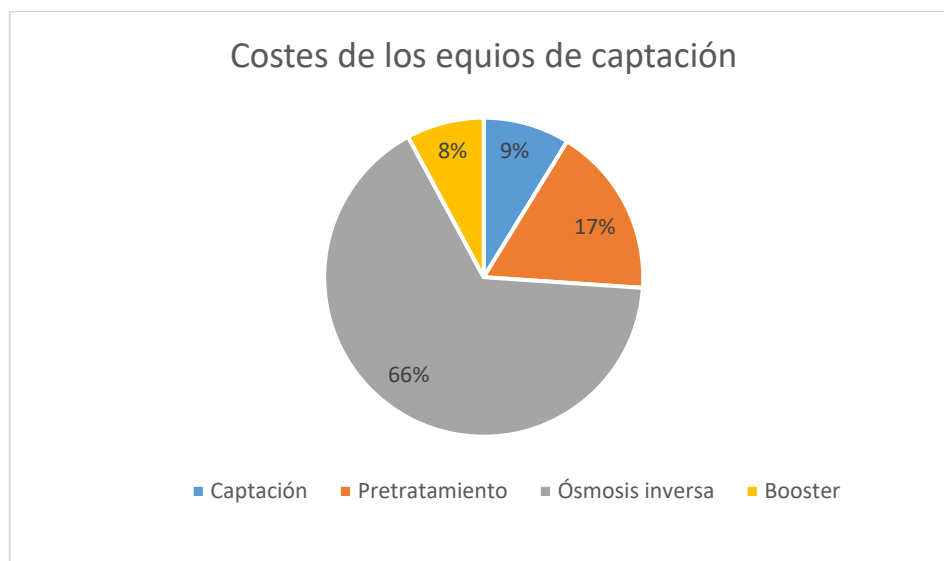


Figura 75. Coste de las bombas de la planta. (Fuente: elaboración propia)

3. Coste de operación del bombeo

A continuación, se calculará el coste de funcionamiento que tendrán los equipos de bombeo debido al consumo eléctrico. Para ello se partirá de la potencia necesaria y el consumo diario total, que son 20 940.64 kW y 502 575.26 kWh respectivamente. Para calcular el coste mensual que supone este consumo eléctrico se ha utilizado el simulador de tarifas de Aura Energía que cuenta con una sección específica para la industria y la Península, aplica la tarifa 6.1.

La interfaz que se muestra es la representada en la figura 76.

Figura 76. Simulador tarifa luz para industria en la Península. (Fuente: Aura Energía)

Los datos de entrada que necesita son la potencia y el consumo en las diferentes franjas horarias. Estas franjas horarias cambian según el mes del año, la empresa proporciona esta distribución en la figura 77.

Tarifa 6.1A



Figura 77. Distribución tarifas horarias. (Fuente: Aura Energía)

Se ha ejecutado el simulador para las seis diferentes distribuciones posibles de franjas horarias. Para ello, dado que la planta trabajará las 24 horas del día, se ha dividido la potencia consumida al día entre la fracción de horas de cada tarifa. Con ello se han obtenido los precios mostrados en la tabla 9.

Período	Precio
Enero, febrero y diciembre	1 806 413.07 €
Marzo y noviembre	1 364 594.71 €
Abril, mayo y octubre	1 238 455.18 €
1 al 14 de junio y septiembre	1 364 594.71 €
15 al 30 de junio y julio	1 664 866.06 €
Agosto	1 090 384.44 €
Total año	17 498 369.77 €

Tabla 9. Precios consumo eléctrico. (Fuente: datos de Aura Energía, elaboración propia)

Los precios obtenidos varían entre 1.09 millones de euros y 1.81 millones de euros al mes. Al año supone un coste de 17.5 millones de euros con una media de 1.46 millones de euros. Con estos datos se puede calcular cual será el coste del metro cúbico de agua desalada debido únicamente al consumo eléctrico. En la tabla 10 se muestran estos costes.

Volumen desalado al día (m³)	165 000
Volumen desalado al mes (m³)	4 950 000
Volumen desalado al año (m³)	60 225 000
Coste consumo eléctrico al año (€)	17 498 369.77
Coste medio del m³ debido al consumo eléctrico (€)	0.29
Coste máximo del m³ debido al consumo eléctrico (€)	0.36
Coste mínimo del m³ debido al consumo eléctrico (€)	0.22

Tabla 10. Costes agua desalada. (Fuente: elaboración propia)

La repercusión del consumo eléctrico en el precio del agua varía entre 22 y 36 céntimos de euro dependiendo del mes. Como media se sitúa en 29 céntimos de euros por metro cúbico.

Por otro lado, aunque no se haya podido determinar un precio final del agua desalada, si se conoce que el precio que suele tener el agua desalada es de alrededor de 80 céntimos de euro por metro cúbico. En la tabla 11 se muestra la distribución de los costes del agua.

Concepto	Coste (€/m³)	Contribución
Energía eléctrica	0.27	32%
Inversión	0.38	45%
Mantenimiento y mano de obra	0.1	12%
Aditivos	0.05	6%
Reposición de membranas	0.04	5%
Total	0.84	100%

Tabla 11. Distribución de los costes del agua desalada. (Fuente: Las técnicas de desalación y sus costes, de J. M. Cámara Zapata y M. A. Melián Navarro, y elaboración propia)

Estos valores sirven como orientación para prever el precio que podría tener la planta proyectada. Hay que tener en cuenta que los valores de la tabla 6 están calculados con un precio más bajo de la electricidad (0.05 €/kWh) y otro consumo. En cuanto a la inversión está calculado para un período de amortización de 15 años y un interés del 5%. El precio final, por lo tanto, podrá variar dependiendo de los diferentes factores. Sin embargo, se puede tomar 0.85 €/m³ como referencia para la desaladora proyectada.

Si se compara el precio del agua desalada que se ha obtenido, 0.85 €/m³ con el precio del agua procedente del Traspase Tajo-Segura, 0.10 €/m³, es evidente porque los regantes prefieren el agua del trasvase. Sin embargo, el precio tan bajo del trasvase es debido a grandes subvenciones y diferentes políticas. A pesar de que el agua desalada recibe subvenciones bajando el precio del agua a los 0.5 € aproximadamente, no son suficientes como para que los regantes se decanten por ella. Por ello es importante que se apoye más el agua desalada y no se priorice los trasvases ya que tienen unas consecuencias medioambientales muy negativas.

3. Simulaciones tarifa electricidad

A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones del coste de la electricidad mensual.

Término de Potencia	
Potencia P1: 20941 kW * 3,261610 €/kW/mes	68,301,38 €
Potencia P2: 20941 kW * 1,632219 €/kW/mes	34,180,30 €
Potencia P3: 20941 kW * 1,194523 €/kW/mes	25,014,51 €
Término de Energía	
Consumo P1: 3769314 kWh * 0,119717 €/kWh	451,250,96 €
Consumo P2: 6282191 kWh * 0,104729 €/kWh	657,927,58 €
Consumo P3: 5025753 kWh * 0,095880 €/kWh	481,869,20 €
Consumo P4: 0 kWh * 0,084906 €/kWh	0,00 €
Consumo P5: 0 kWh * 0,079571 €/kWh	0,00 €
Consumo P6: 0 kWh * 0,068045 €/kWh	0,00 €
Impuesto Eléctrico (5,1127%)	87869,15 €
PRECIO TOTAL	1,806,413,07 €

Figura 78. Simulación coste consumo eléctrico enero, febrero y diciembre. (Fuente: Aura Energía)

Término de Potencia	
Potencia P3: 20941 kW * 1,194523 €/kW/mes	25,014,51 €
Potencia P4: 20941 kW * 1,194523 €/kW/mes	25,014,51 €
Potencia P6: 20941 kW * 0,545006 €/kW/mes	11,412,97 €
Término de Energía	
Consumo P2: 0 kWh * 0,104729 €/kWh	0,00 €
Consumo P3: 3769314 kWh * 0,095880 €/kWh	361,401,83 €
Consumo P4: 6282191 kWh * 0,084906 €/kWh	533,395,71 €
Consumo P5: 0 kWh * 0,079571 €/kWh	0,00 €
Consumo P6: 5025753 kWh * 0,068045 €/kWh	341,977,36 €
Impuesto Eléctrico (5,1127%)	66377,83 €
PRECIO TOTAL	1,364,594,71 €

Figura 79. Simulación coste consumo eléctrico marzo y noviembre. (Fuente: Aura Energía)

Término de Potencia	
Potencia P5: 20941 kW * 1,194523 €/kW/mes	25,014,51 €
Potencia P6: 20941 kW * 0,545006 €/kW/mes	11,412,97 €
Término de Energía	
Consumo P2: 0 kWh * 0,104729 €/kWh	0,00 €
Consumo P3: 0 kWh * 0,095880 €/kWh	0,00 €
Consumo P4: 0 kWh * 0,084906 €/kWh	0,00 €
Consumo P5: 10051505 kWh * 0,079571 €/kWh	799,808,30 €
Consumo P6: 5025753 kWh * 0,068045 €/kWh	341,977,36 €
Impuesto Eléctrico (5,1127%)	60242,04 €
PRECIO TOTAL	1,238,455,18 €

Figura 80. Simulación coste consumo eléctrico abril, mayo y octubre. (Fuente: Aura Energía)

Diseño y dimensionamiento de los equipos de bombeo y recuperadores energéticos de una planta desaladora de ósmosis inversa

Término de Potencia	
Potencia P3: 20941 kW * 1,194523 €/kW/mes	25,014,51 €
Potencia P4: 20941 kW * 1,194523 €/kW/mes	25,014,51 €
Potencia P6: 20941 kW * 0,545006 €/kW/mes	11,412,97 €
Término de Energía	
Consumo P2: 0 kWh * 0,104729 €/kWh	0,00 €
Consumo P3: 3769314 kWh * 0,095880 €/kWh	361,401,83 €
Consumo P4: 6282191 kWh * 0,084906 €/kWh	533,395,71 €
Consumo P5: 0 kWh * 0,079571 €/kWh	0,00 €
Consumo P6: 5025753 kWh * 0,068045 €/kWh	341,977,36 €
Impuesto Eléctrico (5,1127%)	66377,83 €
PRECIO TOTAL	1,364,594,71 €

Figura 81. Simulación coste consumo eléctrico 1 al 14 de junio y septiembre. (Fuente: Aura Energía)

Término de Potencia	
Potencia P1: 20941 kW * 3,261610 €/kW/mes	68,301,38 €
Potencia P2: 20941 kW * 1,632219 €/kW/mes	34,180,30 €
Potencia P6: 20941 kW * 0,545006 €/kW/mes	11,412,97 €
Término de Energía	
Consumo P1: 5025753 kWh * 0,119717 €/kWh	601,668,07 €
Consumo P2: 5025753 kWh * 0,104729 €/kWh	526,342,09 €
Consumo P3: 0 kWh * 0,095880 €/kWh	0,00 €
Consumo P4: 0 kWh * 0,084906 €/kWh	0,00 €
Consumo P5: 0 kWh * 0,079571 €/kWh	0,00 €
Consumo P6: 5025753 kWh * 0,068045 €/kWh	341,977,36 €
Impuesto Eléctrico (5,1127%)	80983,9 €
PRECIO TOTAL	1,664,866,06 €

Figura 82. Simulación coste consumo eléctrico 15 al 30 de junio y julio. (Fuente: Aura Energía)

Término de Potencia	
Potencia P6: 20941 kW * 0,545006 €/kW/mes	11,412,97 €
Término de Energía	
Consumo P2: 0 kWh * 0,104729 €/kWh	0,00 €
Consumo P3: 0 kWh * 0,095880 €/kWh	0,00 €
Consumo P4: 0 kWh * 0,084906 €/kWh	0,00 €
Consumo P5: 0 kWh * 0,079571 €/kWh	0,00 €
Consumo P6: 15077258 kWh * 0,068045 €/kWh	1,025,932,02 €
Impuesto Eléctrico (5,1127%)	53039,45 €
PRECIO TOTAL	1,090,384,44 €

Figura 83. Presupuesto luz mensual agosto. (Fuente: Simulador Aura Energía)

4. Bibliografía

- “Catálogo de precios 2018” Grundfos, 2 de enero 2018.
- “Simulador tarifas de luz.” Aura Energía, <http://simulador.aura-energia.com/simulador/inicio.php>.



ESTUDIO SOSTENIBILIDAD

Índice

	Pag.
1. Introducción	123
2. Valoración de la sostenibilidad	124
2.1 Capital económico	124
2.2 Capital natural	125
2.3 Capital humano	130
2.4 Capital social.....	131
2.5 Distribución intrageneracional.....	131
3. Propuestas para mejorar la sostenibilidad.....	132
4. Bibliografía	133

1. Introducción

En este estudio se observará la sostenibilidad de la desaladora que se está planteando para Escombreras, Murcia. Para algunos puntos se utilizará como referencia la desaladora de Torrevieja, Alicante.

Primero se necesita definir lo que se entiende por sostenibilidad para este proyecto. Se define desarrollo sostenible como “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer las suyas” ³⁹. Para ello la idea principal es tener más recursos y distribuirlos de forma justa. Sin embargo, no se conocen las necesidades de las generaciones futuras, por lo tanto, se ha de garantizar que cuentan con los recursos necesarios para poder cumplirlas. Para ello, se diferencian diferentes tipos de recursos: capital económico, natural, humano y social.

En primer lugar, se observará el impacto de la actividad en cada uno de los capitales. Después se hará un breve inciso sobre la sostenibilidad intrageneracional, y finalmente, se valorarán propuestas para mejorar la sostenibilidad. Todo este recorrido se hará valorando y comparando la planta que se está proyectando en Escombreras con la planta ya en funcionamiento de Torrevieja.

Se ha tomado la desaladora de Torrevieja como referencia ya que es una planta bastante nueva, de gran caudal y con tecnología de ósmosis inversa. Es la planta desaladora más grande de España y de Europa, con una capacidad máxima de producción de 80 hm³ al año. Fue construida en 2009 por un coste de 300 millones de euros, la fase de pruebas comenzó en 2013 y en 2014 se puso en marcha.

³⁹ Definición de WCED, 1987: Our common future.

2. Valoración de la sostenibilidad

A continuación, se realizará una valoración de la sostenibilidad del impacto de la actividad sobre cada uno de los capitales nombrados anteriormente. Además, se hará un pequeño inciso sobre la distribución intrageneracional.

2.1 Capital económico

Dentro del capital económico existen varios aspectos a valorar. En primer lugar, el agua dulce producida por la planta al día. La desaladora proyectada tiene una capacidad máxima de producción de 60 hm³ al año. Lo cual tiene un gran valor debido a la escasez de agua de la zona. Las frecuentes sequías no hacen más que agravar la escasez de agua lo cual aumenta el valor del agua desalada por la planta. Además, la zona de Murcia depende gran parte del trasvase Tajo-Segura el cual se encuentra en niveles bastante bajos. De hecho, desde mayo de 2017 hasta abril de 2018 se cerró el trasvase debido a que llegó al nivel límite a partir del cual se permite trasvasar agua. A pesar de que el precio de agua desalada es mayor que la proveniente del trasvase, es necesaria y se consume.

El coste de capital económico negativo más claro será el coste de construcción de la planta. Tomando como ejemplo la desaladora de Torrevieja, su coste de la obra civil fue de 300 millones de euros. Se podría esperar que la planta que se está proyectando tenga un coste entre los 100 y 200 millones de euros debido a sus similitudes.

Adicionalmente, hay otros costes asociados a la explotación de la planta que contribuyen al capital económico de forma negativa. El más importante es el consumo eléctrico de la planta para desalar el agua. El consumo de las plantas desaladoras es todavía bastante elevado a pesar de las mejoras que ha habido y los equipos de recuperación de energía que se han introducido. El consumo de la planta desaladora proyectada es de 3.05 kWh/m³, teniendo en cuenta el precio por kWh empleado en el documento de presupuesto, el coste debido al consumo eléctrico es de 0.29€/m³ de media. Lo cual resulta en un coste diario de 47 850 €, y al año supone 17.5 millones de euros.

Otro coste económico importante son las subvenciones que el gobierno da para rebajar el precio del agua desalada para que tenga un precio razonable y más competitivo. Concretamente se han destinado 17.3 millones de euros en los últimos tres años a la subvención del agua desalada, aumentando en 4.3 millones en 2017.⁴⁰

⁴⁰ Artículo “El Ministerio de Agricultura aumenta en 4,3 millones la subvención para agua desalada en 2017”. Diciembre 2017.

Finalmente, está el coste de las inversiones destinadas a la ampliación y mejoras de la planta. En el caso de la desaladora de Torrevieja, se anunció que se realizarían mejoras para que pueda alcanzar los 80 hm³/año este verano ya que hasta ahora por limitaciones de la red eléctrica solo podía producir 40 hm³/año.⁴¹ Además, se quiere ampliar la producción de agua hasta los 120 hm³/año en 2020, lo que supondrá una inversión de 45 millones de euros.

2.2 Capital natural

En el capital natural existen varios puntos que se ven afectados por la planta desaladora. El primero es la pérdida de terreno para colocar la planta. En la planta que se está proyectando para Escombreras, la superficie a ocupar será de 40 000 m². Por otro lado, la desaladora de Torrevieja ha ocupado una superficie de 70 000 m². Además, puede suponer un gran impacto visual.

En la figura 84 se observa el impacto visual de la construcción de la desaladora de Torrevieja.



Figura 84. Fotografía antes y después de construir la planta de Torrevieja. (Fuente: La desaladora de Torrevieja. ¿Efectos nocivos para la flora y fauna marina? ¿Es necesaria y económicamente rentable? (1), Acciona Agua (2))

Otro aspecto a tener en cuenta con la superficie ocupada son los espacios protegidos. Para ello se ha consultado el mapa de espacios protegidos publicado en el geoportal.

En la figura 83 se puede observar los espacios protegidos de la zona de Escombreras y la situación de la desaladora proyectada marcada en rojo.

⁴¹ Artículo “La desalinizadora de Torrevieja triplicará su producción de 40 a 120 hectómetros al año”, ABC. Marzo 2018.



Figura 85. Espacios protegidos cercanos a Escombreras. (Fuente: Geoportal y elaboración propia)

Como se puede apreciar la ubicación que se ha escogido para la desaladora no se encuentra en ningún espacio protegido y el más cercano se encuentra a 10 kilómetros de distancia. Por lo tanto, estos no se verán afectados durante la construcción de la planta ni tampoco durante su funcionamiento.

Sin embargo, el mayor impacto en el capital natural que tiene la desaladora no está en lo que se ve, sino en lo que no se ve y es el vertido de la salmuera. Las plantas desaladoras por ósmosis inversa tienen una conversión de aproximadamente el 45%, lo cual quiere decir que, de cada 100 litros captados, 45 son desalados y convertidos en agua dulce. Los 55 litros restantes se convierten en un fluido hipersalino denominado salmuera, que es agua con una concentración muy alta de sales. La salmuera se vierte con unos difusores al mar. Sin embargo, si no se estudia adecuadamente la zona y no se distribuye bien, la salmuera puede tener un gran impacto en el ámbito marino. Por ello se debe verter en una zona con grandes corrientes marinas para que se diluya más fácilmente. Si no se diluye, debido a la mayor densidad de la salmuera, está se acumulará en el fondo marino causando graves daños al ecosistema. Por ello, es muy aconsejable utilizar difusores Venturi u otros dispositivos para la descarga en chorro a elevadas profundidades, con el fin de maximizar la dilución.

En el caso de Torrevieja, en un principio se decidió poner el vertido en el dique de levante, como se puede observar en la figura 86.

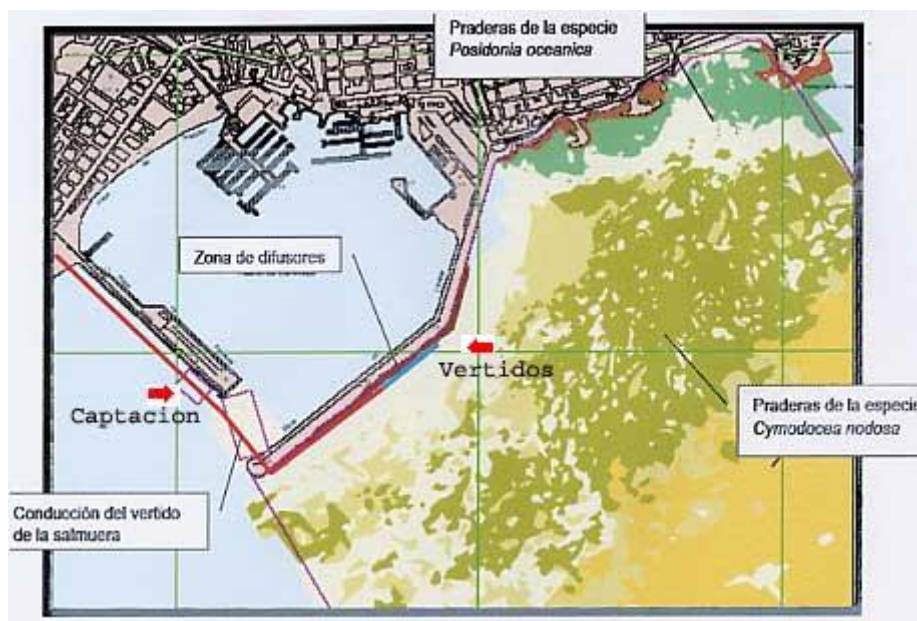


Figura 86. Vertido salmuera. (Fuente: Acuamed, Sociedad estatal de aguas de la cuenca mediterránea)

Como se puede ver en la figura anterior el vertido está muy cerca de las praderas de dos especies, la más cercana es la pradera de posidonias que se encuentra a tan solo 600 metros. Finalmente se decidió cambiar el lugar del vertido de la salmuera a un punto colocado a 3 km de la costa para reducir el impacto ambiental. Adicionalmente, un grupo de buzos revisa regularmente el estado del vertido y se revisan la saturación de sales.

Otro aspecto a tener en cuenta es la contaminación producida por la planta. Si bien es cierto que una planta desaladora no contamina directamente más allá de la salmuera o los desechos de los productos químicos utilizados en el pretratamiento y en las operaciones de lavado de filtros y membranas, hay que tener en cuenta la procedencia de la energía eléctrica con la que se alimenta la planta.

En España la demanda eléctrica se cubre en un 96.4% con energía de producción nacional y el 3.6% restante es importada a otros países principalmente a Francia. En cuanto a la energía producida en España en 2017 tan solo el 33.7% fue de origen renovable, lo que supuso una bajada frente a los años anteriores. En la figura 87 se puede ver la distribución de la producción de energía a lo largo de los últimos años.⁴²

⁴² Informe del sistema Eléctrico Español 2017

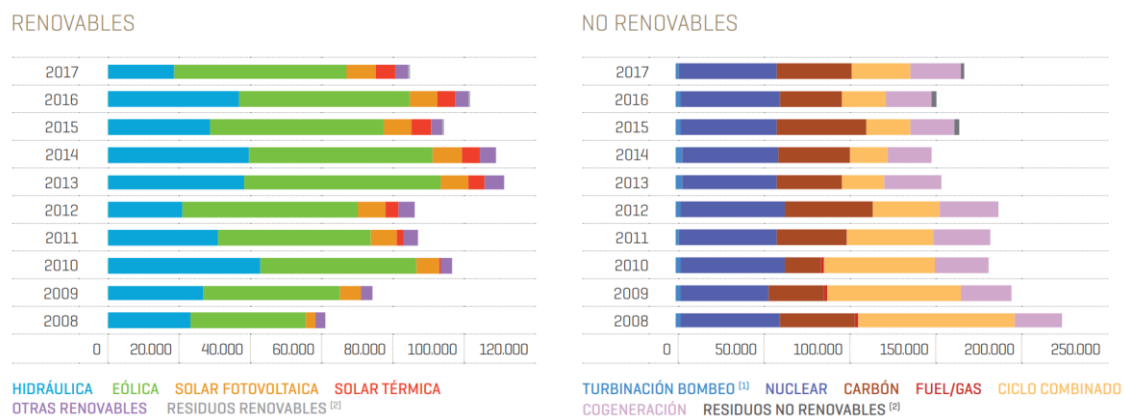


Figura 87. Distribución de la energía eléctrica en GWh. (Fuente: Informe del sistema Eléctrico Español 2017)

Observando el gráfico se aprecia un descenso de la producción de energía renovables debido principalmente a la menor producción hidráulica, que se redujo en un 49.1% respecto a 2016. Esta energía se suplió con fuentes no renovables, principalmente con carbón y ciclos combinados. Toda esta distribución de la producción habrá que tenerla en cuenta ya que afecta a la desaladora indirectamente. Debido a que con cada kWh que consume, la planta repercute en la contaminación de las energías no renovables. Sin embargo, no es fácil identificar o cuantificar el impacto que tiene la planta al tratarse de una contaminación tan indirecta, pero sí está claro que afecta al capital natural de forma negativa.

Una consecuencia positiva de la desaladora para el capital natural es la menor dependencia y explotación de los trasvases. La utilización de estos trasvases perjudica las cuencas hidrológicas de donde se extrae el agua. En el caso del Traspase del Tajo-Segura, que es el que abastece la parte de la costa mediterránea y en gran parte a los regantes de Murcia, los embalses de los que se abastece se han reducido considerablemente, llegando a niveles muy bajos a finales de 2017 hasta tan solo un 9% de su capacidad, teniendo que cerrar el trasvase durante 11 meses. Actualmente, en julio de 2018, los embalses han aumentado considerablemente su nivel gracias a las lluvias de este año, llegando ambos hasta los 351 hm³ el 2 de julio de 2018. Sin embargo, los embalses de Entrepeñas y Buendía, a pesar de este aumento, solo se encuentran al 42.04% y 21.42% de su capacidad respectivamente.⁴³

El efecto que tiene el Traspase del Tajo-Segura se ve claramente en la figura 88 que compara el estado del Tajo entre los años 2011 y 2015.

⁴³ Datos de embalses.net



Figura 88. Comparación del estado del embalse de Entrepeñas 2011-2015. (Fuente: artículo “El Gobierno autoriza un nuevo trasvase de 10 hm3 con la cabecera del Tajo agonizando”, septiembre 2015)

Por lo tanto, el uso de las desaladoras ayudaría a reducir la explotación de los trasvases, reduciendo así las consecuencias de esta actividad, con ello el capital natural se verá beneficiado.

Otro beneficio en el capital natural debido a la construcción de la desaladora sería una menor explotación de los acuíferos. Estos suelen ser la fuente para el riego. En la zona de Murcia muchos de los acuíferos se encuentran sobreexplotados, lo cual provoca otros problemas como la intrusión marina debido a su cercanía con el mar.

En la figura 89 se representa la situación de los acuíferos de la zona.

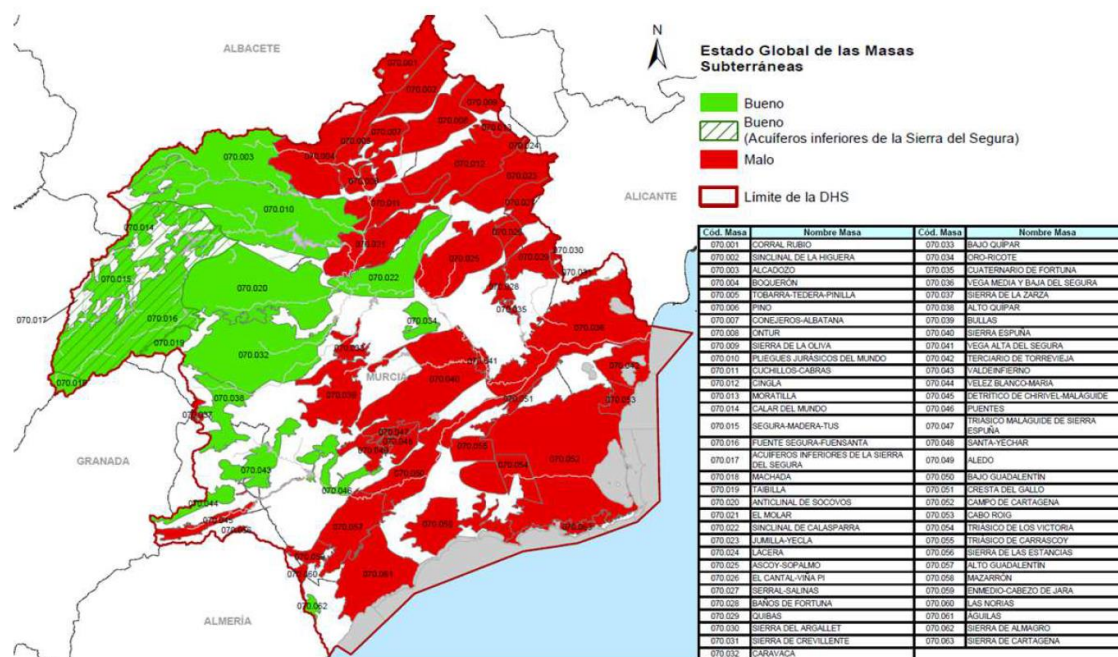


Figura 89. Estado de los acuíferos de la Demarcación hidrográfica del Segura. (Fuente: plan hidrológico de la demarcación del Segura 2015/21)

Como se puede ver en la figura anterior la mayoría de los acuíferos se encuentran en mal estado. Con la construcción de la desaladora se ayudaría a reducir el estrés hídrico de los acuíferos beneficiando por lo tanto al capital natural.

2.3 Capital humano

El principal capital humano son los puestos de trabajo que la planta genera. En un primer momento para la construcción de la planta se crearán una gran cantidad de puestos de trabajo. Después se generarán otros puestos para el mantenimiento, seguridad y gestión de la planta. También contribuye al capital humano positivamente debido a la formación que reciben los trabajadores de la desaladora.

Otro aspecto que beneficia al capital humano es el aumento del know-how de la empresa constructora y de mantenimiento, en el caso de la desaladora de Torrevieja fue Acuamed. Este proyecto supuso un gran incremento de los conocimientos y prestigio de la empresa ya que la de Torrevieja es la desaladora más grande de Europa.

2.4 Capital social

En el capital social se podría incluir la pérdida de ese terreno para otra posible construcción para el uso de los habitantes. Sin embargo, la desaladora proyectada se encuentra en un polígono industrial por lo que no supondría una pérdida en ese aspecto. En cambio, la planta de Torrevieja sí se encuentra cerca de una zona residencial próxima a la costa, por lo que sí que se hubiese podido utilizar el espacio para construir viviendas por ejemplo.

Una aportación positiva al capital social sería la participación de accionistas y la colaboración entre las distintas instituciones implicadas en todo el proyecto de la desaladora, desde su planificación previa a la construcción hasta la operación y mantenimiento.

2.5 Distribución intrageneracional

La distribución es un aspecto importante a valorar. En primer lugar, el efecto para las generaciones presentes es claramente positivo debido a la disponibilidad de agua en una zona con problemas de escasez y sequía frecuentes. Sin embargo, el impacto sobre el capital natural no tiene un efecto tan inmediato como para que las generaciones presentes se vean comprometidas. En cambio, para las futuras generaciones, si no se controla adecuadamente podría haber una reducción del capital natural con graves consecuencias. Pero sí que se beneficiarán positivamente de la mayor disponibilidad de agua generada por la desaladora, además de los puestos de trabajo generados.

3. Propuestas para mejorar la sostenibilidad

Las propuestas para mejorar la sostenibilidad de la desaladora estarían enfocadas principalmente al vertido de la salmuera y el consumo eléctrico.

En primer lugar, el vertido de la salmuera. Existen varias opciones para reducir su impacto ambiental. Una de las opciones es reducir la concentración de sales del vertido. Esto se podría realizar mezclando la salmuera con el agua de salida de una depuradora cercana. Con esto se conseguiría obtener agua con una concentración de sales parecida a la del mar, por lo que no tendría un impacto en el medio. Esta opción sería óptima si se está planteando construir una desaladora y una depuradora en la misma zona ya que se podrían construir cerca para poder realizar la mezcla. Sin embargo, no es fácil que se den estas circunstancias, en Escombreras no se encuentra ninguna EDAR⁴⁴ cercana para realizar la mezclar. En la desaladora de Torrevieja tampoco existe una EDAR cercana por lo que habría que construir un sistema de distribución para poder mezclar el agua con la depuradora más cercana.

Otra opción es darle un uso a la salmuera generada por la desaladora. Un ejemplo es la investigación que ha llevado a cabo la universidad politécnica de Valencia.⁴⁵ El proyecto consiste en utilizar la salmuera de las desaladoras para elaborar zumos concentrados. Ángel Arguelles ha explicado el proyecto de la siguiente manera: “Tenemos una solución concentrada, la salmuera, y un zumo fresco con mucha agua. Con la tecnología de membrana, sacaríamos agua del zumo y este se concentraría, y se pasaría a la salmuera, que se diluiría con una concentración similar a la del agua del mar, lo que permitiría ser vertido sin impacto medioambiental o reintroducirla en el proceso de desalación”.

Por otro lado, se podría mejorar la sostenibilidad de la desaladora mediante la reducción del consumo eléctrico. Esta opción se enfocaría principalmente en la mejora e investigación de las membranas de ósmosis inversa, ya que hoy en día requieren una gran presión y tienen un porcentaje de conversión menor al 50%.

Además de reducir el consumo, la sostenibilidad de la planta mejoraría si se empleará energía renovable. Una opción sería utilizar energía proveniente únicamente de una fuente renovable. Otra opción sería construir una central eléctrica de origen renovable para abastecer a la desaladora. También podrían instalarse paneles fotovoltaicos en la planta para ayudar a reducir el consumo de la red eléctrica. Sin embargo, esta variedad de opciones no significa que sean fáciles de aplicar ya que suponen una gran inversión y el suministro eléctrico podría depender de depender de las condiciones meteorológicas.

⁴⁴ EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales.

⁴⁵ Proyecto Europeo Bri4food, Universidad Politécnica de Valencia.

4. Bibliografía

- “Plantas desaladoras en España.” Aquae Fundación, 17 de febrero 2016.
- “La desalinizadora de Torrevieja, principal fuente de agua de la provincia.” Tony Sevilla, 19 de diciembre 2017.
- “La mayor fábrica de agua aún necesita dos años para alcanzar la máxima producción.” Manuel Buitrago, 11 de diciembre 2017.
- “Demanda y producción en tiempo real.” Red eléctrica de España, abril 2018.
- “La desaladora de Torrevieja. ¿efectos nocivos para la flora y fauna marina? ¿es necesaria y económicamente rentable?” Pesca Torrevieja
- “Minimización del impacto en vertidos de desalación.” Carolina Pérez Bermúdez, 18 de febrero 2014.
- “Proyecto europeo Bri4food.” Universidad politécnica de Valencia, 18 de enero 2016.
- “Trabajo sostenibilidad”. Carlos de la Cámara Castillo, abril 2018



PLIEGO DE CONDICIONES

Índice

	Pag.
1. Objetivo del pliego	139
2. Caudales, índices y condiciones de depuración.	141
3. Ensayos y análisis.	142
4. Personal.....	143
5. Materiales, reposiciones y suministros.	145
6. Paradas y averías.....	147
7. Mejoras y ampliaciones.....	148
8. Inspección y vigilancia	149
9. Gastos por cuenta del contratista	150
10. Resumen características técnicas desaladora.....	151

1. Objetivo del pliego

BASE 1ª.- En el presente pliego se recogen las bases que regirán para la contratación de los Servicios de Mantenimiento, Conservación y Explotación de la planta Desaladora de Escombreras, que comprende las instalaciones definidas en el proyecto de construcción, de manera que se asegure su funcionamiento y se efectúen cuantas labores de mantenimiento y conservación sean precisas.

BASE 2ª.- Los servicios obligatorios que ha de realizar el contratista son:

- a) Mantener el funcionamiento normal de la planta de forma ininterrumpida y consiguiendo en todo momento unos índices de desalación que correspondan a los requerimientos previstos en el proyecto constructivo de la Desaladora.
- b) Retirar en las debidas condiciones higiénicas, transportar y verter en los lugares adecuados los posibles residuos recogidos en la planta.
- c) Llevar a planta de tratamiento de aguas residuales, las aguas derivadas de la limpieza de filtros y membranas como mínimo una vez al año.
- d) Conservar en perfecto estado todos los elementos de la planta e instalaciones anejas.
- e) Mantener adecuadamente todas las instalaciones y equipos de la Desaladora e instalaciones anejas. Deberá suscribir los correspondientes contratos de mantenimiento con empresas homologadas, de los elementos e instalaciones de la planta, conforme a la legislación vigente.
- f) Reparar o reponer todos los elementos averiados y deteriorados de las instalaciones e instalaciones anejas.
- g) Adquirir a su costa todos los materiales, productos y suministros precisos para el debido mantenimiento, conservación y explotación.

h) Conservar y mantener en perfecto estado todas las instalaciones existentes de control, automatismo e información de la planta. A tal fin deberán suscribir los correspondientes contratos de mantenimiento.

i) Mantener en perfecto estado de limpieza y pintura todos los elementos e instalaciones de la Desaladora.

j) Conservar en las debidas condiciones, todos los elementos anejos a la Desaladora, tales como caminos interiores y edificaciones auxiliares.

k) Suscribir una póliza de responsabilidad civil con cobertura de 1 millón de euros por siniestro y patronal para cada anualidad.

l) Registrar y analizar las características de los parámetros que definen el proceso de las líneas de agua, salmuera y auxiliares para su debido control y funcionamiento.

m) Comunicar a los Servicios Técnicos del Ayuntamiento de forma inmediata, cualquier incidencia que afecte a las instalaciones de desalación.

n) Enviar a los Servicios Técnicos del Ayuntamiento la información que éstos soliciten sobre el funcionamiento de la planta y con la periodicidad que se determine.

o) Y, en general, cuantas operaciones y cuidados sean necesarios para cumplir con el fin iniciado en el apartado a).

El servicio consistirá en el mantenimiento preventivo y correctivo de dicha desalación realizando un seguimiento continuo de su funcionamiento y asegurando la normalidad en la prestación del servicio de desalación.

2. Caudales, índices y condiciones de depuración.

BASE 3ª.- Las características principales de la planta serán las siguientes:

CAUDAL MÁXIMO DIARIO DESALADO ($\text{m}^3/\text{día}$)

165.000

VOLUMEN ANUAL ($\text{hm}^3/\text{año}$)

60

BASE 5ª.- El concesionario tratará de funcionar al del caudal máximo que pueda desalar la misma según sus condiciones técnicas.

BASE 6ª.- La buena marcha de la desalación se comprobará por determinación de los índices recogidos en el Anexo I.

BASE 8ª.- Las determinaciones a que se refieren la BASE 6ª, se hará de acuerdo con los métodos de análisis de la American Public Health Association, o con aquéllos que el Departamento Técnico del Ayuntamiento decida para cada caso específico.

La Dirección Técnica del Ayuntamiento podrá ordenar o realizar otros ensayos, para un mejor conocimiento de la marcha de la desalación.

BASE 9ª.- Será obligación y a cuenta del adjudicatario, la retirada de las arenas, grasas, residuos del pozo de gruesos, rejillas y tamices, recogidos en la planta, así como su transporte y depósito en vertederos autorizados.

BASE 10ª.- En el caso de que aparezcan en el agua captada sustancias o materias perturbadoras de los procesos de pretratamiento o de ósmosis inversa, se comunicará inmediatamente su presencia a los Servicios Técnicos del Ayuntamiento, que determinará si se está en el caso de suspender la actividad de la planta.

3. Ensayos y análisis.

BASE 11ª.- En el laboratorio instalado en la planta, el adjudicatario deberá llevar a cabo cuantos ensayos y análisis sean precisos para el seguimiento de la desalación, para lo cual proveerá el personal, aparatos y reactivos necesarios.

Se deben realizar, como mínimo, las determinaciones impuestas por la “Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano”, del ministerio de sanidad y política social.

El control de la salmuera se realizará en los puntos de control, con la periodicidad y demás requisitos de la Resolución de Autorización de Vertido de una Desaladora.

BASE 12ª.- Por su parte, los Servicios Técnicos del Ayuntamiento, podrán encargar al laboratorio de la planta o a otros laboratorios, cuantos ensayos y análisis juzguen necesarios para comprobar el cumplimiento de las condiciones establecidas en los Capítulos II y III de estas Bases, o para estudiar la posibilidad de mejoras en el rendimiento y funcionamiento de las instalaciones.

BASE 13ª.- En el caso de que el contratista no estuviera de acuerdo con el resultado de los análisis efectuados por los Servicios del Ayuntamiento se podrá acudir al arbitraje de un laboratorio oficial elegido de común acuerdo por las partes. Los gastos de los análisis de arbitraje serán por cuenta del contratista si no tuviera razón.

BASE 14ª.- El contratista previa autorización de los Servicios Técnicos, podrá montar instalaciones experimentales para ensayar posibilidades de mejora en los rendimientos o calidades de las aguas tratadas, ateniéndose para ello a las condiciones que dicho servicio le señale. Asimismo, colaborará en el montaje de instalaciones de este tipo, si se llevasen a cabo por iniciativa del Ayuntamiento por terceros autorizados por ésta.

4. Personal

BASE 15ª.- El adjudicatario deberá disponer del personal preciso para garantizar la correcta realización, en todo momento de las labores de explotación, mantenimiento y conservación de la planta. Al frente del personal y para todas las relaciones con los Servicios Técnicos del Ayuntamiento se hallará un titulado superior, especializado en la desalación.

El resto del personal de la empresa concesionaria tendrá una formación profesional y experiencia, acordes con las funciones que vayan a tener encomendadas.

El explotador distribuirá el personal en los oportunos turnos de trabajo, de tal forma que se cubran todos los días del año.

La variación y sustitución del personal deberá ser razonada y puesta en conocimiento de los servicios Técnicos Municipales antes de proceder a la misma.

La empresa adjudicataria deberá subrogar al personal que actualmente está adscrito al presente servicio.

BASE 16ª.- Para atender las necesidades e incidencias que se presenten en la planta desaladora, el contratista dispondrá por su cuenta de los vehículos que estimen necesarios.

BASE 17ª.- El personal deberá atender con toda corrección a los representantes del Departamento Técnico Municipal, en cuantas visitas, inspecciones y trabajos efectúen en las instalaciones, proporcionándoles, asimismo, todos los datos o detalles que soliciten.

BASE 18ª.- Todo el personal que emplee el adjudicatario para la prestación del servicio, deberá percibir, como mínimo, los haberes o jornales fijados en las correspondientes reglamentaciones laborales y estará en todo momento al corriente de sus obligaciones tributarias y Seguridad Social.

BASE 19ª.- El Ayuntamiento no tendrá relación de ningún tipo con el personal, ni durante la vigencia del contrato ni a su terminación.

BASE 20ª.- Todo el personal de la contrata, que, de servicio en la planta, cuyo mantenimiento, conservación y explotación es objeto del contrato, deberá actuar correctamente uniformado e identificado.

BASE 21ª.- Aparte del personal vinculado al contratista y al Departamento Técnico del Ayuntamiento, no se permitirá la entrada en las instalaciones a ninguna otra persona que no vaya provista de una autorización expresa y nominal, expedida para cada caso concreto por el departamento citado.

5. Materiales, reposiciones y suministros.

BASE 22ª.- El contratista queda obligado a disponer en las instalaciones de todos los materiales, aparatos, herramientas y repuestos necesarios para su funcionamiento normal y para las reparaciones de rutina.

BASE 23ª.- El contratista vendrá obligado a la introducción de las mejoras y complementaciones que a continuación se detallan:

a) Material de oficina, taller, etc., necesarios.

b) Equipamiento e instrumentación del laboratorio para poder efectuar todos los análisis previstos y, en especial, los señalados en la BASE 11ª.

c) Equipos de seguridad de forma que se cumplan las normas vigentes sobre seguridad e higiene en el trabajo.

BASE 24ª.- En los quince primeros días desde la fecha de comienzo de los servicios del contratista, se procederá por éste y por los Servicios Técnicos del Ayuntamiento, a redactar un inventario contradictorio de todos los materiales, aparatos, herramientas y repuestos que existen en la planta Desaladora y demás instalaciones.

El contratista repondrá cuantos elementos incluidos en el inventario se consuman, deterioren o desaparezcan, manteniendo éste al día. Podría, por su parte, aumentar a su costa el número y clase de repuestos si lo considera conveniente para el buen funcionamiento de las instalaciones, incluyéndose también en el inventario.

BASE 25ª.- Serán de cuenta del contratista todos los suministros de productos fungibles necesarios para el debido mantenimiento de la estación y su funcionamiento correcto, debiendo tener acopiados en el almacén los suficientes, para hacer frente a cualquier eventualidad que se puede presentar en la entrega de productos por los respectivos abastecedores.

BASE 26ª.- Serían por cuenta del Ayuntamiento los siguientes suministros:

a) Los gastos derivados de aquellas pruebas o ensayos que tengan por objeto la mejora de los rendimientos, o la mejor adaptación de las instalaciones a las nuevas disposiciones legales, salvo que los mismos hubieran sido ofertados por el licitador como mejoras, y, por tanto, incorporados al objeto del contrato.

b) El consumo de cloro para adicionar al efluente en aquellos casos que determine la Dirección del Ayuntamiento, que será abonado por la administración en la certificación correspondiente.

Serán por cuenta del contratista los productos químicos necesarios para el funcionamiento de la planta.

BASE 27ª.- Los gastos de consumo eléctrico ocasionado por el funcionamiento de la planta Desaladora, e instalaciones anejas serán por cuenta del contratista.

6. Paradas y averías

BASE 28ª.- La planta operará bajo el principio de mantenimiento preventivo, planeado para evitar roturas de índole mecánica, paros generales por reparación de elementos esenciales, y conseguir una operación de la instalación en proceso continuo.

Anualmente se realizará, en colaboración con el Ayuntamiento, una inspección sobre el estado de mantenimiento de las instalaciones, del que se realizará un informe escrito.

BASE 29ª.- El contratista deberá reparar rápidamente y a su costa, cuantos desperfectos y averías se produzcan en las instalaciones.

Siempre que sea posible, las reparaciones se harán en la propia estación, excepto aquéllas de especial importancia que requieran la sustitución de elementos complejos o el traslado de los elementos averiados a taller.

7. Mejoras y ampliaciones

BASE 31ª.- El contratista podrá proponer toda clase de mejoras a su costa durante la vigencia del contrato, y el Servicio Técnico del Ayuntamiento será libre para aceptarlas o no. En el caso de su aceptación, no producirán modificación del respectivo canon, aun cuando den lugar a economías en los gastos de mantenimiento, conservación o explotación.

8. Inspección y vigilancia

BASE 32ª.- El contratista adjudicatario deberá atender con toda solicitud a cuantas órdenes dicten los Servicios Técnicos del Ayuntamiento, a cuyo fin existirá en la Estación un libro de órdenes foliado, firmado y sellado por la Dirección de dichos Servicios, a los cuales podrá acudir el contratista en caso de disconformidad con alguna orden dentro del plazo máximo de 24 horas.

BASE 33ª.- Para la debida comprobación del cumplimiento de las condiciones de este Pliego de Bases y de las órdenes del Servicio Técnico del Ayuntamiento, éste designará los técnicos que crean convenientes, dando cuenta de ello por escrito al contratista.

9. Gastos por cuenta del contratista

BASE 34ª.- Además de todos los gastos necesarios para el cumplimiento de lo establecido en este Pliego de Bases, serán también por cuenta del contratista los que se originen por el montaje, desmontaje y retirada de cualquier clase de instalaciones, los de protección de materiales, seguridad tanto de personas al servicio de la planta como visitantes, como equipos e instalaciones, daño e incendio; los de conservación y reparación de caminos, pasarelas y desagües; los que afecten a la limpieza general de la planta, los ocasionados por la corrección de las deficiencias que se pongan de manifiesto en las inspecciones, ensayos y pruebas sobre la marcha de la instalación y el estado de sus elementos.

También serán a costa del contratista, todos los gastos de teléfono, luz, agua y similares de las edificaciones e instalaciones adscritas a los servicios concedidos y de las nuevas aportadas por el concesionario, así como tributos e impuestos que legalmente sean exigibles a la concesión, así como aquellos otros que lo sean en el futuro.

En especial, será a costa del adjudicatario, el canon de control de vertidos a satisfacer al Organismo de Cuenca.

Asimismo, serán de cuenta del contratista, los gastos ocasionados por la suscripción de la póliza de seguro de responsabilidad civil con una cobertura mínima de 500.000,00 euros por siniestro y patronal para cada anualidad. Esta póliza deberá suscribirse durante el primer mes de prestación del servicio.

De igual modo, deberá asegurarse la depuradora contra incendios, robos, vandalismo, rayos, inundaciones y demás contingencias asegurables, con una póliza de seguro de multirriesgo de 1.000.000 euros.

Además, el concesionario será responsable de las sanciones impuestas por la Confederación Hidrográfica por la realización de vertidos irregulares, salvo que se acredite la imposibilidad de evitar el vertido, bajo las condiciones de la instalación e infraestructuras existentes.

BASE 35ª.- Serán también de cuenta del contratista los gastos de otorgamiento del contrato de adjudicación, incluso los correspondientes impuestos, los de anuncios y los de cuantos recargos o impuestos sean inherentes a la prestación del servicio y tramitación de documentos que a él se refieran incluso los del Impuesto del Valor Añadido (IVA).

10. Resumen características técnicas desaladora

CAUDALES

Caudal medio horario desalado

15.277,78

m³/h

Caudal medio diario desalado

165.000

m³/día

RESULTADOS A OBTENER

AGUA DEPURADA

Los valores que deberán tener los diferentes parámetros medidos serán los indicados en la Guía de desalación.⁴⁶

LÍNEA DE AGUA

- CAPTACIÓN

* Toma de agua con rejillas

* Inmisario

* Cámara de captación

- Bomba vertical. (28 + 2 de reserva)

- PRETRATAMIENTO

*Bombeo

- Bomba horizontal (24 + 2 de reserva)

*Coagulación

*Desinfección

⁴⁶ Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano. Ministerio de sanidad y política social.

*Ajuste de pH

*Reducción de oxidantes

*Antiincrustantes

*Filtrado

-ÓSMOSIS INVERSA

*Bombeo

- Bomba horizontal (31 + 2 de reserva)

*Membranas de ósmosis inversa

-RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

*Recuperadores

- Cámaras de intercambio de presión

*Bombeo

- Bomba booster (2 + 1 de reserva)

-VERTIDO DE LA SALMUERA

*Emisario

*Difusores Venturi

-ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS

*Sistema de transporte y acometida en A.T.

*TRANSFORMACIÓN mediante C.T. de 250 KVA. Tipo interior, medida en A.T y distribución de la energía eléctrica.

*Sinóptico de proceso

*ESTACIÓN OPERADORA (AUTÓMATA) con PC e impresora en la sala de control para manejo de los equipos de la Desaladora.

-EDIFICIOS

*Edificio de bombeo de agua bruta, laboratorio y sala de reactivo.

*Edificio principal, de dos plantas, la superior para sala de control y la inferior para servicios y vestuarios.



PLANOS

Índice

Localización planta desaladora 159

Esquema planta desaladora de Escombreras y consumo energético de sus etapas 160

Esquema hidráulico desaladora Escombreras 161

CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK

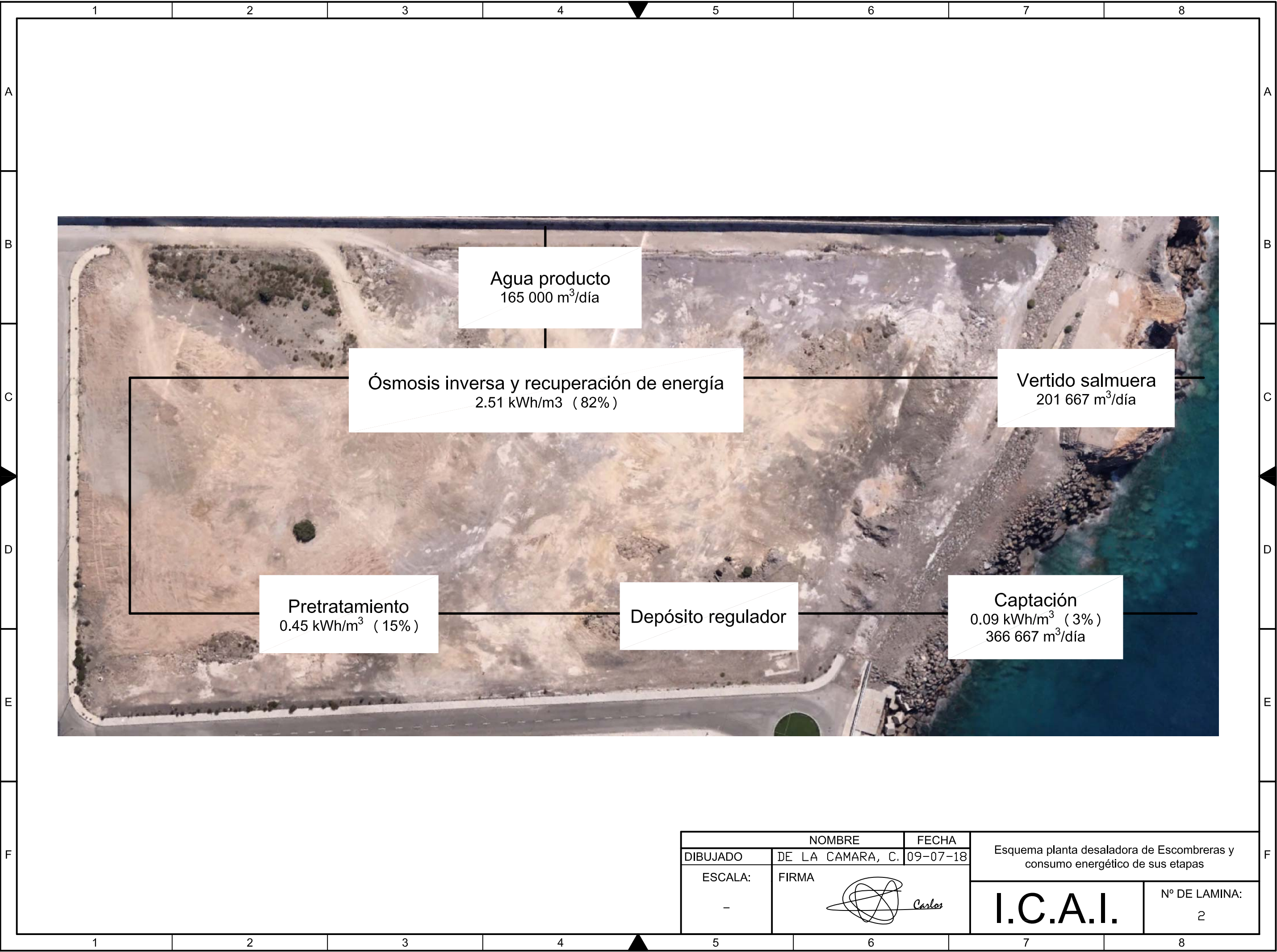
CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK



CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK

CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK

CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK

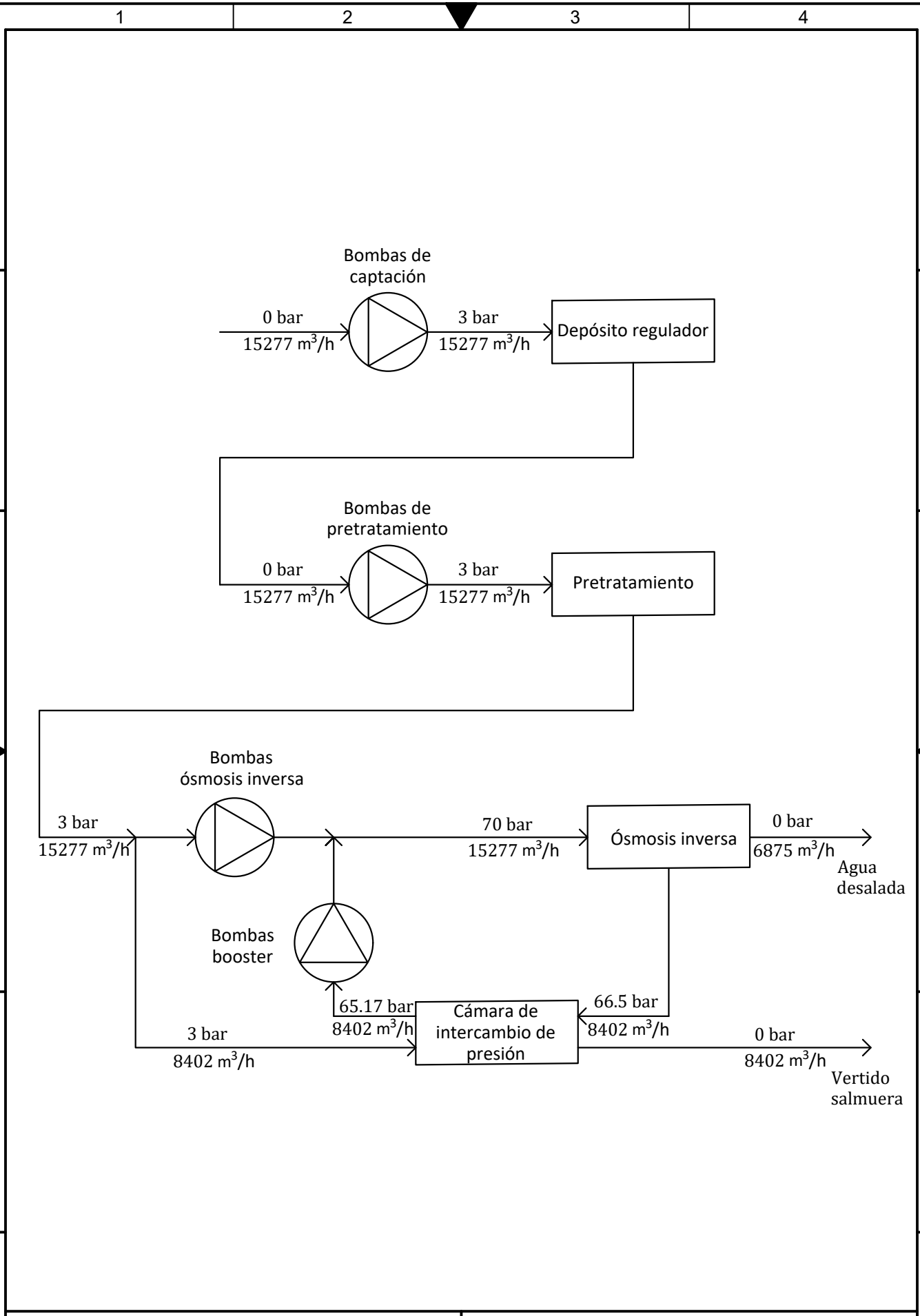


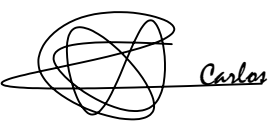
NOMBRE		FECHA	Esquema planta desaladora de Escombreras y consumo energético de sus etapas	
DIBUJADO	DE LA CAMARA, C.	09-07-18		
ESCALA:	FIRMA			Nº DE LAMINA:
-				2

I.C.A.I.

CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK

CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK



NOMBRE			Esquema hidráulico desaladora Escombreras	
DIBUJADO	DE LA CAMARA, C.	04-06-18		
ESCALA:	FIRMA			
-			I.C.A.I.	Nº DE LAMINA: 3

