



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Señorans Martínez, Lucia

Tutor/a: Carbonell Alcaina, Carlos

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Resumen

El presente trabajo fin de grado consiste en el diseño y estudio de viabilidad económico de una instalación de tratamiento de agua mediante membranas de ósmosis inversa, procedente del acuífero de la Plana de Sagunto, para abastecer a la comarca del Camp de Morvedre.

La ubicación se ha seleccionado teniendo en cuenta el fuerte estrés hídrico que sufre esta zona, la cual exige la utilización de recursos de agua no convencionales.

Además, el acuífero local presenta niveles elevados de sulfatos en el agua subterránea, superando los límites establecidos por el Real Decreto 140/2003 para el consumo humano. Para reducir la concentración de estos compuestos a niveles permitidos por la legislación, se ha propuesto la implementación de un sistema de ósmosis inversa. Esta tecnología se ha elegido por su mayor eficiencia en comparación con otras alternativas.

Dado que el agua tratada mediante este proceso se utilizará para el consumo humano, el diseño de la instalación incluye varios componentes. En primer lugar, se implementará un pretratamiento que consistirá en filtros de arena y filtros de cartucho. A continuación, se llevará a cabo un proceso de acondicionamiento del agua mediante la adición de productos químicos. Finalmente, se aplicará un postratamiento que incluya la remineralización y la cloración del agua tratada.

Este diseño integral se complementará con un análisis económico detallado para optimizar el proyecto en términos de eficiencia y costos. Este enfoque permitirá evaluar la viabilidad económica de la instalación en su conjunto.

Palabras clave: aguas subterráneas, agua potable, sulfatos, membranas, ósmosis inversa.

Resum

El present treball fi de grau consisteix en el disseny i estudi de viabilitat econòmica d'una instal·lació de tractament d'aigua mitjançant membranes d'osmosi inversa, procedent de l'aqüífer de la Plana de Sagunt, per proveir a la comarca del Camp de Morvedre.

La ubicació s'ha seleccionat tenint en compte el fort estrès hídric que sofreix aquesta zona, la qual exigeix la utilització de recursos d'aigua no convencionals.

A més, l'aqüífer local presenta nivells elevats de sulfats en l'aigua subterrània, superant els límits establits pel Reial decret 140/2003 per al consum humà. Per a reduir la concentració d'aquests compostos a nivells permesos per la legislació, s'ha proposat la implementació d'un sistema d'osmosi inversa. Aquesta tecnologia s'ha triat per la seua major eficiència en comparació amb d'altres alternatives.

Atès que l'aigua tractada mitjançant aquest procés s'utilitzarà per al consum humà, el disseny de la instal·lació inclou diversos components. En primer lloc, s'implementarà un pretractament que consistirà en filtres de sorra i filtres de cartutx. A continuació, es durà a terme un procés de condicionament de l'aigua mitjançant l'addició de productes químics. Finalment, s'aplicarà un posttractament que inclogui la remineralització i la cloració de l'aigua tractada.

Aquest disseny integral es complementarà amb una anàlisi econòmica detallada per a optimitzar el projecte en termes d'eficiència i costos. Aquest enfocament permetrà avaluar la viabilitat econòmica de la instal·lació en el seu conjunt.

Paraules clau: aigües subterrànies, aigua potable, sulfats, membranes, osmosis inversa.

Abstract

The present final degree project consists of the design and economic feasibility study of a water treatment facility using Reverse Osmosis membranes, sourced from the Plana de Sagunto aquifer, to supply the Camp de Morvedre region.

The location has been chosen considering the significant water stress in this area, which necessitates the use of unconventional water resources. Additionally, the local aquifer has elevated levels of sulfates in the groundwater, surpassing the limits set by Royal Decree 140/2003 for human consumption. To reduce the concentration of these compounds to levels allowed by legislation, the implementation of a reverse osmosis system has been proposed. This technology has been selected for its higher efficiency compared to other alternatives.

As the treated water from this process will be used for human consumption, the facility's design includes various components. Firstly, a pre-treatment will be implemented involving sand filters and cartridge filters. Subsequently, a water conditioning process will take place through the addition of chemicals. Finally, a post-treatment will be applied, incorporating remineralization and chlorination of the treated water.

This comprehensive design will be complemented by a detailed economic analysis to optimize the project in terms of efficiency and costs. This approach will allow for the assessment of the economic viability of the entire installation.

Keywords: groundwater, drink water, sulfates, membranes, reverse osmosis.

Índice de la memoria

Resumen.....	1
1. Introducción.....	8
<i>Escasez de agua en España.....</i>	<i>8</i>
<i>Situación en la Comunidad Valenciana.....</i>	<i>12</i>
2. Objetivos y justificación del proyecto.....	17
<i>Desalación situación global, España y Comunidad Valenciana.....</i>	<i>19</i>
3. Técnicas de separación: tecnología de membranas.....	21
4. Legislación.....	31
5. Composición inicial aguas subterráneas Plana de Sagunto.....	33
<i>Ubicación de la planta.....</i>	<i>33</i>
<i>Datos iniciales.....</i>	<i>37</i>
6. Metodología.....	41
<i>Captación y bombeo de agua.....</i>	<i>41</i>
<i>Conducción a la planta potabilizadora.....</i>	<i>48</i>
<i>Diseño de la planta.....</i>	<i>50</i>
7. Pretratamientos físicos.....	63
7.2 <i>Filtro sílex (filtros de arena a presión)</i>	<i>64</i>
7.3 <i>Filtros de seguridad (cartuchos)</i>	<i>68</i>
8. Pretratamientos químicos.....	71
8.1 <i>Desinfección.....</i>	<i>71</i>
8.2 <i>Equipo de corrección de pH.....</i>	<i>72</i>
8.3 <i>Dosificador de reductor.....</i>	<i>72</i>
9. Mantenimiento de membranas.....	74
9.1 <i>Recuperación de membranas.....</i>	<i>74</i>
9.2 <i>Lavado de membranas.....</i>	<i>75</i>
9.3 <i>Limpieza de pozos.....</i>	<i>78</i>
10. Gestión de corrientes de rechazo.....	80
11. Post-tratamiento.....	82
11.1. <i>Remineralización.....</i>	<i>82</i>
11.2. <i>Cloración.....</i>	<i>83</i>
12. Estudio económico.....	85
13. Conclusiones.....	91

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m^3/d .

14. Diagrama de bloques de la planta.....	93
Bibliografía.....	94

Índice de figuras

Figura 1. Índice de explotación hídrica (WEI+, por sus siglas en inglés), 2017	11
Figura 2. Dependencia exterior Comunidad Valenciana. Fuente: (Criado, 2009).....	14
Figura 3. Mapa de distribución de los sulfatos en las aguas subterráneas de Sagunto.....	18
Figura 4: Clasificación de técnicas de separación en base del tamaño de especies a filtrar	25
Figura 5: Esquema módulo plano	27
Figura 6: Esquema de membrana en enrollamiento en espiral (Soutullo, 2016)	28
Figura 7: Esquema de membrana en módulo tubular (Soutullo, 2016).....	28
Figura 8: Esquema módulo de membrana de fibra hueca (Soutullo, 2016)	29
Figura 9. Componentes membrana O.I	30
Figura 10: Mapa con la ubicación de los pozos.....	37
Figura 11: Ubicación dónde se instalará planta dirección general del catastro	38
Figura 12: Ubicación de la parcela dirección general del catastro	39
Figura 13. Direcciones de flujo, distribución de acuíferos, usos y permeabilidad del suelo	40
Figura 14: Porcentaje de variación bienal de los volúmenes registrados y distribuidos a los usuarios por comunidad autónoma.....	42
Figura 15: Esquema de pozo tipo Ranney.....	44
Figura 16: Pozo tipo radial	45
Figura 17: Tipo de bomba seleccionada. Modelo SPE 215-1	46
Figura 18: Especificaciones de la bomba modelo SPE 215-1	47
Figura 19: Curva característica y punto de funcionamiento bomba SPE 215-1.....	48
Figura 20: Especificaciones de la bomba LS 200-150-508B	49
Figura 21: Bomba LS 200-150-508B Grundfos	50
Figura 22: Curva de rendimiento bomba LS 200-150-508B Grundfos	51
Figura 23: Diámetro de pozo mínimo para la bomba sumergible	52
Figura 24: Diagrama sistema ósmosis inversa dos etapas y un paso.....	54
Figura 25: Captura de pantalla programa WAVE paso 1.....	61
Figura 26: Captura de pantalla programa WAVE paso 2.....	62
Figura 27: Captura de pantalla programa WAVE paso 3.....	63
Figura 28: Esquema filtro sílex	68

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m^3/d .

Figura 29: Características y especificaciones filtro sílex-antracita.....	69
Figura 30: Filtro de arena sílex-antracita Hidro water	70
Figura 31: Filtros de cartuchos Hidro Water.....	72
Figura 32: Características filtros de cartucho	72
Figura 33: Diagrama típico de un sistema de limpieza de membranas	81
Figura 34: Decantador de la empresa Hidro Water.....	84
Figura 35: Evolución temporal del cloro residual	87

Índice de tablas

Tabla 1: Objetivo de Desarrollo Sostenible relacionado con el presente proyecto	11
Tabla 2: Balance hídrico y cuantificación del acuífero (IGME, 1989).	14
Tabla 3: Cuantificación de transferencias laterales que recibe Plana de Sagunto (IGME, 1989)..	14
Tabla 4: Masas en mal estado por cada test del estado cuantitativo.	17
Tabla 5: Tipos de procesos de separación con membranas según fuerza impulsora.	21
Tabla 6: Valores paramétricos químicos según RD 140/2003	32
Tabla 7: Valores paramétricos de indicadores de calidad según RD 140/2003	32
Tabla 8: Piezometrías medidas en los diferentes puntos de agua	33
Tabla 9: Concentraciones cationes	38
Tabla 10: Concentraciones aniones	38
Tabla 11: Concentraciones neutrones	38
Tabla 12: Características físico-químicas	38
Tabla 13: Población y consumo	39
Tabla 14: Caudal de alimentación según conversión	40
Tabla 15: Conversiones con 12 tubos descartadas por incumplir criterios de diseño	52
Tabla 16: Conversiones con 14 tubos descartadas por incumplir criterios de diseño	52
Tabla 17: Conversiones con 16 tubos descartadas por incumplir criterios de diseño	52
Tabla 18: Gasto energético para opciones que cumplen con criterios de diseño.....	53
Tabla 19: Coste de agua potabilizada en cada caso	53
Tabla 20: Selección tipo de membrana	54
Tabla 21: Resultados obtenidos concentraciones tras desviar un 20% de agua	62
Tabla 22: Resultados obtenidos productos químicos tras desviar un 20% de agua.....	62
Tabla 23: índices de Langelier.....	82
Tabla 24: Características recomendadas nivel adecuado de remineralización	82
Tabla 25: Costes de inversión en la unidad de ósmosis inversa	85
Tabla 26: Coste total anual de reemplazos.....	86
Tabla 27: Inversión total de la planta	86
Tabla 28: Presupuesto de inversión.....	87
Tabla 29: Coste anual de consumo energético.....	88
Tabla 30: Costes anuales de operación y mantenimiento- costes variables	88
Tabla 31: Costes anuales de operación y mantenimiento-costes fijos.....	89

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m^3/d .

Tabla 32: Coste anual de operación y mantenimiento.....	89
Tabla 33: Total coste de producción anual.....	90
Tabla 34: Total coste del agua potabilizada.....	90
Tabla 35: Resumen presupuesto	90
Tabla 36: Características agua producto.....	91

1. Introducción

Escasez de agua en España

En España, la escasez de agua viene afectada por un fenómeno denominado estrés hídrico, ocurre cuando se demanda más agua de la cantidad que hay disponible durante un periodo de tiempo o que su uso está restringido por la baja calidad de esta.

El uso no siempre eficiente y sostenible de los recursos naturales han provocado una disminución de la cantidad y la calidad de los recursos hídricos disponibles. Es por eso que hoy en día los ríos españoles llevan menos agua, un 11% inferiores que hace 40 años, llegando a alcanzar una reducción del 22% en cuencas como las del Tajo y Guadiana (CEDEX, 2020).

El estado de las aguas subterráneas no es mejor, se estima que el 36% de nuestros acuíferos están en riesgo de sobreexplotación y que más de la mitad presentan un grado de contaminación elevado por nitratos, a causa principalmente del uso de fertilizantes sintéticos y estiércoles líquidos usados en la agricultura. Además del uso de fármacos tanto para humanos como animales. Todo ello hace que un 40% de las masas de agua superficial como ríos, lagos y aguas costeras y un 45% de las masas de aguas subterráneas no se encuentran en buen estado (CEDEX, 2020).

En estos últimos años, España ha desarrollado un mayor consumo diario de agua per cápita, esta demanda ha ido en aumento debido a varios factores, como el crecimiento económico, el aumento de la huella humana o el incremento del cultivo. Se estima que, en 2030, un 65% de la población sufrirá los efectos de dicha escasez (Sandoval, 2022).

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

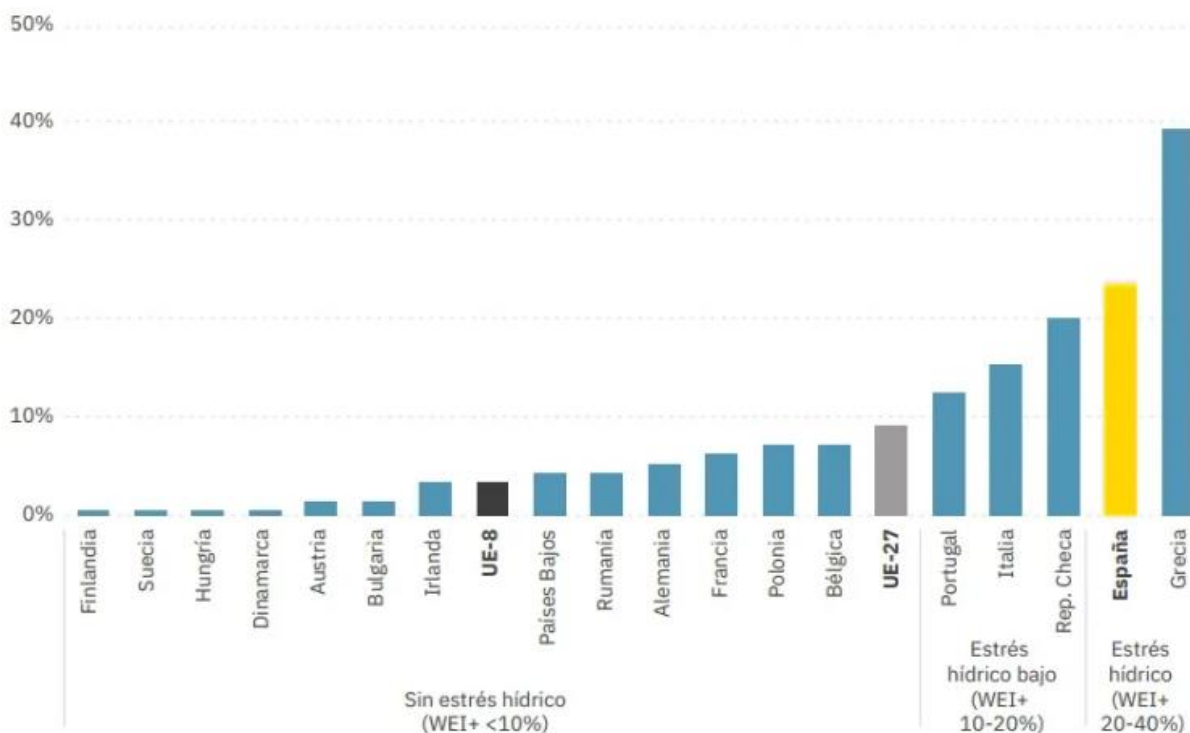


Figura 1. Índice de explotación hídrica (WEI+, por sus siglas en inglés), 2017

La Agenda de 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada por la Asamblea General de las Naciones Unidas, establece una serie de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Uno de estos objetivos se centra en garantizar la disponibilidad de agua y la gestión sostenible del saneamiento para todos. El núcleo fundamental de este enfoque es lograr un acceso universal y equitativo al agua potable a un costo asequible para todas las personas. Para alcanzar este propósito, se busca fomentar la cooperación internacional y brindar apoyo para fortalecer las capacidades de los países en desarrollo en temas relacionados con el agua y el saneamiento. Esto implica la implementación de actividades y programas que abordan cuestiones como la recogida de agua de lluvia, la desalinización, la eficiencia en el uso del agua, el tratamiento de aguas residuales, el reciclaje y las tecnologías de reutilización, con una meta específica fijada para el año 2030.

Uno de los objetivos de España de cara a la agenda 2030 es resolver la escasez de agua en España lo antes posible, la cual incluye estrategias para resolver tanto el dilema del agua, cubriendo todas las preguntas generales del ciclo del agua, como la calidad del agua, la gestión de aguas residuales, el uso, escasez y gestión de recursos hídricos y ecosistemas asociados. Como los problemas que amenazan contra la lucha del cambio climático. Dicha agenda está totalmente en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

El contenido de dicha agenda abarca un total de 169 metas recogidas en 17 ODS, que engloban diversos temas clásicos de las agendas de desarrollo, como pobreza, hambre, desigualdad, entre otros. Sin embargo, también incluye otras metas relacionadas con el desarrollo sostenible, tales como agua y saneamiento, crecimiento económico, infraestructuras, cambio climático, energía, biodiversidad, género, entre otros. Estas últimas metas están especialmente dirigidas a sociedades desarrolladas, y plantean desafíos directos para promover un desarrollo sostenible en dichas comunidades.

En el presente proyecto, los objetivos que están relacionadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, es el objetivo número 6, el cual tiene como finalidad garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, incorporando cuestiones que abarcan todo el ciclo del agua como la calidad de esta, la gestión de aguas residuales, el uso, escasez y gestión de los recursos hídricos y los ecosistemas relacionados con el agua. Y en mayor medida con los puntos 6.3 y 6.4 tal y como se remarcan en la Tabla 1 (Amancay Villalba,2016).

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Tabla 1: Objetivo de Desarrollo Sostenible relacionado con el presente proyecto

ODS.6 Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos	
6.1 De aquí a 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos.	6.1.1 Proporción de la población que dispone de servicios de suministro de agua potable gestionados de manera segura
6.2 Lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones de vulnerabilidad	6.2.1 Proporción de la población que utiliza servicios de saneamiento gestionados de manera segura, incluida una instalación para lavarse las manos con agua y jabón
6.3 Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial	6.3.1 Proporción de aguas residuales tratadas de manera segura 6.3.2 Proporción de masas de agua de buena calidad
6.4 Aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el reducir considerablemente el número de personas que sufren falta del agua	6.4.1 Cambio en la eficiencia del uso del agua con el tiempo 6.4.2 Nivel de estrés por escasez de agua: extracción de agua dulce como proporción de los recursos de agua dulce disponibles
6.5 Implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda	6.5.1 Grado de aplicación de la ordenación integrada de los recursos hídricos (0-100) 6.5.2 Proporción de la superficie de cuencas transfronterizas con un arreglo operacional para la cooperación en la esfera del agua
6.6 Proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos	6.6.1 Cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua a lo largo del tiempo
6.a Ampliar la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, como los de captación de agua, desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización.	6.6.a Volumen de la asistencia oficial para el desarrollo destinada al agua y el saneamiento que forma parte de un plan de gastos coordinados del gobierno.
6.b Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento.	6.b.1 Proporción de dependencias administrativas locales con políticas y procedimientos operacionales establecidos para la participación de las comunidades locales en la ordenación del agua y el saneamiento.

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Situación en la Comunidad Valenciana

La Comunitat Valenciana, en cuanto a sus recursos hídricos, es altamente dependiente de los recursos provenientes de otras comunidades autónomas. Se estima que esta adicción es del 50% globalmente. Tal y como se observa en la Figura 2, en las provincias de Valencia y Castellón, se deben mantener los caudales que llegan de los ríos Mijares, Júcar y Túrria. Y en Alicante es imprescindible los aportes del Tajo-Segura.

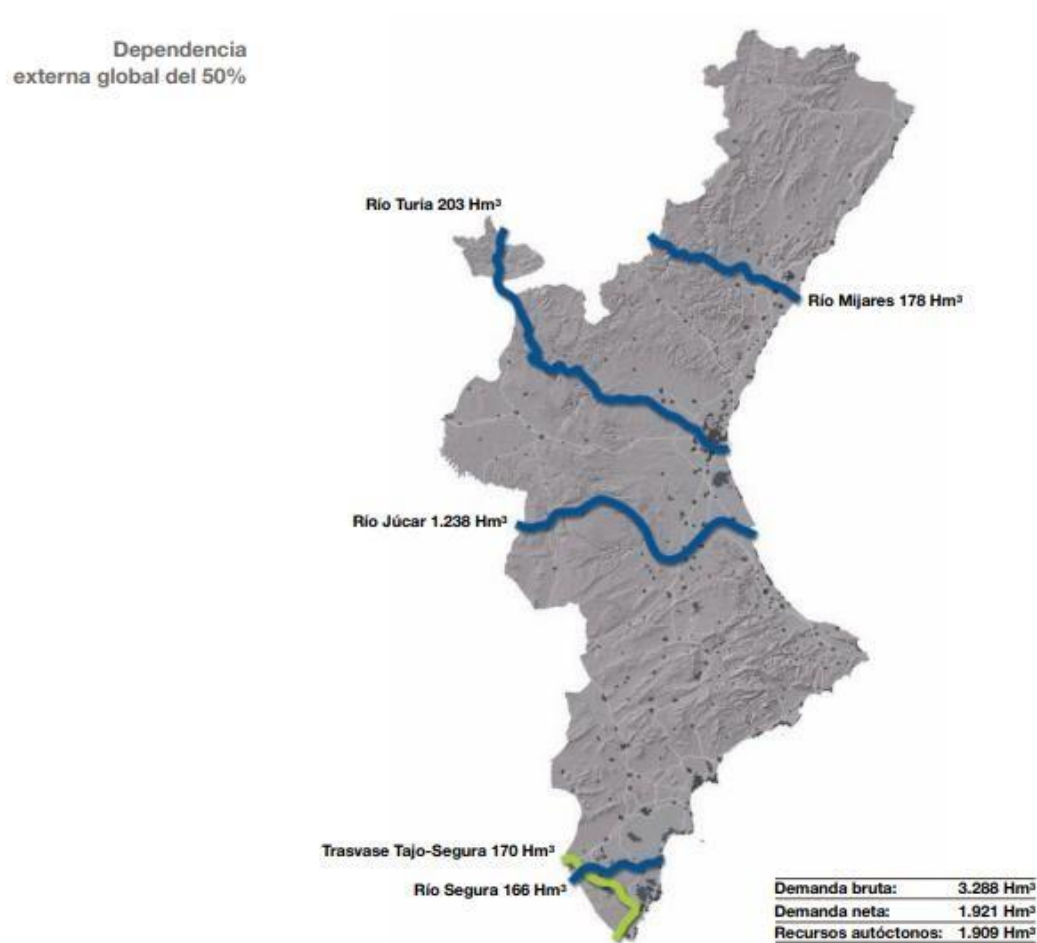


Figura 2. Dependencia exterior Comunidad Valenciana. Fuente: (Criado, 2009)

A esto hay que sumar áreas de entrada reducida debido al mayor uso de consumo en áreas adyacentes, mayor superficie forestal aguas arriba (mayor evaporación) y los efectos del cambio climático que reducen las precipitaciones en zonas montañosas del interior. Esto plantea relaciones de competencia crecientes entre los diferentes usuarios para acceder a recursos de mayor garantía y calidad de suministro.

De acuerdo con lo comentado en el apartado anterior respecto a las ODS, el caso particular de la Comunitat Valenciana, se impulsa la mejora de la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, eliminando los vertidos y minimizando la liberación de productos químicos y materiales peligrosos. Asimismo, se busca garantizar la sostenibilidad de las extracciones y el suministro de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua, con el objetivo de lograrlo antes del año 2030 (CCD, 2016).

Los ríos Júcar y Turia abastecen a la provincia de Valencia de recursos hídricos adecuados, mientras que Castellón y Alicante sufren carencias hídricas muy graves, lo cual ha llevado a la sobreexplotación de los acuíferos costeros e interiores (Amorós, 2002).

Ante la escasez natural de agua y el aumento de la demanda, existe una tensión evidente entre los usuarios por extraer recursos de mejor calidad, especialmente de fuentes subterráneas, que son fundamentales para asegurar el suministro de agua potable. Así, con los bombeos excesivos, la salinización y la contaminación difusa por nitratos se ha generalizado en muchos acuíferos, forzando el aumento de reutilización de residuales y producción de aguas desaladas, con un volumen aproximadamente a 200 $m^3/año$, lo que sitúa a la Comunidad Valenciana en liderazgo a nivel nacional.

Por otro lado, la contaminación difusa por nitratos, cloruros, sulfatos, carbonatos y metales pesados los cuales superan los límites fijados por la legislación. Es común en los sistemas superficiales permeables que se dan en áreas de agricultura y ganadería intensiva o en áreas urbanas e industriales con infraestructura de saneamiento insuficiente.

En este trabajo vamos a centrarnos en las aguas subterráneas de Plana de Sagunto.

La Plana de Sagunto es una llanura costera de 125 km^2 de superficie que se encuentra situada al norte de la provincia de Valencia, en su límite con Castellón.

Cuyas entradas de agua proceden de infiltraciones de agua pluviales caída sobre los afloramientos permeables, trasvases laterales de aguas subterráneas, en particular del Medio Palancia. Sin embargo, hay entradas subterráneas procedentes de la masa de Plana

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m^3/d .

de Valencia Norte y Liria-Casinos, aún que, en menor proporción. E infiltraciones a partir del lecho del río Palancia. Dichas entradas son equivalentes a 104,0 $hm^3/año$.

En la Tabla 2 se indican los términos que componen el balance hídrico del acuífero y su cuantificación.

Tabla 2: Balance hídrico y cuantificación del acuífero (IGME, 1989).

Infiltraciones	Cuantificación ($hm^3/año$)
De lluvia	13,6
De regadíos (por aguas subterráneas)	27,5
De regadíos (por aguas superficiales)	16,0
Entradas laterales	47,0
Total	104,0

Dónde las entradas laterales se reparten en:

Tabla 3: Cuantificación de transferencias laterales que recibe Plana de Sagunto (IGME, 1989).

Transferencias laterales	Cuantificación ($hm^3/año$)
Subsistema Medio Palancia	25,5
Buntsandstein	12
Gátova-Náquera	3,5
Sistema acuífero de la plana de Valencia	3,4
Entrada de agua del mar	2,6

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

En la Figura 3 se muestra el mapa de distribución de sulfatos en las aguas subterráneas de Sagunto en 2005. Se observa como en el sector Noroccidental y Sur hay un aumento de la concentración de los sulfatos equivalente a 600 mg/l en los últimos años, sin embargo, en la zona Oeste se experimenta una señalada disminución en la concentración de sulfatos, lo que podría deberse a una disminución de la actividad agrícola local debido a la sustitución del avance del casco urbano y/o de la actividad industrial (IGME, 2005).

La Plana de Sagunto presenta una alta contaminación de sulfatos de origen agrícola, lo cual la clasifica como una zona con una elevada concentración de sulfatos. En la actualidad, resulta extremadamente difícil encontrar puntos de agua con niveles por debajo de los 250mg/l, que se considera el límite máximo aceptable para la calidad del agua destinada a consumo humano. Es por ello por lo que surge la necesidad de tratar esta agua destinada a consumo humano, para reducir la concentración de sulfatos por debajo del límite máximo.

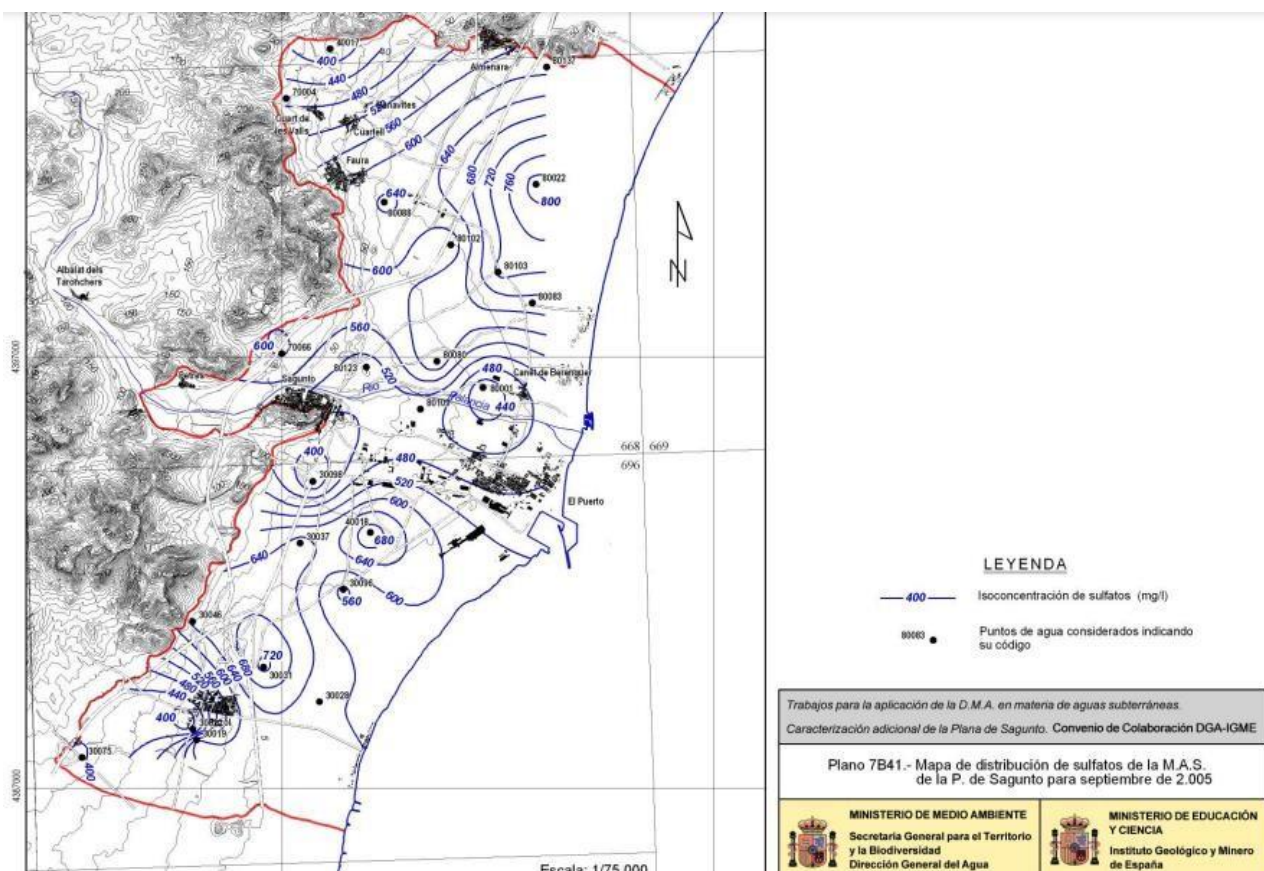


Figura 3. Mapa de distribución de los sulfatos en las aguas subterráneas de Sagunto

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m^3/d .

El consumo de agua subterránea es alto porque la creciente demanda agrícola solo está parcialmente cubierta. Es necesario incrementar los vertidos de este subsistema en Plana de Sagunto, para el suministro de agua de la ciudad de Sagunto, y con fines agrícolas, para que haya agua de calidad aceptable que pueda sustituir el abastecimiento de agua procedente de pozos salinizados costeros. Además de agua de salida de EDAR para completar riego.

Ya que actualmente los recursos hídricos de Sagunto, que es la población que obtiene mayores recursos hídricos para consumo humano, es el embalse de Tous y los pozos subterráneos, aun que estos se encuentran en mal estado debido a la intrusión marina y a la elevada concentración de sulfatos. En cuanto a la desaladora que hay en Sagunto, está inoperativa debido a que es más costosa su extracción y tratamiento que la obtención de Tous, sin embargo, esto cambiará por las condiciones hídricas actuales. Tiene capacidad para 65.000 habitantes, población actual de Sagunto, pero se estima que el crecimiento del polígono industrial arrastrará gran consumo de agua.

Es por ello por lo que se replantea reforzar el suministro hídrico de la zona mediante la instalación de tratamiento de agua que incluye el proceso de ósmosis inversa.

2. Objetivos y justificación del proyecto

Actualmente, las aguas subterráneas de Plana de Sagunto se encuentran en mal estado por el test de balance hídrico y de intrusión marina, con un índice de explotación de 1.1, a causa de la presión significativa por extracciones de agua, debido a que se produce un avance de la cuña salina y un aumento de la concentración relacionados con la intrusión salina (cloruros, sulfatos, sodio o conductividad) (PHJ, 2023).

Tabla 4: Masas en mal estado por cada test del estado cuantitativo.

Masa subterránea	Índice de explotación (K)	Descenso piezométrico	Incumplimientos de cloruros o sulfatos	Brecha* (hm ³ /año)	Test balance hídrico	Test flujo de agua superficial	Test intrusión marina	Test cuantitativo global
Plana de Sagunto	1,1	Sin descenso	Si	-2,2	Malo	No aplicable	Malo	Malo

* Brecha es la diferencia entre la demanda de agua y disponibilidad real de agua en una determinada región o área durante un año. Se utiliza para evaluar si una región tiene suficiente agua disponible para satisfacer diferentes necesidades.

Los focos potenciales de contaminación de las aguas subterráneas incluyen el uso de fertilizantes, especialmente los nitrogenados, en la práctica agrícola, así como la salinización causada por procesos de intrusión marina. Además, se mencionan otros focos de contaminación más localizados, como los vertidos sólidos y líquidos provenientes de fuentes urbanas e industriales:

- Existe la posibilidad de pérdidas en las infraestructuras que transportan las aguas residuales generadas por Almenara hacia la planta depuradora, estimándose en aproximadamente 300.000 m³/año (Navarro, 2005).

Los cambios en la calidad de las aguas subterráneas en los últimos 12 años se dieron en el sentido de un aumento paulatino de su contenido iónico, que afectó prácticamente a todos los parámetros observados, aunque con especial fuerza en el caso de los cloruros, nitratos y sulfatos, debido a que las extracciones de agua producen un avance de la cuña salina y un aumento en la concentración de contaminantes relacionados con la intrusión marina.

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m^3/d .

La calidad de las aguas subterráneas utilizadas para el abastecimiento de agua urbana es muy mala, ya que a menudo existen puntos de almacenamiento de agua utilizados para este fin, que en varios aspectos superan los valores límite para el agua potable estipulados por el Real Decreto 140/2003 del 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Dada la importancia de este tema para la salud humana, se hace necesario el establecimiento a escala nacional de criterios de calidad del agua de consumo humano (Decreto, 2003).

La Plana de Sagunto debe ser catalogada como altamente contaminada por sulfatos de fuentes agrícolas ya que el valor umbral del contaminante de sulfatos está en torno a 600 mg/l.

Los problemas de las altas concentraciones por sulfatos, si se superan los 250 mg/l, es que el agua adquiere un sabor amargo el cual es desagradable y no quita la sed. Pero en una alta concentración, se observa un efecto laxante, junto a irritación gastrointestinal y deshidratación. Los niños experimentan mayor sensibilidad ante sulfatos, por lo que con aguas con niveles superiores a 400 mg/l no deben usarse para la preparación de alimentos infantiles (Lenntech, s.f.).

El objetivo de este proyecto es mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, minimizando la concentración de sulfatos, además se fomenta el aumento del reciclaje y la reutilización segura del agua, así como de mejorar la eficiencia del uso de este recurso en todos los sectores con el fin de reforzar el suministro hídrico de la zona la cual se encuentra actualmente en expansión industrial y social.

Desalación situación global, España y Comunidad Valenciana

A nivel mundial, actualmente se desalinizan y reutilizan más de 200 millones de m^3/s de agua. El aumento de la construcción de plantas desaladoras contrasta con el descenso global de la desalación de agua salobre el año pasado, aunque la capacidad contratada en esta agua aumentó en algunos países, como EE. UU, tanto a nivel municipal como industrial. Por otro lado, la desalinización de agua de baja salinidad también supone una gran proporción de la capacidad total, llegando a suponer casi el 25% del total. (AEDYR, 2020).

La desalinización de agua industrial también ha experimentado un crecimiento considerable en los últimos años. En concreto, la capacidad contratada aumentó un 21% entre 2016 y 2017, principalmente por la mayor desalinización en los sectores de petróleo, gas, minería y electrónica.

La tecnología de desalinización de agua de mar por membrana sigue dominando el mercado mundial. El 90% de la capacidad desaladora contratada desde 2010 ha adoptado esta tecnología, de la que la ósmosis inversa es la tecnología principal (AEDYR, 2020).

Además, un aspecto fundamental de la gran expansión que ha experimentado la industria de tratamiento de agua en España en los últimos años es la reducción del coste de producción del agua tratada. Esto se relaciona con el bajo costo de los sistemas de ósmosis inversa, que instalan el 90% de los procesos de destilación de agua salada en nuestro país, con costos reducidos de mantenimiento del sistema (mayor tiempo de reemplazo de membranas, costos de mano de obra reducidos debido a la automatización del sistema y sistemas de recuperación de energía).

España es uno de los mayores productores mundiales de agua desalada. Actualmente ocupa el cuarto lugar en el país en términos de capacidad de producción de todas las plantas desaladoras. En España se producen aproximadamente 5.000.000 m^3 de agua desalada al día para abastecimiento, riego e industria.

La cantidad de aguas residuales tratadas y la cantidad de agua reciclada han aumentado significativamente durante la última década, pero no cabe duda de que los mayores avances en recursos hídricos no convencionales para satisfacer la demanda existente han venido de la capacidad de desalinización instalada en estas áreas en estos años. El desarrollo de tecnologías de desalación, la reducción de costes (especialmente energéticos) y el fomento de la desalación bajo el programa AGUA lanzado en 2004 ilustran el importante incremento del potencial desalinizador en nuestro país.

El sobre bombeo, la salinización y la contaminación difusa por nitratos ya son frecuentes en muchos acuíferos, lo que obliga a aumentar la reutilización de residuos y la producción de agua desalada, con un uso cercano a los 547.945 $m^3/día$.

La Comunidad Valenciana está a la cabeza a nivel nacional. La producción de agua desalada es otra fuente no convencional que está ganando terreno en la Comunidad Valenciana, aunque la mayoría de las iniciativas se centran en Alicante, donde el campo de los sistemas de ósmosis inversa está bien definido.

Los métodos tradicionales de tratamiento terciario separan los sólidos en suspensión, la turbidez, los nutrientes, los metales pesados y desinfectan el agua, pero para eliminar las sales del agua que causan muchos de los problemas anteriores, se deben usar técnicas más costosas, como la electrólisis o la ósmosis inversa, que aumentan significativamente los costos del agua.

La tecnología de membranas fue inicialmente de uso limitado y se usó solo para la purificación o tratamiento terciario en el proceso convencional. Hasta ahora, se utiliza para aguas residuales con requisitos de descarga muy estrictos. Los principales factores que limitan el desarrollo de la tecnología de membranas en las aplicaciones de tratamiento de aguas residuales son los altos costos operativos y de inversión. Actualmente, la aparición de módulos de membrana menos costosos y más eficientes, así como la necesidad de lograr una buena calidad de las aguas residuales y la mayor eficacia de los equipos de recuperación de energía, hacen que la tecnología de membranas sea de interés (Moreno, 2006).

3. Técnicas de separación: tecnología de membranas

Con el fin de comprender mejor el desarrollo de las tecnologías de membranas, es importante revisar de manera concisa los conceptos fundamentales relacionados con ellas y los procesos que implican. El término "membrana" puede tener diversos significados según el contexto. En el ámbito de procesos de separación, concentración o purificación, una membrana se define sólidamente como una barrera que separa dos fases y tiene la capacidad de operar selectivamente el transporte de diferentes componentes.

Las membranas asemejan el comportamiento de filtros convencionales, pero con una malla más fina o poros mucho más pequeños.

3.1 Tipos de procesos de separación con membranas

Los procesos de separación con membranas se pueden distinguir varios tipos de acuerdo con el principio de la técnica y de la fuerza impulsora.

Tabla 5: Tipos de procesos de separación con membranas según fuerza impulsora.

PRINCIPIO	FUERZA IMPULSORA	OPERACIÓN
Eléctrico	Gradiente de potencial	Electrodialisis
Químico	Gradiente de concentración	Diálisis/Pervaporación
De presión	Gradiente de presión	Ósmosis inversa
		Nanofiltración
		Ultrafiltración
		Microfiltración

Los distintos tipos de membrana se diferencian en el tamaño de poro, por la afinidad hacia la materia disuelta y suspendida, los materiales de construcción, su coste y durabilidad.

Microfiltración (MF): se opera a baja presión con el objetivo de separar partículas de alto peso molecular, coloides suspendidos o sólidos disueltos. Algunas aplicaciones habituales abarcan la separación de células en extractos fermentados, el fraccionamiento de proteínas de la leche, la clarificación de jarabe de maíz y la recuperación de productos químicos en los lavados CIP.

Ultrafiltración (UF): constituye una etapa de separación selectiva utilizada tanto para concentrar como para purificar compuestos de peso molecular medio y alto, tales como proteínas lácteas, carbohidratos y enzimas. Entre las aplicaciones comunes se incluyen la concentración de proteínas en suero, la desalinización de gelatinas, así como la concentración y clarificación de jugos de frutas.

Nanofiltración (NF): relaciona la ósmosis inversa y la ultrafiltración en términos de selectividad de la membrana, está diseñada para eliminar iones polivalentes (calcio y magnesio) en operaciones de ablandamiento.

Ósmosis inversa (OI): es un proceso de alta presión ampliamente utilizado como un método eficiente desde el punto de vista energético para eliminar agua, concentrar compuestos de bajo peso molecular o purificar efluentes.

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

En la Figura 4 se presenta un esquema que ilustra la diferencia de tamaño que las partículas que pueden pasar a través de las diferentes membranas considerando el gradiente de presión entre las dos caras de estas.

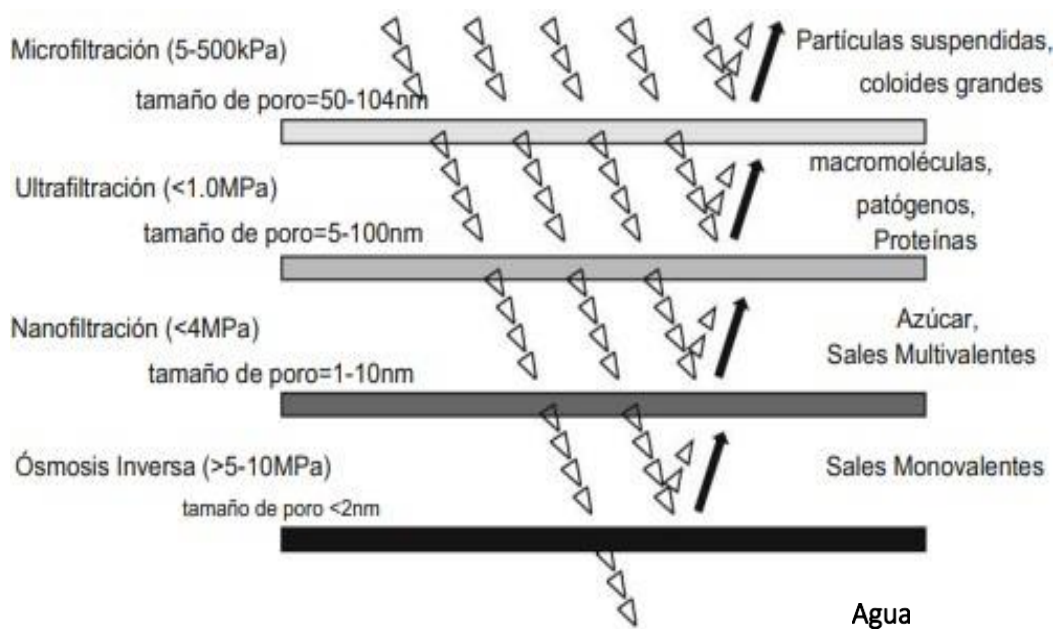


Figura 4: Clasificación de técnicas de separación en base del tamaño de especies a filtrar

3.2 Clasificación de membranas

Las membranas pueden ser categorizadas según su composición y estructura. En términos de composición, las membranas sintéticas se dividen en dos grupos: orgánicas o poliméricas, e inorgánicas o cerámicas.

Las membranas orgánicas generalmente se componen de diversos polímeros, entre los que se incluyen el acetato de celulosa (CA), poliamida (PA), polisulfona (PS), polietersulfona (PES), fluoruro de polivinilideno (PVDF), polipropileno (PP), entre otros. Estas membranas son relativamente económicas, fáciles de fabricar y están disponibles en una amplia gama de tamaños de poros. No obstante, la mayoría de las membranas poliméricas presentan

limitaciones en ciertas condiciones de funcionamiento, como el pH, la temperatura, la presión o la resistencia al cloro, lo que dificulta su aplicación en diversos contextos.

Por otro lado, las membranas inorgánicas generalmente están compuestas por γ -alúmina/ α -alúmina, vidrio de borosilicato, carbono pirolizado, zirconia/acero inoxidable o zirconia/carbono. Estas membranas exhiben una elevada resistencia mecánica, así como estabilidad química y térmica superiores a las membranas poliméricas convencionales. A pesar de sus ventajas, son más frágiles y pueden dañarse fácilmente por caídas o vibraciones indebidas. Además, su costo es considerablemente más alto en comparación con las membranas poliméricas (Cui, 2010).

En términos de su estructura, las membranas se clasifican en simétricas y asimétricas. Las membranas simétricas son homogéneas en todas las direcciones, mientras que las asimétricas exhiben una estructura no uniforme en todo su espesor. Cada una de estas categorías puede ser porosa o no porosa. La mayoría de las membranas de ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI) adoptan una estructura asimétrica, compuesta por una capa delgada denominada película, respaldada por otra capa subyacente más gruesa y porosa. La película desempeña un papel crucial en las funciones principales de la membrana, ya que el flujo y la selectividad dependen exclusivamente de la estructura de esta capa. Su espesor oscila entre 0,1 y 0,5 μm , aproximadamente, representando alrededor del 1% del espesor de la capa porosa subyacente.

El siguiente avance en el desarrollo de la tecnología de tratamiento de agua mediante membranas fue la creación de membranas compuestas de capa fina (TFC). Estas membranas presentan una capa activa de poliamida que demuestra mayores índices de rechazo de sales y contaminantes orgánicos, junto con una mayor eficiencia en la producción de agua. Una membrana compuesta es una variante especial de membrana asimétrica en la cual las capas superior e inferior, preparadas en diferentes etapas, pueden estar compuestas por diversos materiales, lo que facilita la optimización del proceso de fabricación de cada capa de manera independiente. Este tipo de membranas combina la selectividad de las membranas delgadas depositadas con el alto flujo de permeado característico de las membranas porosas (Sotto Díaz, 2008).

3.3. Módulos de membrana

Las membranas se organizan en una unidad de operación conocida como módulo, siendo esta la entidad física que alberga la membrana. La elección del módulo se guía por la facilidad de montaje, la capacidad de compactación y la modulación. Principalmente, existen cuatro tipos de módulos:

- **Módulo Plano:** Compuesto por placas de soporte planas y rígidas entre las cuales se colocan las membranas individualmente. Aunque son fácilmente desmontables, presentan la desventaja de tener una baja densidad de compactado.

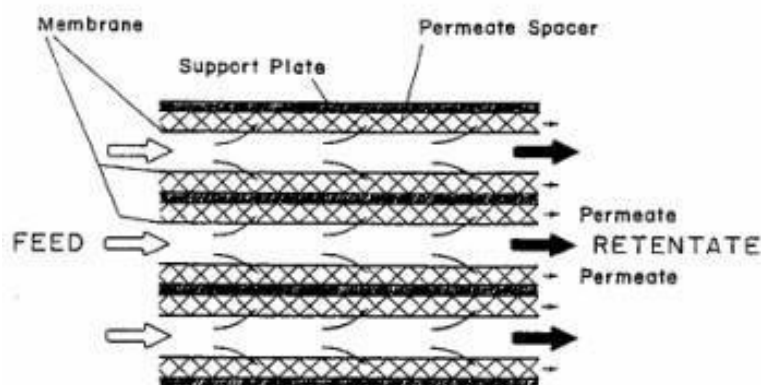


Figura 5: Esquema módulo plano

- Enrollamiento en Espiral: Formado por un tubo que alberga varias capas de membranas planas, separadas por un espaciador que no solo mantiene abierto un canal de flujo para la alimentación, sino que también genera turbulencias para reducir el efecto de la polarización por concentración. Se utiliza principalmente en aplicaciones de alto flujo con cantidades mínimas de sólidos en suspensión. Su ventaja radica en su bajo costo material y operativo.

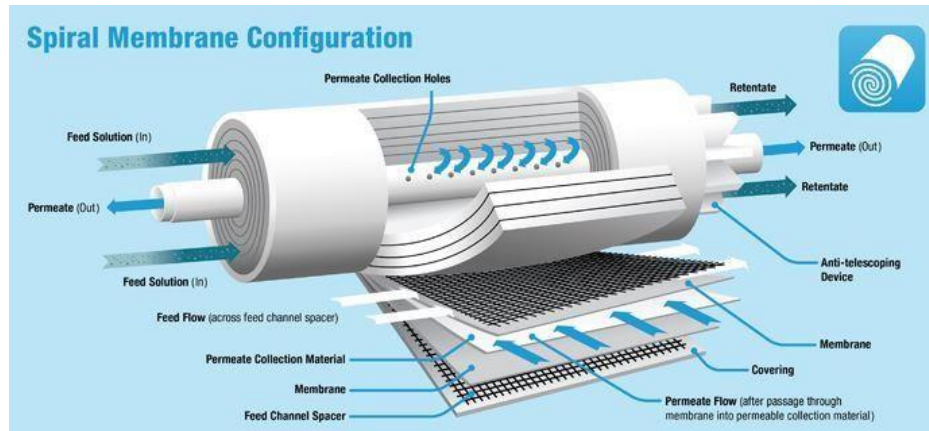


Figura 6: Esquema de membrana en enrollamiento en espiral (Soutullo, 2016).

- Tubulares: Constituidos por cilindros en cuyo interior se disponen las membranas, que también tienen forma cilíndrica. Aunque son poco compactos, son robustos y pueden procesar corrientes a alta velocidad. Son altamente resistentes al taponamiento al procesar corrientes con grandes cantidades de sólidos en suspensión o componentes fibrosos.

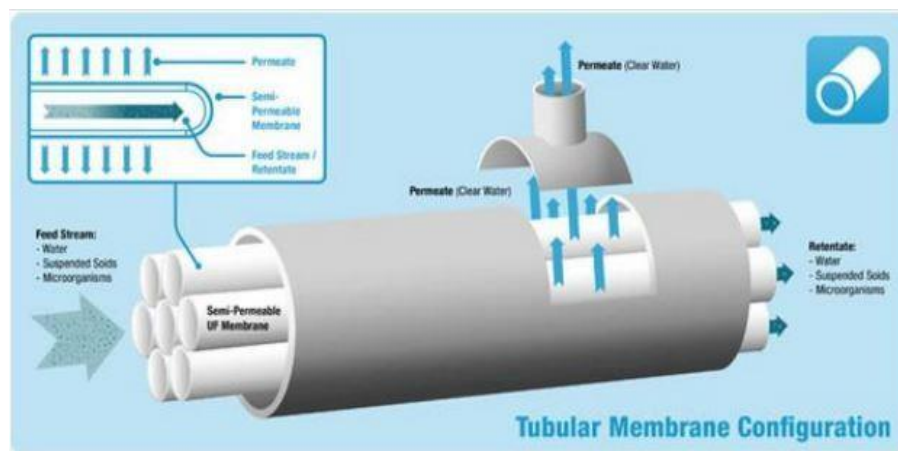


Figura 7: Esquema de membrana en módulo tubular (Soutullo, 2016).

- **Fibra Hueca:** Formado por un haz de varios miles de fibras huecas. El flujo de alimentación puede ocurrir dentro o fuera de las fibras. Son muy compactos, lo que proporciona densidades significativas de flujo de permeado. Son especialmente adecuados para líquidos con bajos niveles de sólidos.

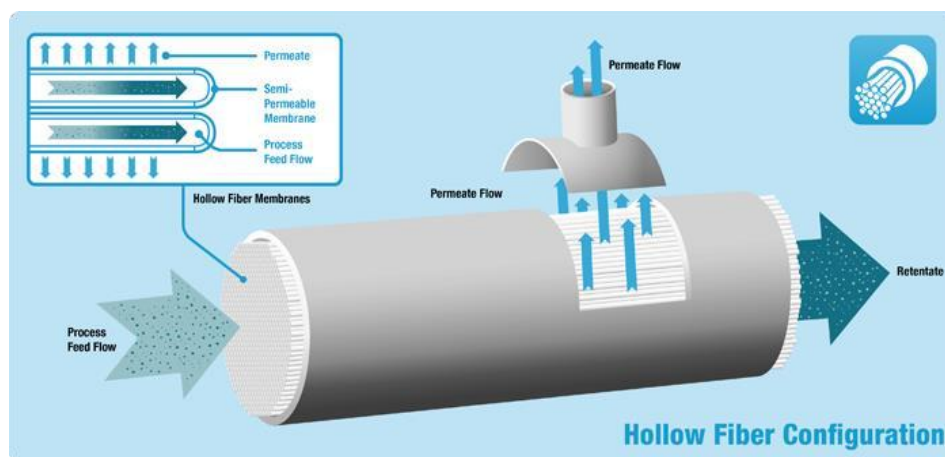


Figura 8: Esquema módulo de membrana de fibra hueca (Soutullo, 2016).

3.4. Proceso de ósmosis inversa

De las técnicas existentes mencionadas anteriormente, para la eliminación de sulfatos, se ha seleccionado la ósmosis inversa para este proyecto, ya que esta técnica de filtración permite impedir el paso de algas, virus, iones monovalentes y polivalentes, bacterias y protozoos.

La tecnología de ósmosis inversa (OI) se basa en el fenómeno natural de ósmosis, un proceso químico en el cual dos soluciones con concentraciones diferentes alcanzan el equilibrio a medida que fluye agua a través de una membrana semipermeable desde la solución diluida hacia la más concentrada. La fuerza impulsora de este movimiento es conocida como presión osmótica y está directamente vinculada a la concentración de sales en las soluciones. Cuando el proceso se revierte, forzando la solución a través de la membrana en la dirección opuesta mediante la aplicación de una presión mayor que la presión osmótica del lado de la solución concentrada, se lleva a cabo la ósmosis inversa.

Este método permite obtener agua dulce a partir de una solución de agua salina, donde el agua resultante está desmineralizada y el agua residual se vuelve más concentrada que la solución original.

Los sistemas de ósmosis inversa se componen principalmente de módulos de membranas, bombas de alta presión, una central eléctrica y, en algunos casos, dispositivos de recuperación de energía. El consumo energético de una planta de ósmosis inversa depende principalmente de las propiedades de la membrana y de la salinidad del agua de alimentación. Entre las ventajas de estos sistemas se destacan: un menor consumo de energía en comparación con otros procesos de desalinización, costos de inversión bajos para capacidades reducidas, facilidad de operación, flexibilidad para aumentar la capacidad de tratamiento, tamaño compacto y capacidad para adaptarse a fuentes de energía renovable (María Grueso-Domínguez, 2019).

La ósmosis inversa (OI) es el proceso de reducir el flujo a través de una membrana semipermeable y ejercer un empuje mayor que la presión osmótica, la cual puede definirse como la presión que se debe aplicar a una solución para detener el flujo neto de disolvente a través de la membrana, en la dirección opuesta del proceso osmótico. Esta, consta de tres corrientes diferenciadas: el agua a tratar, que se denomina corriente de alimento, el concentrado en los solutos que rechaza la membrana, corriente de rechazo y la corriente de permeado que está libre total o parcialmente de los solutos que ha rechazado la membrana.

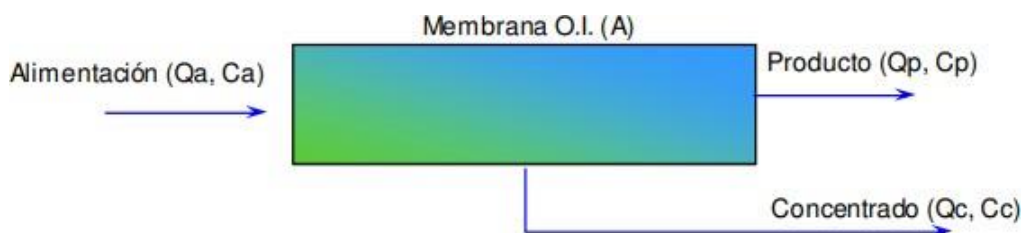


Figura 9. Componentes membrana O.I

- Alimentación: corriente de agua que entra al sistema de ósmosis inversa tras un proceso de pre-tratamiento y acondicionamiento. [$\text{m}^3/\text{día}$]

- Producto: agua permeada a través de la membrana a la que se le han retirado parte de las sales que contenía previamente. También se denomina “permeado”. [m³/día]
- Concentrado: agua de arrastre a la salida del sistema, contiene sales que han sido separadas por las membranas. Se le denomina también “rechazo”. [m³/día]
- Recuperación: porcentaje del caudal de alimentación que se transforma en producto. [%]
- Flux: parámetro que mide el caudal de permeado por unidad de superficie de membrana. [m³/m²día]

$$J = \frac{Q_p}{A} \quad (1)$$

Dónde:

Q_p = caudal de permeado [m³/día]

A = área de contacto de la membrana [m²]

- Paso de sales: relación entre las concentraciones de sales del producto y la alimentación medido en porcentaje o tanto por uno. [%]

$$Sp = \frac{C_p}{C_a} \quad (2)$$

Dónde:

C_p = concentración de permeado

C_a = concentración de alimentación

- Rechazo de sales: cociente entre la diferencia de concentración entre la alimentación y el permeado y la concentración de alimentación.[%]

$$Sr = \frac{C_a - C_p}{C_a} \quad (3)$$

Dónde:

C_p = concentración de permeado

C_a = concentración de alimentación

El factor de conversión en el proceso de ósmosis inversa indica la relación entre el caudal de permeado y el caudal de agua de alimentación. Es una medida importante para entender la eficiencia del sistema y cuantificar la cantidad de agua que se ha desalinizado o purificado en comparación con la cantidad de agua que ingresa al sistema.

$$\text{Conversión (\%)} = \frac{Q_p}{Q_a} \cdot 100 \quad (4)$$

En general, los sistemas de ósmosis inversa bien diseñados y operados pueden tener factores de conversión superiores al 50%, lo que implica una alta eficiencia en la producción de agua desalinizada o purificada. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la eficiencia del sistema puede variar según las condiciones del agua de alimentación, el diseño del sistema y los parámetros de operación.

Las unidades de ósmosis inversa requieren sistemas de pretratamiento, equipos de bombas de alimentación, tanques presurizados con membranas (portamembranas o housings), equipos de dosificación de productos químicos, etc. Para que funcionen correctamente.

Las membranas más empleadas en el proceso de ósmosis inversa son las de acetato de celulosa asimétricas integrales, por ser poco sensibles al ensuciamiento. Y las de tipo de TFC de poliamida, debido a que producen flujos de permeado superiores con índices de rechazo de sales muy elevados.

4. Legislación

Los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano en España están establecidos en el **Real Decreto 140/2003, 7 de febrero**, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humanos. Dichos criterios establecen los parámetros, junto con sus límites máximos permitidos para diferentes contaminantes que están presentes en el agua potable, con el fin de garantizar la calidad y seguridad para consumo humano.

Se debe tener en cuenta la cantidad de agua de consumo suministrada:

- “El volumen de agua de consumo distribuida deberá ser suficiente para las necesidades higiénico-sanitarias de la población y el desarrollo de la actividad de la zona de abastecimiento. A estos efectos, la dotación neta o de consumo medio, como objetivo mínimo, debe ser, al menos 100 litros por habitante y día, salvo que el plan hidrológico vigente haya establecido una dotación superior en cuyo caso no podrá minorizarse” (Decreto, 2003).

Algunos de los principales parámetros y límites establecidos por este Real Decreto son:

- a. Parámetros microbiológicos: se establecen límites para bacterias coliformes, *Escherichia coli*, *Enterococo* intestinal, que son indicadores de contaminación fecal y pueden indicar presencia de microorganismos patógenos.
- b. Parámetros químicos: se establecen límites máximos para diversos contaminantes químicos, como metales pesados, nitratos, pesticidas, compuestos orgánicos, subproductos de desinfección, y otros compuestos tóxicos:

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Tabla 6: Valores paramétricos químicos según RD 140/2003

Parámetro	Valor Paramétrico
Antimonio	0,10 µg/L
Arsénico	10 µg/L
Benceno	1,0 µg/L
Boro	1,5 mg/L
Bromato	10 µg/L
Clorato	0,25 mg/L
Clorito	0,25 mg/L
Cobre	2,0 mg/L
Fluoruro	1,5 mg/L
Nitrato	50 mg/L
Nitritos	0,50 mg/L
Plaguicida individual	0,10 µg/L
Plomo	5,0 µg/L
Selenio	20 µg/L

c. Parámetros indicadores de calidad:

Tabla 7: Valores paramétricos de indicadores de calidad según RD 140/2003

Parámetro	Valor Paramétrico
Aluminio	200 µg/L
Cloruro	250 mg/L
Conductividad	2500 $\frac{\mu S}{cm}$ a 20°C
Hierro	200 µg/L
Oxidabilidad	5,0 mg/L
pH	6,5 a 9,5
Sodio	200 mg/L
Sulfato	250 mg/L
Turbidez	4,0 UNF

- d. Parámetros organolépticos: se establecen criterios de olor, sabor y aspecto visual del agua, con objetivo de garantizar la no presencia de características desagradables que puedan afectar su aceptabilidad.
- e. Parámetros radioactivos: se establecen límites para la radiactividad del agua potable, con el fin de proteger la salud de las personas frente a la exposición a la radiación.

5. Composición inicial aguas subterráneas Plana de Sagunto

Ubicación de la planta

Durante los meses de junio y septiembre de 2005, el IGME-TEYGE, S.A. realizaron conjuntamente sendas campañas de control piezométrico, de calidad y de intrusión con objeto de determinar la actual situación hidráulica e hidroquímica de la masa de agua subterránea de la Plana de Sagunto (IGME, 2005).

En la tabla adjunta se muestran las piezometrías medidas en los diferentes puntos de agua que constituyen la red de control piezométrico en las dos campañas realizadas (en junio y en septiembre de 2005); el nivel de la superficie del agua subterránea se indica en m. desde la superficie topográfica, mientras que el nivel piezométrico se indica en metros sobre el nivel mar:

Tabla 8: Piezometrías medidas en los diferentes puntos de agua

RED DE CONTROL				JUNIO			SEPTIEMBRE		
CÓDIGO	X	Y	Z	FECHA	NIVEL	N.P.	FECHA	NIVEL	N.P.
292640017	734119	4404138	70,00	14/06/2005	23,20	46,80	27/09/2005	23,61	46,39
292670004	733109	4402992	71,59	14/06/2005	42,00	29,59	22/09/2005	41,82	29,77
292670066	733000	4397075	63,10	10/06/2005	63,00	0,10	27/09/2005	63,10	0,00
292680001	737663	4396281	18,76	10/06/2005	18,03	0,73	27/09/2005	18,63	0,13
292680080	736595	4396895	23,29	10/06/2005	23,18	0,11	21/09/2005	23,00	0,29
292680083	738800	4398245	5,05	14/06/2005	4,45	0,60	21/09/2005	4,80	0,25
292680088	735375	4400585	22,25	14/06/2005	14,20	8,05	22/09/2005	17,72	4,53
292680103	738010	4398958	7,00	20/06/2005	6,80	0,20	27/09/2005	6,93	0,07
292680109	736215	4395785	25,82	20/06/2005	24,60	1,22	27/09/2005	24,83	0,99
292680123	734960	4396760	40,00	20/06/2005	38,80	1,20	27/09/2005	39,80	0,20
292680137	739130	4403715	2,60	14/06/2005	2,30	0,30	27/09/2005	2,18	0,42
292730019	731030	4388105	17,00	10/06/2005	17,15	-0,15	21/09/2005	17,31	-0,31
292730022	730950	4388350	18,00	09/06/2005	15,61	2,39	21/09/2005	17,20	0,80
292730028	733875	4388990	2,40	10/06/2005	2,30	0,10	21/09/2005	2,50	-0,10
292730031	732579	4389800	5,77	09/06/2005	5,04	0,73	21/09/2005	5,12	0,65
292730037	733428	4392675	16,00	09/06/2005	21,40	-5,40	21/09/2005	16,40	-0,40
292730046	730935	4390861	36,92	20/06/2005	13,10	23,82	22/09/2005	13,01	23,91
292730075	728381	4387695	46,78	09/06/2005	30,20	16,58	27/09/2005	30,61	16,17
292730096	734425	4391600	6,58	09/06/2005	7,60	-1,02	22/09/2005	8,43	-1,85
292740018	735050	4392925	15,57	20/06/2005	15,30	0,27	27/09/2005	15,41	0,16
292670012	731604	4396215	72,39	20/06/2005	42,00	30,39			
292640043	740680	4404215	2,00	14/06/2005	0,00	2,00			

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

La planta se va a localizar cerca de los pozos, en concreto, entre los pozos 292680088 y 292670004 que se sitúan al sur de la población de Faura. En la Figura 10 se pueden observar dichos pozos.

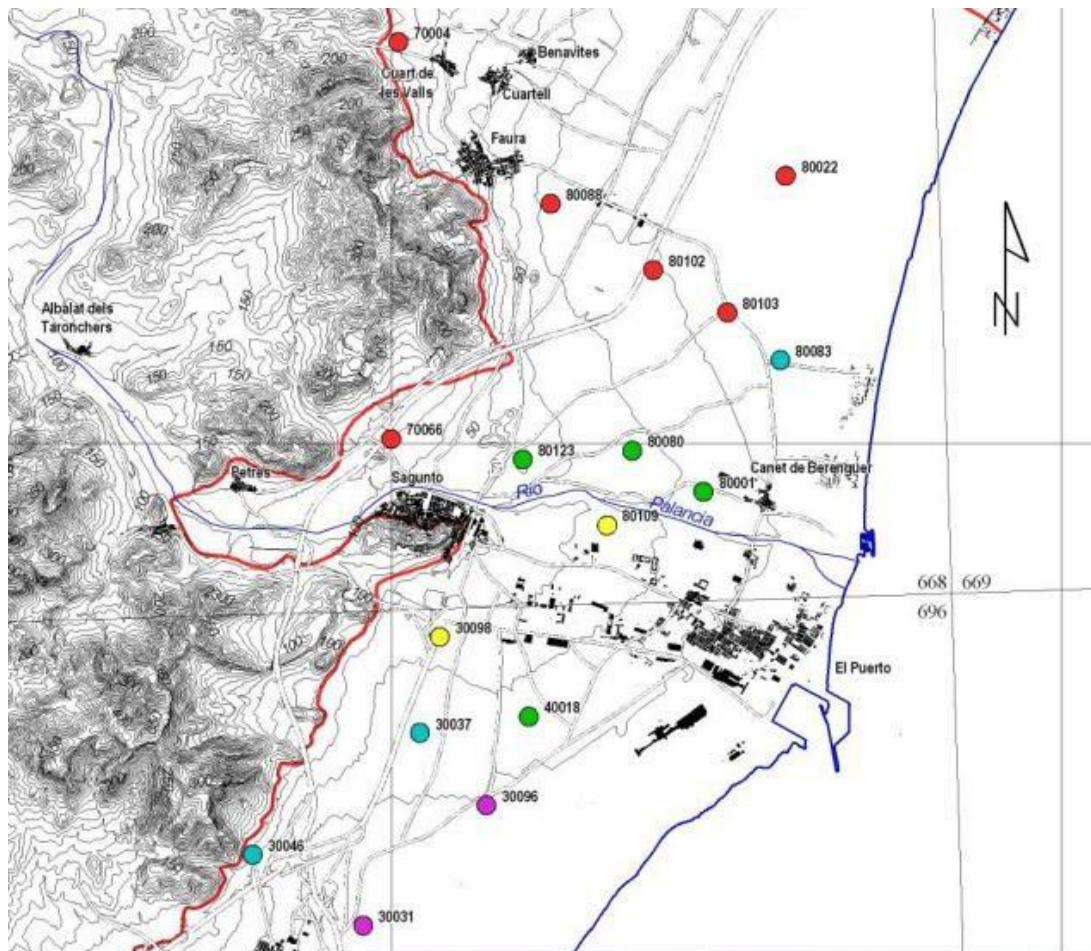


Figura 10: Mapa con la ubicación de los pozos

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Si volvemos a observar la Figura 3. Mapa de distribución de los sulfatos en las aguas subterráneas de Sagunto Figura 11 en la zona escogida cerca del pozo 292680088 la concentración máxima registrada de sulfatos es de 600 mg/l.

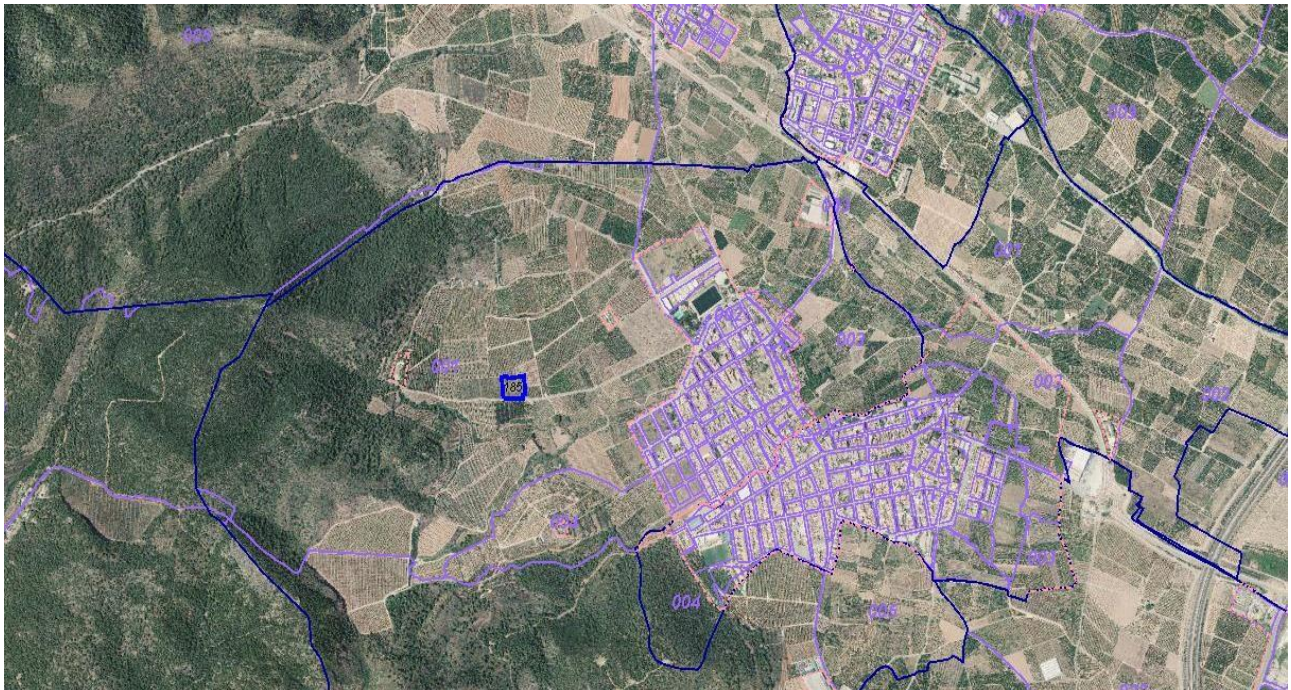


Figura 11: Ubicación dónde se instalará planta dirección general del catastro

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

La parcela se encuentra en Polígono 1 Parcela 185 Pla. Benifairo de les Valls (Valencia). Consta de una superficie de 5.018 m². Al lado de la carretera para facilitar el transporte. En la Figura 12 se puede contemplar mejor dónde se sitúa dicha parcela.

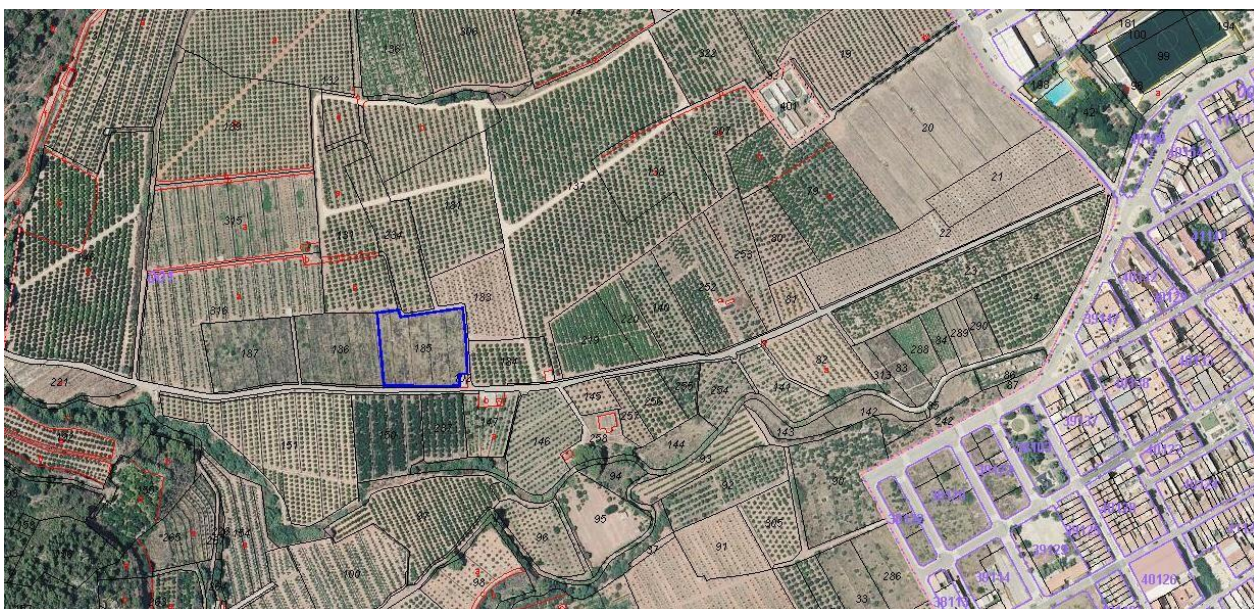


Figura 12: Ubicación de la parcela dirección general del catastro

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Datos iniciales

Tal y como se puede observar en los siguientes mapas, las zonas escogidas se encuentran sobre zonas de uso agrario, cítricos en concreto y de permeabilidad considerable. Como se ha mencionado anteriormente, las aguas de Plana de Sagunto están altamente contaminadas por sulfatos de origen agrícola.

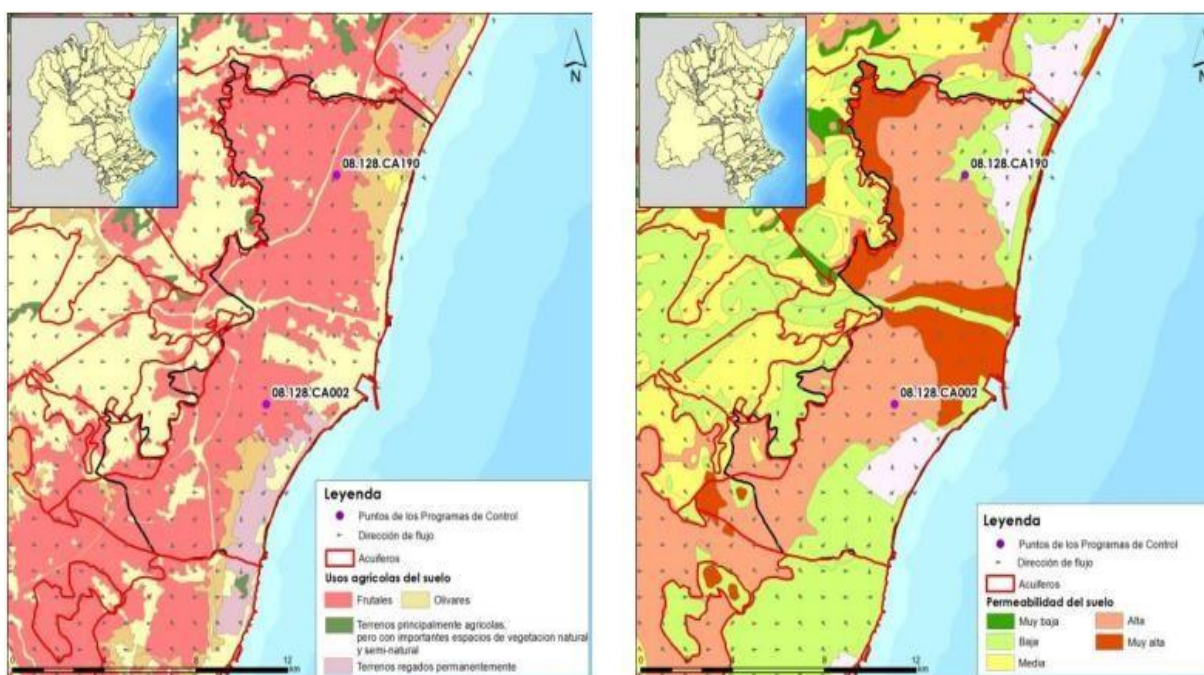


Figura 13. Direcciones de flujo, distribución de acuíferos, usos y permeabilidad del suelo

La misma red de puntos de agua utilizada para el control piezométrico sirvió también para el muestreo hidroquímico de la Plana de Sagunto realizado por el IGME-TEYGE, S.A. en los meses de junio y septiembre de 2005. En las tablas adjuntas se presentan los valores medios obtenidos en ambas campañas; el valor de la DQO y de la concentración de iones se indica en mg/l y el de la conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$:

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Tabla 9: Concentraciones cationes

Cationes	mg/L
<i>NH₄</i>	0,145
<i>K</i>	11,429
<i>Na</i>	129,823
<i>Mg</i>	125,723
<i>Ca</i>	241,476
<i>Sr</i>	4,156
<i>Ba</i>	0,01

Tabla 10: Concentraciones aniones

Aniones	mg/L
<i>HCO₂</i>	210,003
<i>NO₂</i>	172,236
<i>Cl</i>	341,937
<i>SO₄</i>	610
<i>Br</i>	0,2
<i>PO₄</i>	1,35

Tabla 11: Concentraciones neutrones

Neutrones	mg/L
<i>SiO₂</i>	12,015
<i>B</i>	4,606

Tabla 12: Características físico-químicas

Característica	Valor
Residuo seco	3110 mg/L
Temperatura	18-25°C
pH	7,6

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Se desea abastecer a la población de la Comarca de Camp de Morvedre, la cual tiene una población de 90.000 habitantes. Según la estadística sobre el suministro y saneamiento del agua el consumo medio de agua de un hogar español es de 133 litros por habitante y día, el mismo que en 2018.

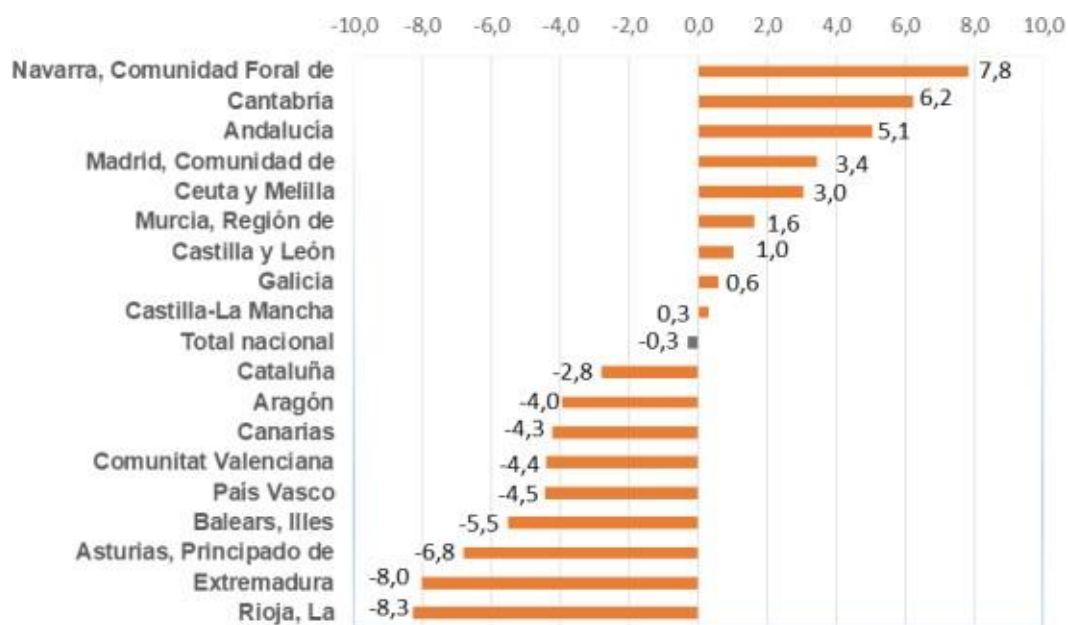


Figura 14: Porcentaje de variación bienal de los volúmenes registrados y distribuidos a los usuarios por comunidad autónoma.

Tabla 13: Población y consumo

COMARCA	POBLACIÓN	CONSUMO
CAMP DE MORVEDRE	90.000 habitantes	133 l/hab-día

En este proyecto, la capacidad de producción de la planta diseñada para tratar agua con altos niveles de sulfatos se calculará considerando la población del área donde se ubicará dicha planta, así como el consumo de agua por habitante/día establecido por la legislación.

El suministro de agua al municipio de Sagunto se basa principalmente en recursos superficiales procedentes del trasvase Júcar-Turia o el embalse de Tous. Además, y aunque de manera muy limitada, se cuenta con los recursos subterráneos provenientes de la explotación de los subsistemas hidrogeológicos del Medio Palancia y de la Plana de Sagunt, captados mediante pozos de titularidad privada y pública, utilizándose estos últimos únicamente como reserva ante situaciones de emergencia (Miteco, 2006).

La producción diaria de la planta se ha establecido en 12.000 $m^3/día$. Esta planta supondrá un aumento a la robustez en el suministro de agua potable a esta comarca, aunque no sea capaz de aportar la totalidad de agua requerida en dicha zona, si constituye un elemento de seguridad que cubriría la demanda en caso de cualquier incidencia en los actuales sistemas de suministro.

Una vez conocido el caudal de agua que debe salir de la planta potabilizadora se determina el caudal de alimentación de la planta. Con el fin de obtener la mejor alternativa con mayor rentabilidad económica, estudiaremos las siguientes conversiones indicadas en la *Tabla 14* que requieren esos caudales de alimentación. Con el fin de obtener la mejor alternativa con mayor rentabilidad económica.

Tabla 14: Caudal de alimentación según conversión

Conversión (%)	Caudal de alimentación ($m^3/día$)
70	17142,85
75	16000
80	15000
85	14117,65

6. Metodología

Captación y bombeo de agua

La cantidad de agua que debe suministrarse a la planta depende de la capacidad de producción y la eficiencia del sistema de ósmosis inversa. Al tratar agua subterránea, será necesario construir uno o varios pozos o sondeos. Para determinar la tipología y la cantidad de pozos o sondeos a construir, se debe realizar un estudio geológico e hídrico. Este estudio ayudará a determinar la solución más adecuada, incluyendo la necesidad de construir uno o más pozos, su ubicación, diámetro y profundidad, entre otros factores.

Los pozos radiales o drenes horizontales son sistemas en los que se utilizan tubos perforados dispuestos horizontalmente desde un pozo revestido de hormigón. Estos tubos permiten el acceso de varios operarios y su diámetro es suficientemente amplio Figura 15. El propósito de este diseño es ampliar el alcance efectivo del pozo para aumentar el caudal específico de drenaje. De hecho, el pozo con drenes horizontales, excluyendo las pérdidas de carga internas, se comporta de manera similar a un pozo vertical con un radio amplio.

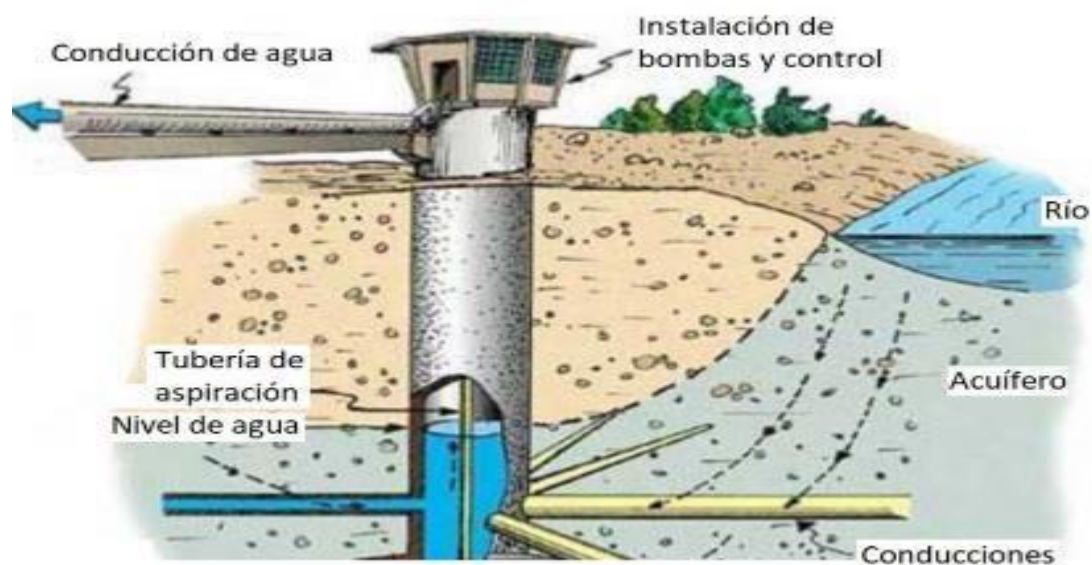


Figura 15: Esquema de pozo tipo Ranney

El agua se desplaza dentro del pozo a través de los tubos perforados horizontales y luego se bombea hacia el exterior. Los drenes pueden ser perforados con una inclinación ascendente para penetrar en múltiples horizontes de acuíferos. Se instalan utilizando martillos neumáticos o mediante inyección. La longitud de los drenes varía dependiendo del área que se desea drenar, y oscilan entre 30 y 100 metros de longitud.

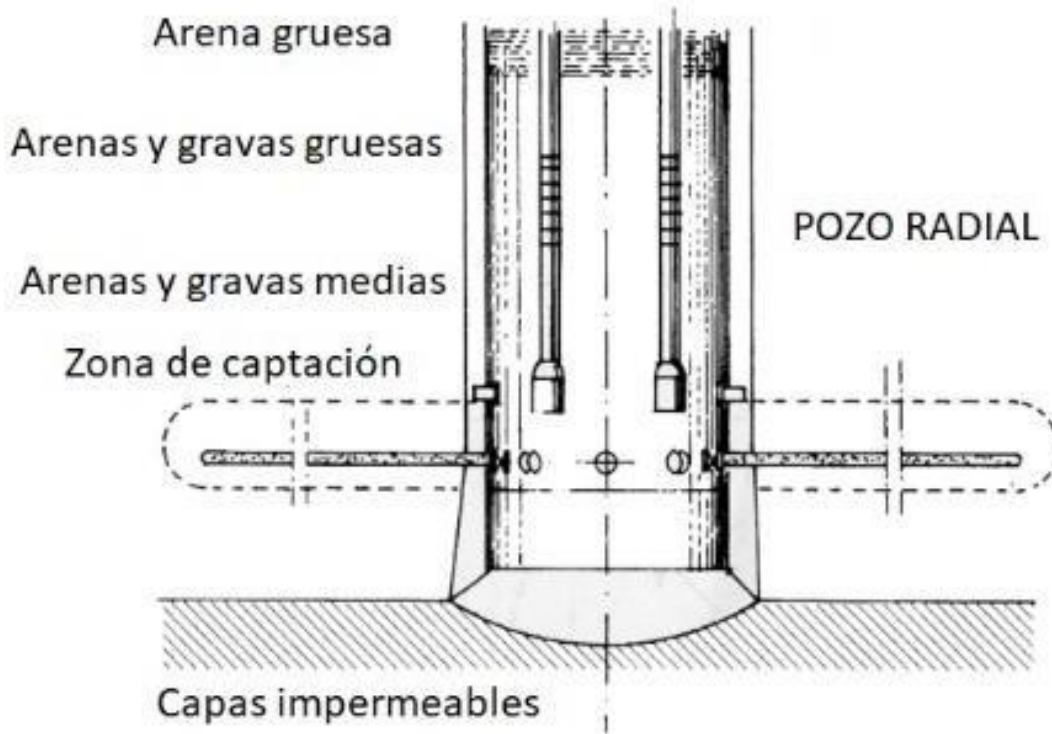


Figura 16: Pozo tipo radial

Por otro lado, al seleccionar el tipo de bomba (sumergible o de superficie), se deben considerar varios factores. Esto incluye la solución de captación de agua elegida (pozo o pozo radial), la altura necesaria para la extracción y el transporte del agua hacia la planta potabilizadora, las pérdidas de carga en la succión y la descarga, las pérdidas de carga en los accesorios instalados (válvulas, codos, etc.), el tiempo de funcionamiento de las bombas, las condiciones de funcionamiento para evitar la cavitación y el caudal requerido para alimentar la planta potabilizadora.

Según (IGME, 2005), las profundidades de la mayoría de las perforaciones son superiores a 20 metros de altura. Como la altitud de Faura es de 27 metros, nuestro pozo tendrá una profundidad de 22 metros.

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m^3/d .

Se seleccionará una configuración de N + 1, lo que significa que habrá una bomba de reserva que se utilizará en caso de que alguna de las bombas en funcionamiento falle o se realice mantenimiento en alguna de ellas.

Según la bomba escogida, el diámetro de esta, será el diámetro del pozo.

Por tanto, la bomba seleccionada es de la empresa Grundfos, el modelo SPE, en concreto, SPE 215-1, se trata de una bomba sumergible.



Figura 17: Tipo de bomba seleccionada. Modelo SPE 215-1

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Producto	SPE 215-1	Líquido	
Código	99890655	Rango de temperatura del líquido	-15 .. 60 °C
Número EAN	5713835788061	Datos eléctricos	
Precio	EUR 17704	Tipo de motor	PM
Técnico		Motor flange design	Grundfos
Velocidad bomba en el que se basan los datos de la bomba	3000 rpm	Potencia nominal - P2	22 kW
Caudal nominal	215 m ³ /h	Frecuencia de red	50 Hz
Altura nominal	25 m	Tensión nominal	3 x 350-440 V
Etapas	1	Frecuencia máxima	100 Hz
Número de impulsores de diámetro reducido	NONE	Intensidad nominal	46.2 A
Cierre del motor	SIC/SIC NBR	Velocidad nominal	1650-3000 rpm
Homologaciones	CE,EAC,UKCA,SEPRO,MOROCCO	Eficiencia del motor a carga total	92.8 %
Homologaciones para agua potable	ACS,DM174	Número de polos	4
Tolerancia de curva	ISO9906:2012 3B	Método de arranque	Direct-on-line (DOL)
Modelo	C	Grado de protección (IEC 34-5)	IP68
Versión de motor	T60	Clase de aislamiento (IEC 85)	F
Válvula de retorno	YES	Protección de motor integrada	NONE
Materiales		Protec. térmica	exterior
Bomba	Stainless steel	Transmisor de temp. incorporado	no
	EN 1.4301	Longitud de cable	5 m
		Cable type	FLAT
		Número de enchufes	1

Figura 18: Especificaciones de la bomba modelo SPE 215-1

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

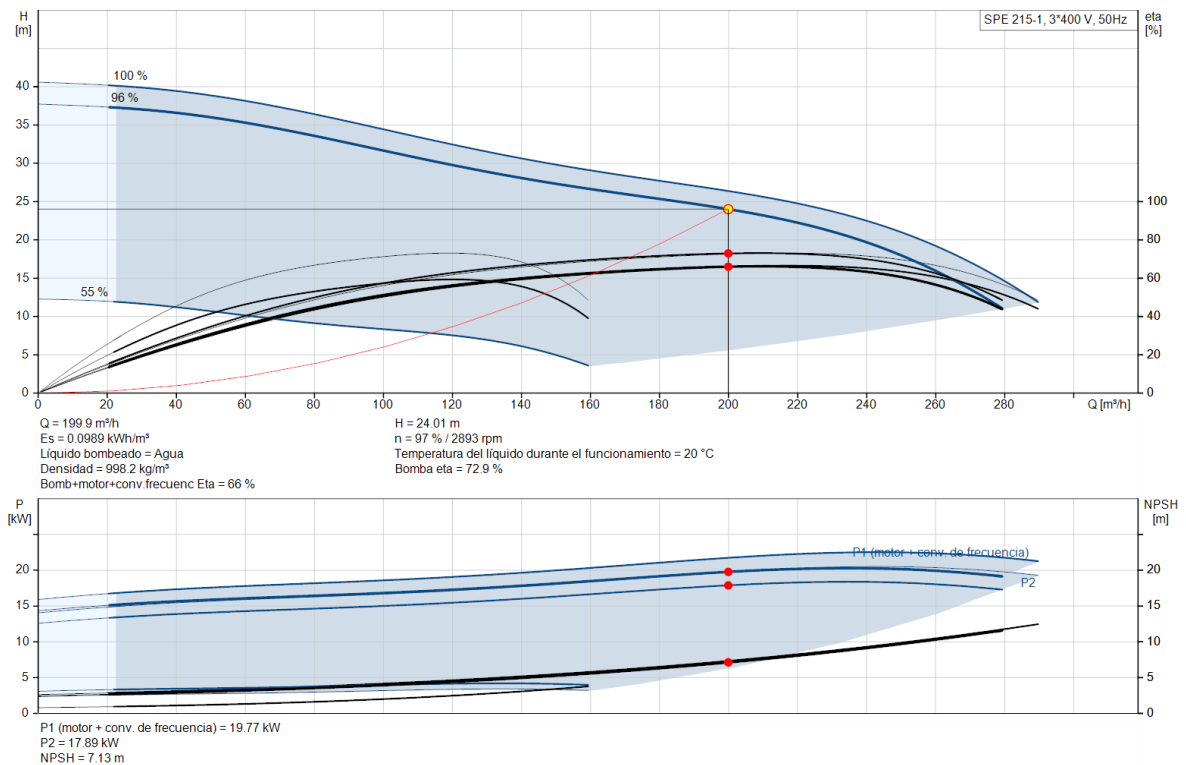


Figura 19: Curva característica y punto de funcionamiento bomba SPE 215-1

Se instalarán dos bombas que trabajen al 70% cada una, y, además, habrá una tercera por si alguna de ellas falla en algún momento.

Se necesitan extraer 185.18 l/s por lo que se necesitarán tres pozos extrayendo 42 l/s aproximadamente cada uno para cubrir dicha demanda.

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

A continuación, se escoge la bomba hidráulica que enviará el agua del pozo a la planta. La escogida es la bomba LS 200-150-508B de la empresa Grundfos.

Nombre del producto	LS 200-150-508B, 1F2DSBBQE1 132/4	Instalación	
Ningún producto	99485159	Rango de temperatura ambiente	-20 .. 55°C
número EAN	5713829867727	Presión máxima de funcionamiento	16 barras
Técnico		Estándar de brida	ESTRUENDO
Flujo nominal	560,1 m ³ /h	Entrada de bomba	DN 200
cabeza clasificada	92,87 metros	Salida de bomba	DN 150
Nombre del impulsor	508 milímetros	Clasificación de presión para la conexión	PN 16
Sello primario del eje	barbacoa	Tipo de acoplamiento	Acoplamiento de pasador y casquillo
Aprobaciones	CE, CAO	Código de conexión	F2
Tolerancia de curva	ISO9906:2012 2B	Líquido	
Versión bomba	1	Líquido bombeado	Agua
Enfriamiento	CI 411	Rango de temperatura del líquido	0 .. 100°C
Dirección de rotación	CW	Temperatura del líquido seleccionada	20°C
Flujo mínimo de succión continua	175,3 m ³ /h	Densidad	998,2 kg/m ³
Altura máxima, diámetro real del impulsor	49,42 metros	Datos eléctricos	
Levante la cabeza para apagar	0,00 %	Tipo de motor	SIEMENS
Flujo, punto de mejor eficiencia (BEP)	349,4 m ³ /h	Potencia nominal - P2	132 kilovatios
Relación de flujo (calculado/BEP)	0,00 %	Frecuencia de red	50Hz
Relación de cabeza (diámetro resultante/máx.)	0,00 %	Tensión nominal	3 x 380-420D/660-725V
Relación de diámetro (real/máx.)	0,00 %	Corriente nominal	235-235A
Presión máxima de trabajo	0,4838MPa	Corriente de arranque	820%
Límite máximo permitido de presión de succión	1,116MPa	cos phi - factor de potencia	0,85
		velocidad nominal	1490 rpm

Figura 20: Especificaciones de la bomba LS 200-150-508B

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m^3/d .



Figura 21: Bomba LS 200-150-508B Grundfos

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

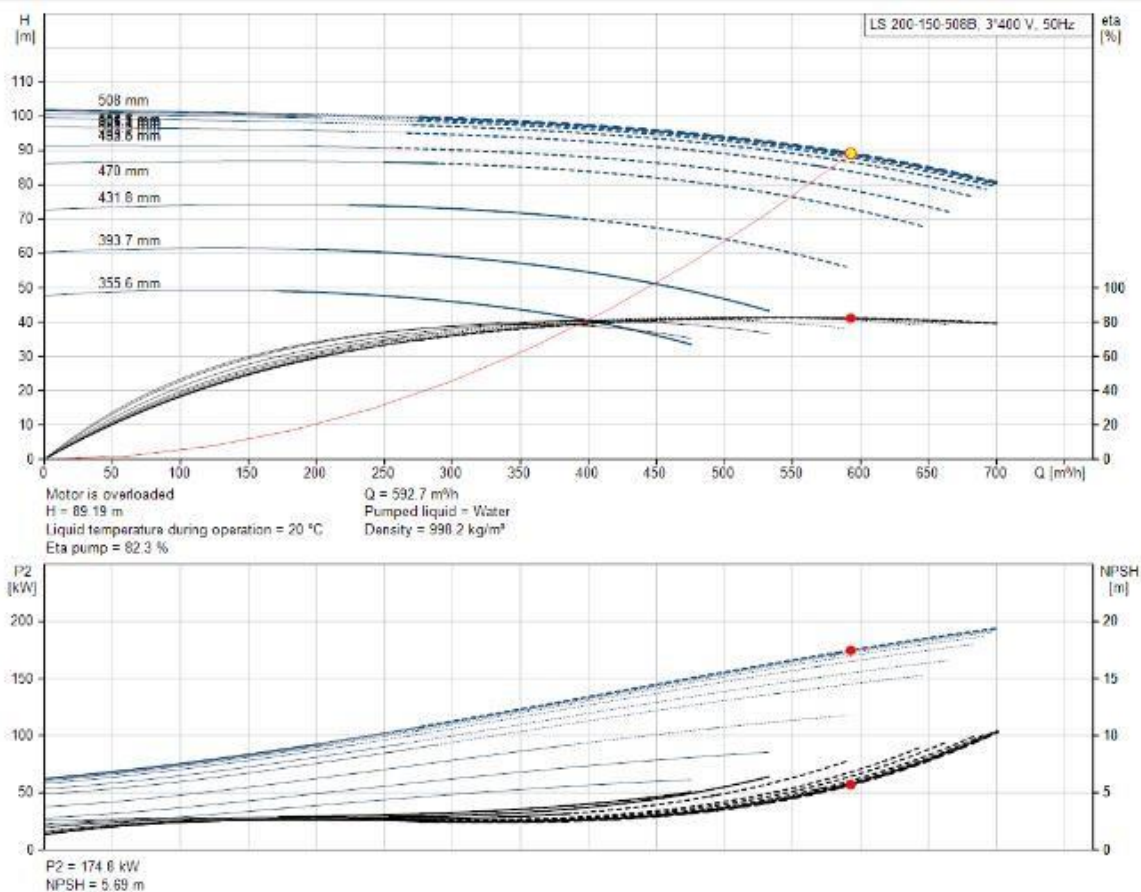


Figura 22: Curva de rendimiento bomba LS 200-150-508B Grundfos

Conducción a la planta potabilizadora

Los materiales utilizados deben cumplir con todas las disposiciones establecidas en el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, el cual establece los criterios sanitarios para la calidad del agua potable.

En particular, dicho decreto define un "producto de construcción en contacto con agua de consumo humano" como cualquier producto utilizado en la construcción, revestimiento o

ensamblaje de captaciones, conducciones, estaciones de tratamiento de agua potable (ETAPs), redes de abastecimiento y distribución, depósitos, cisternas e instalaciones interiores que se encuentren desde la captación hasta el grifo del consumidor.

El artículo 8 del decreto se refiere a las conducciones de agua y establece que antes de ponerlas en funcionamiento, deben someterse a un lavado y/o desinfección. Los materiales de construcción, revestimientos, soldaduras y accesorios utilizados no deben transmitir al agua sustancias o propiedades que contaminen o empeoren su calidad proveniente de la captación.

El material de las tuberías que conducen el agua del pozo a la planta será acero inoxidable para evitar la corrosión. Una vez se haya extraído el agua necesaria, llegará a un depósito de almacenamiento con una capacidad de 16.000 m³/día con el fin de abastecer la planta en caso de algún tipo de avería.

El dimensionamiento de las tuberías de la línea de conducción se basa en el diseño de la estación de captación de agua y en un estudio técnico-económico.

Un diámetro de tubería más pequeño puede reducir el costo de la línea de conducción, pero también aumentará la pérdida de carga y la potencia requerida por la bomba. Por otro lado, un diámetro de tubería más grande aumentará el costo de la línea de conducción, pero reducirá las pérdidas de carga y, por lo tanto, la potencia necesaria de las bombas. El diámetro del pozo será de 300 mm.

Instalación	
Presión de trabajo máxima	60 bar
Presión de salida máxima permitida	4.1 bar
Tipo de conexión	Rp
Tamaño de la conexión	6 inch
Diámetro de motor	6 inch
Minimum borehole diameter	246 mm

Figura 23: Diámetro de pozo mínimo para la bomba sumergible

Diseño de la planta

En la etapa de ósmosis inversa, se emplean tres bastidores, cada uno de los cuales produce 4.00 metros cúbicos de agua al día. Cada bastidor está compuesto por tubos de presión cuyo número se determina mediante un análisis de escenarios. En cada tubo de presión se alojan hasta siete elementos de membrana en serie para incrementar la eficiencia del sistema.

Con el objetivo de encontrar la configuración óptima desde una perspectiva económica y operativa, se realiza un análisis de escenarios que evalúa el impacto del número de tubos y la eficiencia en las variables más importantes del sistema de ósmosis inversa.

En esta sección, se examina el efecto del número de tubos por bastidor y la eficiencia del sistema en algunos parámetros fundamentales del proceso de alimentación, el consumo energético y el costo de agua.

Para el diseño del sistema se han establecido como variables limitantes la densidad de flujo de permeado y la concentración de sales del agua. En el caso del flujo de permeado, el fabricante establece cuáles son los límites de operación en su respectiva guía de membranas.

Como se trata de agua salobre se utiliza un paso con dos etapas para membranas en el tratamiento de esta agua, esto se debe a la necesidad de una mayor eficiencia en la eliminación de sales u otros contaminantes presentes en agua, en este caso de sulfatos.

Además, mejora la calidad del permeado, la primera etapa de membrana, generalmente utilizado en ósmosis inversa, se utiliza para eliminar la mayoría de las sales y contaminantes disueltos en el agua salobre. Sin embargo, incluso después de la primera etapa de membrana, puede haber trazas de sales o contaminantes que aún permanecen en el agua.

La segunda etapa de membrana se utiliza para eliminar las trazas remanentes de sales y contaminantes que no fueron eliminados completamente en la primera etapa. Esto reduce aún más la carga salina y obtiene un agua de mayor calidad.

Asimismo, utilizar dos pasos de membrana puede resultar en un mejor rendimiento energético en comparación con una sola etapa de membrana con alta presión. Al dividir el proceso en dos etapas, se puede lograr una mayor eficiencia energética al reducir la presión requerida en cada paso y, por tanto, el consumo energético total del sistema (Sánchez, 2009).

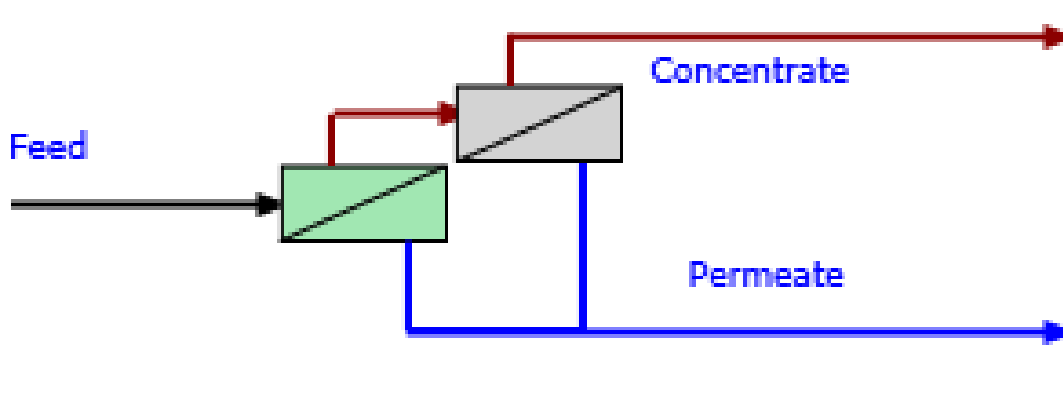


Figura 24: Diagrama sistema ósmosis inversa dos etapas y un paso

Para comenzar, analizamos los escenarios a partir del número de tubos. A continuación, se detalla el procedimiento seguido para la obtención de los siguientes resultados:

Para llevar a cabo el estudio, se ha seleccionado un valor de conversión de 70-85% para la unidad de ósmosis inversa con dos etapas, ya que este valor se utiliza comúnmente en el diseño de plantas de tratamiento mediante ósmosis inversa. Se ha realizado una variación en el número de tubos por bastidor, teniendo en cuenta el caudal de permeado del rango 27.2-34 LMH, para este escenario. Utilizando el software WAVE, se calculan las variables restantes del sistema, como la densidad de flujo de permeado, la concentración de la corriente de permeado, la presión necesaria en la corriente de alimentación y la presión obtenida en la corriente de rechazo, a partir de las variables de conversión y número de tubos.

La selección del porcentaje de conversión se ha llevado a cabo descartando aquellos que daban resultados con poca calidad de agua, o por no cumplir criterios de diseño.

Si elegimos una conversión del 85% hay incumplimiento de diseño, el caudal máximo de alimentación es mayor que el límite máximo.

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Entre el rango 70-85%, se han realizado diferentes estudios económicos de los no descartados por no cumplir criterios de diseño. Es importante tener en cuenta el rango de flujo de permeado 27.2-34 LMH.

Tabla 15: Conversiones con 12 tubos descartadas por incumplir criterios de diseño

12 tubos									
Conversiones									
70%		75%		80%		85%			
Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Alerta en el diseño	Límite máximo(m ³ /d)
38,6	29,4	38,5	29,4	38,7	29,4	39,3	32,3	Caudal de permeado (m ³ /d)	34,4
476	461,1	444,3	397,8	416,5	339,8	391,9	283,9	Caudal de alimentación (m ³ /d)	408,8
39,3	28,1	39,3	28,1	39,5	27,7	40,1	26,6	Flujo LMH	(27,2>x<34)
Descartado		Descartado		Descartado		Descartado			

Tabla 16: Conversiones con 14 tubos descartadas por incumplir criterios de diseño

14 tubos									
Conversiones									
70%		75%		80%		85%			
Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Alerta en el diseño	Límite máximo(m ³ /d)
33,6	32,2	33,6	24,9	33,9	24,9	34,6	24,9	Caudal de permeado (m ³ /d)	34,4
408,1	392,2	380,9	337,3	357	286,4	336	237	Caudal de alimentación (m ³ /d)	408,8
34	23,6	34	23,5	34,3	23	34,9	21,8	Flujo LMH	(27,2>x<34)
No Descartado		No Descartado		No Descartado		No Descartado			

Tabla 17: Conversiones con 16 tubos descartadas por incumplir criterios de diseño

16 tubos									
Conversiones									
70%		75%		80%		85%			
Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Alerta en el diseño	Límite máximo(m ³ /d)
29,8	21,6	29,9	21,6	30,2	21,5	31	21,4	Caudal de permeado (m ³ /d)	34,4
357,1	340,6	333,2	291,8	312,3	246,5	294,1	201,9	Caudal de alimentación (m ³ /d)	408,8
29,9	20,2	30	20,1	30,3	19,5	30,9	18,2	Flujo LMH	(27,2>x<34)
No Descartado		No Descartado		No Descartado		Descartado			

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m^3/d .

Tal y como se observa en las tablas, se descartan las opciones que incumplen con uno o más criterios de diseño, dichos criterios son, el límite máximo de caudal de permeado establecido en 34,4 m^3/d , el límite máximo de caudal de alimentación establecido en 408,8 m^3/d , y el rango de flujo que se fija entre 27,2 y 34 LMH.

Es por ello por lo que se descartan las combinaciones con 12 tubos ya que hay incumplimiento de diseño ya sea por caudal de permeado o de alimentación.

Y 16 tubos ya que, aun que no tengan ningún incumplimiento de diseño, los valores del flujo medio de permeado se alejan del óptimo recomendado.

Quedando como las opciones viables: número de tubos 14 con conversiones del 70%, 75% y 80%.

Tabla 18: Gasto energético para opciones que cumplen con criterios de diseño

Conversión				
Nº tubos	70%	75%	80%	Energía específica
14	0,54	0,5	0,47	kWh/m^3

Tabla 19: Coste de agua potabilizada en cada caso

Coste de agua potabilizada				
Conversión				
Nº tubos	70%	75%	80%	Unidades
14	0,489	0,452	0,425	€

Como se observa en las tablas, la opción más económica de las que cumplen con los criterios de diseño es la conversión al 80% y 14 número de tubos.

Para escoger el tipo de membrana se elige en función de la salinidad del agua de aporte:

Tabla 20: Selección tipo de membrana

Salinidad fuente de agua de aporte	Tipo de membrana
Agua salobre (≤ 5.000 mg/l)	BWRO (Brackish Water Reverse Osmosis)
Agua de mar (> 5.000 mg/l)	SWRO (Sea Water Reverse Osmosis)

La primera parte del nombre indica la membrana y su uso típico para esta casa comercial, FilmTec™:

- TW (Tap Water), agua corriente.
- BW (Brakish Water), agua salobre.
- SW (SeaWater), agua de mar.

Con el propósito de elegir la membrana más adecuada para satisfacer las necesidades de la planta potabilizadora, se lleva a cabo un análisis de los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones realizadas utilizando las diferentes membranas seleccionadas a través del software WAVE. A continuación, se presentan los criterios utilizados, en orden de aplicación, para seleccionar la membrana óptima destinada al tratamiento del agua considerado para esta casa comercial.

- ❖ Se evaluará si cada membrana de ósmosis inversa cumple con los límites de diseño recomendados para su respectivo módulo. Si las condiciones de funcionamiento de alguna membrana exceden los límites recomendados, se descartará dicha membrana.
- ❖ Se verificará si cada membrana cumple con los valores límite establecidos en el RD 140/2003, que establece los criterios sanitarios para la calidad del agua potable. Dado que el objetivo es potabilizar el agua para consumo humano, cualquier membrana cuyo permeado no cumpla con los requisitos de este Real Decreto será descartada.

- ❖ Se considerará el coste específico de producción de agua potable (€/m³), teniendo en cuenta tanto los costes de inversión como los costes de operación y mantenimiento de la planta potabilizadora.

La membrana seleccionada es la FilmTec™ BW30XFRLE-400/34 Element, la cual consta de 8 pulgadas de diámetro y 40 pulgadas de longitud, un área activa de 400 pies al cuadrado y un flux límite de 11.5 GPD. Además, consta de un porcentaje de rechazo de sales del 99.3%. Cada bastidor contará con un total de 210 membranas, y entre los 3 bastidores hay 630 membranas en total.

A partir de la presión de alimentación y la caída de presión en el tubo proporcionadas por WAVE, se ha calculado el consumo específico de energía de instalación, teniendo en cuenta el efecto del recuperador de energía. De esta manera, se consideran todos los aspectos relevantes para evaluar la eficiencia energética del sistema y obtener resultados precisos en el estudio.

Se calcula el consumo específico de energía teniendo en cuenta el recuperador de energía. El procedimiento de cálculo ha sido el siguiente:

En primer lugar, se calcula la potencia de la bomba de alta presión y la bomba *booster*.

$$\mathbf{Pot_{B_{AP}}} = \frac{0.002778 \cdot P_{AP} \cdot Q_{AP}}{\varepsilon_B \cdot \eta_M \cdot \varepsilon_{VF}} = \frac{0.002778 \cdot 10,9 \cdot 208}{0.65 \cdot 0.75 \cdot 0.961} = \mathbf{13,46 \text{ kW}} \quad (5)$$

Donde 0,00277 es un factor de conversión de unidades para agua como fluido, P_{AP} es la presión que tiene que aportar la bomba de alta presión, Q_{AP} el caudal de alimentación a la bomba de alta presión, ε_B la eficiencia de la bomba de alta presión, η_M el rendimiento del motor y ε_{VF} la eficiencia del variador de frecuencia.

$$\mathbf{Pot_{B_B}} = \frac{0.002778 \cdot (\Delta P_{tubo} + \Delta P_{IP}) \cdot Q_{BB}}{\varepsilon_B \cdot \eta_M \cdot \varepsilon_{VF}} = \frac{0.002778 \cdot (0.31 + 0) \cdot 41.24}{0.65 \cdot 0.75 \cdot 0.961} = \mathbf{0.075 \text{ kW}} \quad (6)$$

Donde ΔP_{tubo} es la caída de presión en el tubo y ΔP_{IP} la caída de presión en el intercambiador de presión, por tanto, la bomba *booster* debe suministrar este incremento de presión, Q_{BB} el caudal de alimentación a la bomba *booster*, ε_B la eficiencia de la bomba, η_M el rendimiento del motor y ε_{VF} la eficiencia del variador de frecuencia.

Asimismo, el caudal de la bomba *booster* se calcula con la fórmula siguiente:

$$Q_{BB} = Q_R \cdot (1 - 1\%) = 989.8 \frac{m^3}{dia} = 41.24 m^3/h \quad (7)$$

Siendo Q_R el caudal de rechazo.

La suma de las potencias de las bombas constituye la potencia total del bastidor de ósmosis inversa. Si se divide la potencia total entre el caudal por bastidor, se tiene el consumo específico de energía de la unidad de ósmosis inversa. Por último, sabiendo que el consumo específico de energía de la unidad de ósmosis inversa en una instalación de desalación supone el 70% del consumo de energía total de la instalación, se tiene el consumo específico de energía de la instalación.

A partir de este cálculo, se ha obtenido el consumo específico de energía en función del número de tubos.

Software empleado

En este apartado se abordará el funcionamiento general del software. Se proporcionará una visión panorámica de las características y capacidades generales que ofrece. Esto puede incluir una descripción de la interfaz de usuario, las principales funcionalidades y los componentes clave del software.

Los pasos a seguir serán:

1. Definir agua de alimentación
2. Elección de la tecnología
3. Configuración de la tecnología seleccionada
4. Informe de los resultados obtenidos

1. Definir agua de alimentación

Introducimos el tipo de agua que se va a tratar especificando tipo y sub-tipo de agua. Después definimos la temperatura mínima, de diseño y máxima. Y por último las concentraciones de cationes, aniones y neutrones además del pH.

Seguidamente, el programa calcula automáticamente la conductividad del agua, los sólidos disueltos totales y el balance de cargas se ajustará con la sección "Ajustar solutos".

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

File Configuración Ajustes de usuario Agua de alimentación Informe Ayuda Centro de respuestas Ayuda

Guardar en librería Abrir librería de agua Librería de agua

Añadir solutos: Añadir Sodio, Añadir Cloruro, Añadir Calcio, Añadir sulfato, Añadir amoníaco

Ajustar solutos: Ajustar cationes, Ajustar aniones, Ajustar todos los Iones, Ajustar CO₂/HCO₃/CO₃ total, Ajuste del balance de cargas

mg/L NaCl: 0 mg/L MgSO₄: 0

Entrada rápida

Inicio Agua de alimentación Osmosis Inversa Informe resumido

Definición de corriente: Stream 1 100,00 %

Aqua de alimentación - Stream 1

Parámetros de alimentación

Tipo de agua: Agua de pozo

Sub-tipo de agua: SDI < 3

Contenido de sólidos

Turbidez: 0,00 NTU

Sólidos suspendidos totales (SST): 0,00 mg/L

SDI₁₅: 0,00

Contenido orgánico

Organics (TOC): 0,00 mg/L

Temperatura: 18,0 °C (Mínimo), 21,0 °C (Diseño), 25,0 °C (Máximo)

pH @21,0°C: 7,60 pH @25,0°C: 7,57

Información adicional sobre el agua de alimentación

Casos

Símbolo	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L
NH ₄	0,145	0,403	0,008
K	11,429	14,629	0,292
Na	129,823	282,596	5,647
Mg	125,723	517,722	10,345
Ca	241,476	603,040	12,050
Sr	4,156	4,747	0,095
Ba	0,010	0,007	0,000
Total cationes:	512,763		28,438

Símbolo	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L
CO ₂	1,120	1,868	0,037
HCO ₂	210,003	172,236	3,442
NO ₂	172,211	138,990	2,777
Cl	341,937	482,664	9,645
F	0,021	0,055	0,001
SO ₄	600,000	625,131	12,492
PO ₄	1,350	2,134	0,043
Br	0,200	0,125	0,003
Total aniones:	1.326,842		28,439

Símbolo	mg/L
SiO ₂	12,015
B	4,606
CO ₂	5,908
Total neutros:	22,529

Sólidos Disueltos Totales (TDS): 1.856,300 mg/L

Balance de carga: 0,000002 meq/L

Conductividad estimada: 2.985,73 µS/cm

Figura 25: Captura de pantalla programa WAVE paso 1

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

2. Elección de tecnología

En esta sección se introduce el caudal de producción de nuestra planta que, al dividir entre tres bastidores queda en 5333,3 m³/h y el tipo de agua que se va a tratar, agua de pozo. Y a continuación, seleccionamos la tecnología con la que vamos a purificar el agua. Tal y como se muestra en la *Figura 26* hay gran variedad de opciones.

The screenshot shows the WAVE software interface for configuring a water treatment system. The top navigation bar includes 'Inicio', 'Agua de alimentación', 'Osmosis Inversa', and 'Informe resumido'. The main configuration area is titled 'Wave--7/5/2023 1_definitivo 21/07 - Case 1' and provides instructions for starting a new project. The flow diagram shows an input flow of 5333,33 m³/d entering a process labeled 'RO', resulting in a product flow of 4000 m³/d. The 'Tipo de agua' dropdown is set to 'Agua de pozo'. The 'Tecnologías' panel on the right lists various treatment technologies under categories like 'Pretratamiento', 'Desmineralización', 'Pulido', and 'Factores de ajuste'. The footer contains the DuPont logo, copyright information, and the 'Water Application Value Engine Water Solutions' logo.

Figura 26: Captura de pantalla programa WAVE paso 2

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

3. Configuración de la tecnología seleccionada

En la siguiente fase, se procede a configurar el sistema según los requisitos deseados, asegurándose de especificar todos los parámetros necesarios.

1. Pasos y etapas: se escoge el número de pasos y el número de etapas de la planta.
2. Conversión: se escoge el porcentaje de conversión al que queremos que trabaje nuestra planta de ósmosis inversa. Variando de 75-85%.
3. Membranas: se selecciona el número de tubos que hay por etapa en una relación dos a uno y el número de elementos que hay por tubo, en otras palabras, el número de membranas que hay en cada uno, además del tipo de membrana comercial que se va a utilizar, teniendo en cuenta sus especificaciones.

Configuración del paso de osmosis inversa

Configuration for Pass 1

Número de etapas: 1 2 3 4 5

Factor permeabilidad:

Temperatura: Diseño °C

Contrapresión de paso: bar

Caudales

Caudal alimentación: m³/d

Conversión: %

Caudal permeado: m³/d

Flujo: LMH

Caudal recirculación: m³/d

Bypass: m³/d

Etapas		Etapa 1	Etapa 2
Nº. Tubos/Etapa		14	7
Nº. Elementos/Tubo		7	7
Tipo de elemento		BW30XFRLE-400/34	BW30XFRLE-400/34
Especificaciones			
Nº. Elementos/Etapa		98	49
Pre-stage ΔP (bar)		0,31	0,31
Stage Back Press (bar)		0,00	0,00
Boost Press (bar)		N/A	0
Feed Press (bar)		0	N/A
% de conc. a alim.		0,00	0,00
Factor permeabilidad		0,85	0,85

Configuración del sistema

Diagram showing Feed, NasPsO1s (Antiscalant), Concentrate, and Permeate streams.

Figura 27: Captura de pantalla programa WAVE paso 3

4. Informe de los resultados obtenidos

Los resultados que se obtienen proporcionan una calidad de agua demasiado pura, ante esto, lo que se hace es desviar un 20% del agua que sería un caudal de $3200 \text{ m}^3/\text{día}$ añadiéndola al permeado, sin pasar por el tratamiento y pasar por el proceso de ósmosis inversa un 80%. Así, los resultados cumplen con los límites establecidos por la legislación, y, además, se ahorran costes.

Para calcular las concentraciones finales después de un proceso de ósmosis inversa con una división de flujo del 80% y 20%, primero debemos entender cómo se comportan los solutos y solventes en el proceso.

En una ósmosis inversa, el agua es separada de los solutos disueltos mediante una membrana semipermeable. El permeado es el agua purificada que atraviesa la membrana, mientras que el rechazo es el flujo de agua que no pasa por la membrana y contiene los solutos concentrados.

Si el 80% del agua pasa por el proceso de ósmosis inversa y el 20% se une directamente al permeado, podemos decir que:

- El 80% del agua se convierte en permeado.
- El 20% restante se mezcla con el permeado y forma el agua final.

Para calcular las concentraciones finales de los solutos en el agua final, necesitamos saber las concentraciones iniciales de los solutos tanto en el agua que ingresa al proceso de ósmosis inversa como en el agua directamente unida al permeado. Luego, aplicamos el principio de conservación de masa para calcular las concentraciones finales.

Suponiendo un soluto "X" con una concentración inicial de "C" en el agua que ingresa al proceso de ósmosis inversa, y una concentración de "C_p" en el agua directamente unida al permeado.

El flujo de masa total de soluto "X" en el agua final es igual al flujo de masa de soluto "X" en el permeado más el flujo de masa de soluto "X" en el agua que no pasa por la membrana:

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Flujo de masa total de X en agua final = Flujo de masa de X en permeado + Flujo de masa de X en el agua no tratada.

La concentración final de soluto "X" en el agua final (C_final) se puede calcular usando la siguiente ecuación:

$$C_{FINAL} = \frac{(C_p \cdot V_p + C \cdot V_{80})}{V_p + V_{80}} \quad (8)$$

Donde:

C_p es la concentración de soluto "X" en el agua directamente unida al permeado.

V_p es el volumen de agua unido directamente al permeado.

C es la concentración de soluto "X" en el agua que ingresa al proceso de ósmosis inversa.

V₈₀ es el volumen de agua que pasa por el proceso de ósmosis inversa.

Tabla 21: Resultados obtenidos concentraciones tras desviar un 20% de agua

<i>Ion/compuesto</i>	<i>Valores</i>
<i>Conductividad (μS/cm)</i>	626,0
<i>Ca⁺² (mg/l)</i>	48,6
<i>Na⁺ (mg/l)</i>	30,6
<i>CO₃⁻² (mg/l)</i>	0,2
<i>SO₄⁻² (mg/l)</i>	120,7
<i>Cl⁻ (mg/l)</i>	71,0
<i>NO₃⁻ (mg/l)</i>	39,7
<i>HCO₃⁻ (mg/l)</i>	46,4
<i>TDS^a (mg/l)</i>	392,5
<i>pH (mg/l)</i>	6,5

Tabla 22: Resultados obtenidos productos químicos tras desviar un 20% de agua

<i>Producto químico</i>	<i>Valores</i>
<i>CaSO₄ (% saturación)</i>	145,3
<i>BaSO₄ (% saturación)</i>	466,2
<i>SrSO₄ (% saturación)</i>	93,6

7. Pretratamientos físicos

El uso de pretratamiento físico en agua salobre es una práctica común y necesaria para preparar el agua antes de someterla al proceso de ósmosis inversa u otros métodos de desalinización. Esta etapa inicial de pretratamiento físico busca mejorar la eficiencia y prolongar la vida útil de los equipos y membranas utilizados en la desalinización. A continuación, se justifican algunas razones importantes para usar pretratamiento físico en agua salobre:

- Eliminación de partículas suspendidas: El agua salobre puede contener partículas suspendidas, como arena, arcilla, sedimentos y materia orgánica, que pueden obstruir y dañar las membranas de ósmosis inversa. El pretratamiento físico, como la filtración, permite remover estas partículas y proteger las membranas de posibles obstrucciones.
- Reducción de turbidez: La presencia de turbidez en el agua salobre puede afectar la eficiencia del proceso de desalinización y disminuir la calidad del agua producida. Mediante el pretratamiento físico, se reduce la turbidez, mejorando la eficiencia de la ósmosis inversa y garantizando un agua desalinizada más limpia.
- Control de la fouling: La fouling o ensuciamiento de las membranas es uno de los principales problemas que afectan el rendimiento de la ósmosis inversa. El pretratamiento físico puede ayudar a minimizar la formación de depósitos y biofouling en las membranas, lo que extiende su vida útil y reduce la necesidad de limpiezas frecuentes.
- Protección contra la corrosión e incrustaciones: El agua salobre puede ser corrosiva y contener compuestos que propicien la formación de incrustaciones en los equipos. El pretratamiento físico puede ayudar a evitar la corrosión y prevenir la formación de incrustaciones, protegiendo así tanto las membranas como otros componentes del sistema de desalinización.
- Mejora de la eficiencia energética: Al eliminar partículas y sustancias que pueden afectar la eficiencia del proceso, el pretratamiento físico reduce el consumo de energía requerido para la desalinización, lo que contribuye a un funcionamiento más sostenible y económico del sistema.

En conclusión, el pretratamiento físico en agua salobre es esencial para preparar el agua antes de someterla a la ósmosis inversa, evitando obstrucciones en las membranas, controlando la fouling, mejorando la calidad del agua desalinizada y protegiendo los equipos utilizados. Al implementar un pretratamiento adecuado, se asegura una operación más eficiente y prolonga la vida útil del sistema de desalinización (Sánchez, 2009).

7.2 Filtro sílex (filtros de arena a presión)

El material de construcción empleado para estos filtros es chapa galvánica. Debido a la corrosividad o capacidad oxidante del agua que se va a tratar, así como los efectos perjudiciales que el hierro puede tener en las membranas y otros componentes de la instalación, es necesario aplicar un revestimiento interior que asegure un aislamiento total entre el hierro y el agua. Los materiales más comúnmente utilizados para estos revestimientos son la goma, la ebonita o varias capas de pinturas epoxi. Estos recubrimientos garantizan una protección adecuada y evitan cualquier interacción entre el hierro y el agua.

El flujo del agua en estos filtros siempre es vertical, ingresando desde la parte superior del filtro y descendiendo a través de las capas de filtración que retienen los materiales sólidos que transporta. En el interior de los filtros, se encuentra un colector o plataforma de boquillas de agua filtrada.

Es fundamental contar con un mecanismo de distribución en la parte superior del filtro para lograr una distribución uniforme y evitar impactos en la superficie de filtración. Estos impactos podrían generar canales de flujo preferencial y afectar la calidad del filtrado.

La limpieza de estos filtros se lleva a cabo mediante el uso de agua y aire. Por lo tanto, se requiere un equipo especial compuesto por bombas y compresores de aire con una capacidad adecuada al tamaño del filtro.

Tanto el aire como el agua de lavado que se introducen desde la parte inferior del filtro, por debajo del material filtrante. De esta manera, el agua, al atravesar el filtro, arrastra los materiales que obstruyen su funcionamiento, y luego se elimina por la parte superior.

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

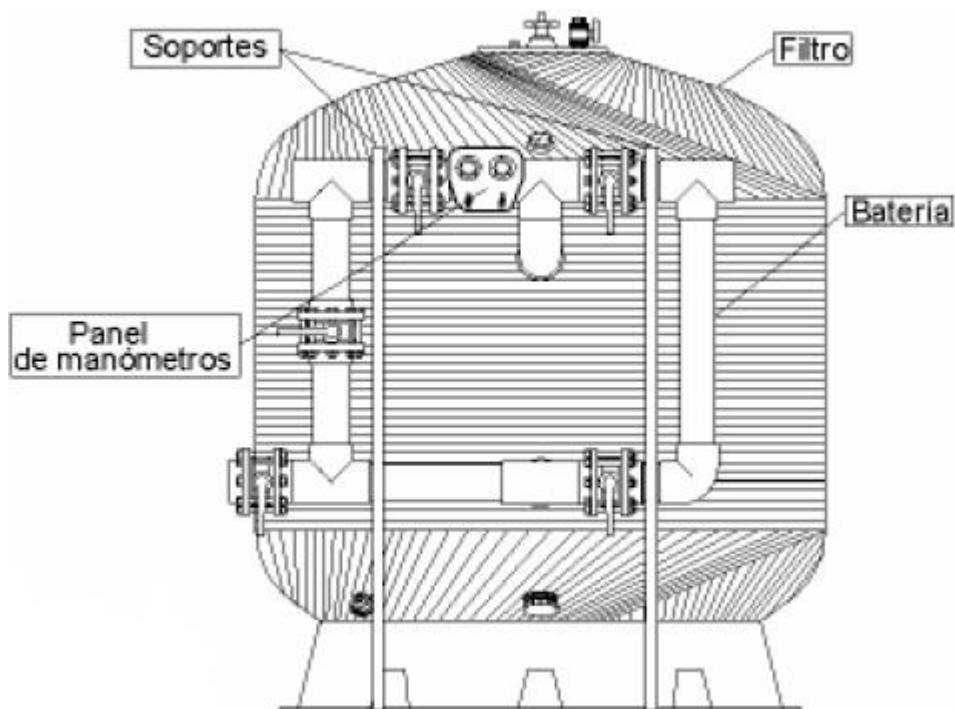


Figura 28: Esquema filtro sílex

Es esencial que estos filtros estén equipados con válvulas de seguridad para prevenir sobrepresiones y golpes de ariete en su interior. Además, deben contar con dos aberturas de acceso: una en la parte superior para colocar el material filtrante y otra en la parte inferior para acceder a la cámara de agua filtrada.

Asimismo, es necesario que cuenten con elementos de desviación (bypass) que permitan prescindir del filtro y hacer frente a posibles averías en el mismo.

Se instalarán dos filtros sílex, y dos adicionales para que, en caso de que se estén lavando o se averíen, el funcionamiento de la planta no se vea afectado, siendo 4 el número total de filtros de este tipo.

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

CÓDIGO	MODELO	CONEX.	CARGA (Kg)		CAUDAL (m ³ /h)			CONTRA-LAVADO (m ³ /h)	FAM.
			SILEX	ANTRACITA	10	15	20		
CLACK con programador cronométrico electrónico									
FI-1032-03	CLACK-10	1"	20	10	0,5	0,7	1	1,8	B
FI-1032-05	CLACK-13	1"	60	20	0,8	1,3	1,7	3	B
FI-1032-06	CLACK-14	1"	90	30	1	1,5	2	3,5	B
FI-1032-07	CLACK-16	1"	90	40	1,3	1,9	2,6	4,6	B
FI-1033-10	CLACK-18	1 1/4"	120	60	1,8	2,6	3,6	6,4	B
FI-1034-12	CLACK-21	1 1/2"	180	70	2,4	3,5	4,7	8,3	B
FI-1034-14	CLACK-24	1 1/2"	240	100	3	4,4	6	10,6	B
FI-1036-16	CLACK-30	2"	390	140	4,6	6,9	9,3	16,3	B
FI-1036-18	CLACK-36	2"	540	200	6,7	10,1	13,5	23,7	B
FI-1036-20	CLACK2H-42	2"	725	250	9,1	13,7	18,3	32	B
FI-1036-25	CLACK3H-48	3"	1025	350	11,7	17,6	23,5	41,1	B

Figura 29: Características y especificaciones filtro sílex-antracita



Figura 30: Filtro de arena sílex-antracita Hidro water

El modelo que se seleccione será aquel que cumpla con dos condiciones:

- Ante la incertidumbre sobre la intensidad requerida para el pretratamiento del agua de alimentación, se ha decidido tomar una opción conservadora. En este enfoque, la tasa de carga del filtro se situará en un rango entre 20 y $21 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ h}$, que representa valores intermedios dentro del rango recomendado de 16 a $25 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ h}$.
- Se seleccionará el modelo que permita filtrar el caudal de alimentación utilizando la menor cantidad de filtros posible, con el objetivo de simplificar la instalación y maximizar la eficiencia en términos de costos.

7.3 Filtros de seguridad (cartuchos)

Se utilizan depósitos metálicos recubiertos internamente en las instalaciones para garantizar un nivel mínimo de filtrado de 5 micras, que es necesario para el funcionamiento de la ósmosis inversa. Estos depósitos tienen una disposición vertical y son similares a los filtros de arena de presión. Utilizan cartuchos como medio filtrante, que consisten en un eje hueco con orificios, sobre el cual se enrolla un hilo de polipropileno u otro material plástico con una tensión determinada para asegurar la separación de sólidos de hasta este tamaño.

El agua fluye a través de los cartuchos desde el exterior hacia el eje, donde se recoge el agua filtrada. Para ello, los filtros están conectados a una placa de anclaje en la parte superior, lo que crea dos cámaras: una en la parte inferior donde entra el agua sin filtrar y otra en la parte superior donde se recoge el agua filtrada.

Es importante destacar que los filtros de cartucho deben contar con colectores y conexiones adecuadas para realizar un lavado a contracorriente, es decir, revertir el flujo desde el interior del cartucho hacia el exterior. Aunque el lavado no es perfecto debido al tamaño de las partículas atrapadas en los cartuchos, que son más pequeñas en comparación con los filtros de sílex, a largo plazo se acumularán partículas en los cartuchos y será necesario reemplazarlos.

Se ha escogido los filtros multicartuchos de la empresa Hidro Water.

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS



Figura 31: Filtros de cartuchos Hidro Water

CÓDIGO	FI-0215-01	FI-0215-02	FI-0215-03	FI-0215-04	FI-0216-06
MODELO	3X20	3X40	7X20	7X40	15X40
CONEXIÓN	2" BSPT	2" BSPT	2 1/2" BSPT	2 1/2" BSPT	DN100 PN10
CAUDAL MÁX (m3/h)	7,5	15	17	35	65
Nº CARTUCHOS	3	3	7	7	15
LARGO CARTUCHOS	20"	40"	20"	40"	40"
PESO (KGS)	20	22	27		80
ALTURA H (mm.)	1200	1600	1190	1610	1440
DIAMETRO (mm.)	168	168	220	220	324
A (mm.)	715	715	715	715	-
B (mm.)	250	250	245	245	300
C (mm.)	410	410	410	410	550
D (mm.)	320	320	355	355	385
E (mm.)	150	150	190	190	277

Figura 32: Características filtros de cartucho

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Para este tipo de filtro se ha seleccionado el modelo 15X40, con un caudal máximo de 65 m³/h, a continuación, se determina el número de filtros de cartucho necesario.

$$N_{\text{filtros}} = \frac{Q_a}{Q_{\text{filtro}}} = \frac{666,6}{65} = 10,25 \quad (9)$$

Se necesitan 11+1 filtros de cartucho de reserva.

8. Pretratamientos químicos

Por lo general, el agua que se someterá a un tratamiento de ósmosis inversa debe cumplir con ciertas condiciones o estándares debido a varios factores, como las especificaciones de las membranas o el uso previsto del agua, ya sea para consumo humano o desinfección de equipos. Estas condiciones necesarias se logran mediante la adición de diversos compuestos químicos a lo largo del proceso, los cuales confieren al agua las características requeridas. La forma de aplicar y el momento de agregar estos compuestos químicos son aspectos cruciales para el correcto funcionamiento del sistema y para dotar al agua de las propiedades óptimas para su uso.

8.1 Desinfección

Para la desinfección en esta instalación se utilizará hipoclorito sódico, que es el desinfectante más comúnmente empleado. Este producto es líquido, por lo tanto, el equipo necesario para su aplicación constará al menos de un depósito para almacenar el producto y las correspondientes bombas dosificadoras. Por lo general, se instalan dos bombas dosificadoras para hacer frente a posibles averías o ciclos de limpieza, asegurando así un funcionamiento continuo de la planta. La necesidad de una bomba dosificadora adicional dependerá de los requisitos de dosificación, la capacidad de las bombas existentes, la disponibilidad de los equipos y el costo total del sistema de dosificación.

Todas las bombas deben estar equipadas con un filtro en la entrada y válvulas de seguridad en la salida, que permitan el retorno del líquido al depósito en caso de fallos en el funcionamiento. Además, la instalación debe contar con medidores de nivel y tener capacidad de abastecimiento para al menos 15 días, antes de que se detecte escasez de producto.

La dosificación del hipoclorito sódico se puede realizar de forma continua o en el punto de entrada del agua, dependiendo de la capacidad de la planta. En el caso que se está estudiando, la dosificación se realiza de forma continua en el colector que conduce el agua a los filtros de sílex, lo cual también contribuye como coagulante.

8.2 Equipo de corrección de pH

El uso de ácido sulfúrico para ajustar el pH requiere de instalaciones específicas debido a su alta concentración, que oscila entre el 96% y el 98%. Para garantizar la seguridad durante su manipulación, se empleará en la instalación clorhídrico en una concentración elevada, con el propósito de controlar el pH del suministro y añadir agentes antifouling.

La adición del regulador de pH se llevará a cabo en la salida del tanque de agua tratada, utilizando juntas de mezcla construidas en teflón. Esto se realiza para evitar posibles aumentos de temperatura causados por la mezcla del ácido con el agua osmotizada.

8.3 Dosificador de reductor

Se utiliza el bisulfito o metabisulfito sódico como producto sólido, el cual debe ser diluido previamente en agua. Su propósito es eliminar el cloro libre antes de que entre en contacto con las membranas.

Se instalan dos depósitos en paralelo, equipados con agitadores correspondientes, que permiten preparar el producto en uno de ellos cuando se agota en el otro. Las condiciones para la aplicación del producto deben permitir su inyección tanto entre los filtros de arena y cartucho, como en la salida de estos últimos.

En la planta se ha observado una acumulación excesiva de suciedad en los cartuchos debido a la eliminación del cloro antes de que ingrese a ellos, lo que genera material biológico. Por lo tanto, se propone eliminar el cloro después de los filtros de cartucho mediante la dosificación del bisulfito en la entrada de una lira, para permitir que reaccione antes de entrar en contacto con las membranas.

8.4 Aplicación de estabilizantes

Es indispensable incluir la aplicación de inhibidores o antiincrustantes en plantas de agua salobre, como se describe en el documento. Esto se debe al bajo costo de instalación en relación con el costo total de inversión de la planta, lo cual justifica tenerlo como un elemento de reserva. Las dosis utilizadas son pequeñas y los equipos tienen dimensiones reducidas.

Se instalarán dos depósitos con una capacidad adecuada, ya que la efectividad del producto suele ser limitada en el tiempo, generalmente entre tres días y una semana. De esta manera, se dosificará siempre un producto recién preparado desde un depósito, mientras que en el otro se estará preparando el siguiente lote que estará listo cuando se agote el producto del depósito anterior.

Cada uno de los depósitos estará equipado con agitadores para facilitar la disolución de los componentes.

La dosificación se realizará después de los filtros de sílex y antes de los filtros de cartucho. Esto permitirá que los primeros retengan parte del producto, mientras que los segundos evitarán que, en caso de que una parte del producto no se haya disuelto completamente, pueda pasar a las membranas.

Según la recomendación del comerciante se debe añadir entre 1-5 mg/l de $Na_6P_6O_{19}$.

Para calcular cómo quedarían las concentraciones de $CaSO_4$, $BaSO_4$ y $SrSO_4$ después de añadir 3 mg/l de antiincrustante $Na_6P_6O_{19}$, podemos utilizar una aproximación considerando que el antiincrustante reduce la saturación de los compuestos precipitantes. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la reducción exacta de la saturación dependerá de las condiciones específicas del agua y la interacción del antiincrustante con los compuestos.

Dado que no tenemos información específica sobre las solubilidades de $CaSO_4$, $BaSO_4$ y $SrSO_4$ en el agua tratada con el antiincrustante, asumiremos una reducción aproximada del 12% en la saturación de cada compuesto después de agregar el antiincrustante.

- Para $CaSO_4$ (%Saturación = 145,3%):
Asumiendo una reducción del 20% en la saturación: $145,3\% - (12\% \text{ de } 145,3\%) = 127,86\%$ (aproximadamente)
- Para $BaSO_4$ (%Saturación = 466,2%):
Asumiendo una reducción del 20% en la saturación: $466,2\% - (12\% \text{ de } 466,2\%) = 410,25\%$ (aproximadamente)
- Para $SrSO_4$ (%Saturación = 93,6%):
Asumiendo una reducción del 20% en la saturación: $93,6\% - (12\% \text{ de } 93,6\%) = 82,368\%$ (aproximadamente)

9. Mantenimiento de membranas

En esta sección, se abordará la conservación de las membranas y los diferentes métodos de lavado utilizados para ello.

9.1 Recuperación de membranas

Con el paso del tiempo, las membranas de ósmosis inversa pueden perder sus características fundamentales de funcionamiento, como su capacidad de rechazo o su caudal. Esta pérdida puede deberse a una operación deficiente o a causas naturales, y si se opera durante mucho tiempo en estas condiciones, puede ocasionar un deterioro irreversible en las membranas.

El mantenimiento adecuado de las membranas puede prolongar su vida útil sin necesidad de reemplazarlas por unas nuevas, lo cual implicaría un costo económico adicional. Las siguientes son algunas de las causas que pueden provocar un deterioro irreversible en las membranas:

- Compactación: la compresión excesiva de las membranas debido a la presión o al flujo de agua puede reducir su eficiencia.
- Ensuciamiento excesivo: la acumulación de depósitos o materiales en la superficie de las membranas puede obstruir los poros y disminuir su fouling.
- Desplazamiento interno de las distintas láminas de componentes (telescoping): el desplazamiento de las capas internas de la membrana puede comprometer su integridad y eficacia.
- Rotura de la cubierta externa protectora: cualquier daño en la cubierta externa de la membrana puede permitir la entrada de contaminantes no deseados.
- Rotura de algún componente de la membrana: la fractura de uno o más componentes de la membrana puede afectar su rendimiento.
- Pretratamientos químicos inadecuados: el uso inapropiado de productos químicos en los pretratamientos puede dañar las membranas y reducir su vida útil.
- Rotura de algún elemento de filtración.

Mediante un mantenimiento adecuado y la prevención de estas causas de deterioro, se puede maximizar la vida útil de las membranas de ósmosis inversa.

La compactación es un fenómeno que ocurre al comenzar a operar una instalación de ósmosis inversa. Se debe a la presión ejercida sobre la membrana, que compacta el elemento de soporte y sella los poros, lo que resulta en una disminución del caudal. A medida que la presión aumenta debido a la reducción del caudal, este fenómeno se intensifica.

Aunque se realizan pretratamientos químicos y físicos en el agua antes de que entre en contacto con las membranas para evitar este fenómeno, no se puede eliminar por completo. Además, el aumento en el costo de operación debido a estos pretratamientos justifica considerar un enfoque más conservador al momento de reemplazar las membranas. Todo esto está relacionado con la calidad y el costo del agua, así como el costo de la energía que se utilizará.

9.2 Lavado de membranas

Como se mencionó previamente, cuando se experimenta una disminución del caudal del 10%, un aumento en la salinidad o una pérdida significativa de carga en el tubo de presión, se requiere realizar una limpieza de las membranas.

La compactación y el ensuciamiento pueden ser recuperados mediante un lavado parcial o completo de las membranas, mientras que las pérdidas de carga son irreversibles.

La frecuencia de limpieza de ósmosis inversa aceptable es una vez cada 3 o 12 meses.

Dependiendo del tipo de problema o ensuciamiento presente en las membranas, se empleará un método de lavado específico:

- Lavado ácido: se utiliza para eliminar precipitados inorgánicos.
- Lavado alcalino: se aplica para tratar el ensuciamiento causado por materia orgánica.
- Lavados especiales: se utilizan en caso de ensuciamiento biológico.

Estos distintos tipos de lavado se seleccionan de acuerdo con la naturaleza del ensuciamiento con el objetivo de restaurar el rendimiento de las membranas y prolongar su vida útil.

La dosificación de productos químicos en el lavado de membranas puede variar según varios factores, como el tipo de membrana, el nivel de ensuciamiento o fouling, la calidad del agua de alimentación y las recomendaciones del fabricante del sistema. Aquí hay algunos productos químicos comunes utilizados en el lavado de membranas y sus cantidades aproximadas a dosificar:

- **Ácido cítrico:** El ácido cítrico se usa para eliminar incrustaciones de carbonato de calcio y otros depósitos minerales en las membranas.
Cantidad que dosificar: 0.5% a 2% de una solución de ácido cítrico en agua.
- **Hipoclorito de sodio (cloro):** El cloro se utiliza para desinfectar y eliminar bacterias y microorganismos en las membranas.
Cantidad que dosificar: 100 a 200 ppm (partes por millón) de cloro libre.
- **Solución ácida de limpieza:** Para eliminar fouling orgánico y biológico en las membranas.
Cantidad que dosificar: Depende de la concentración y tipo de solución ácida utilizada, generalmente siguiendo las recomendaciones del fabricante.
- **Solución alcalina de limpieza:** Para eliminar fouling inorgánico en las membranas.
Cantidad que dosificar: Depende de la concentración y tipo de solución alcalina utilizada, generalmente siguiendo las recomendaciones del fabricante.

Es importante destacar que las cantidades a dosificar pueden variar dependiendo de la condición específica de las membranas y del sistema, por lo que es recomendable seguir las pautas y recomendaciones proporcionadas por el fabricante del sistema de filtración o desalinización. También es fundamental seguir prácticas de seguridad y manejar los productos químicos de acuerdo con las instrucciones y regulaciones adecuadas.

El sistema de limpieza química se compone de un tanque donde se agrega el producto químico correspondiente al agua osmotizada proveniente de la línea de permeado, junto con una bomba para recircular el agua de limpieza.

Para llevar a cabo la limpieza de las membranas de forma manual, se deben realizar las siguientes operaciones con las válvulas:

- Cerrar la válvula de aislamiento de la línea de permeado.
- Abrir la válvula de la línea de permeado que suministra agua al tanque de limpieza y desplazamiento.
- Abrir la válvula de entrada del agua de limpieza al bastidor de ósmosis inversa.

Luego de completar estas acciones, se añaden los productos químicos al agua del tanque y se recircula el agua de limpieza a través de las membranas de ósmosis inversa utilizando la bomba dedicada para este propósito.

La elección del producto químico dependerá del tipo o naturaleza de las sustancias que forman los depósitos. Por lo tanto, es crucial conocer el origen y el tipo de ensuciamiento para poder eliminarlo de las membranas y prevenir su reaparición en el futuro.

En la mayoría de los casos, las membranas se limpian en el lugar de instalación. Es recomendable que cada planta cuente con su propio equipo de limpieza diseñado específicamente, que debería incluir los siguientes componentes:

- Un tanque de preparación de la solución de limpieza de tamaño adecuado, equipado con una resistencia calefactora y un sistema de agitación.
- Indicadores de temperatura y un caudalímetro.
- Un sistema de recirculación de los caudales de la solución de limpieza en los ramales de producto y rechazo.
- Una bomba centrífuga resistente a la corrosión, diseñada para impulsar la solución de limpieza a una presión entre 2,5 y 4 bar en el circuito.
- Un filtro de cartucho para evitar que los sólidos en suspensión vuelvan a ingresar al sistema durante la recirculación. Estos filtros deben reemplazarse después de cada limpieza o cuando alcancen su presión diferencial máxima.
- Puntos de muestreo disponibles.

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

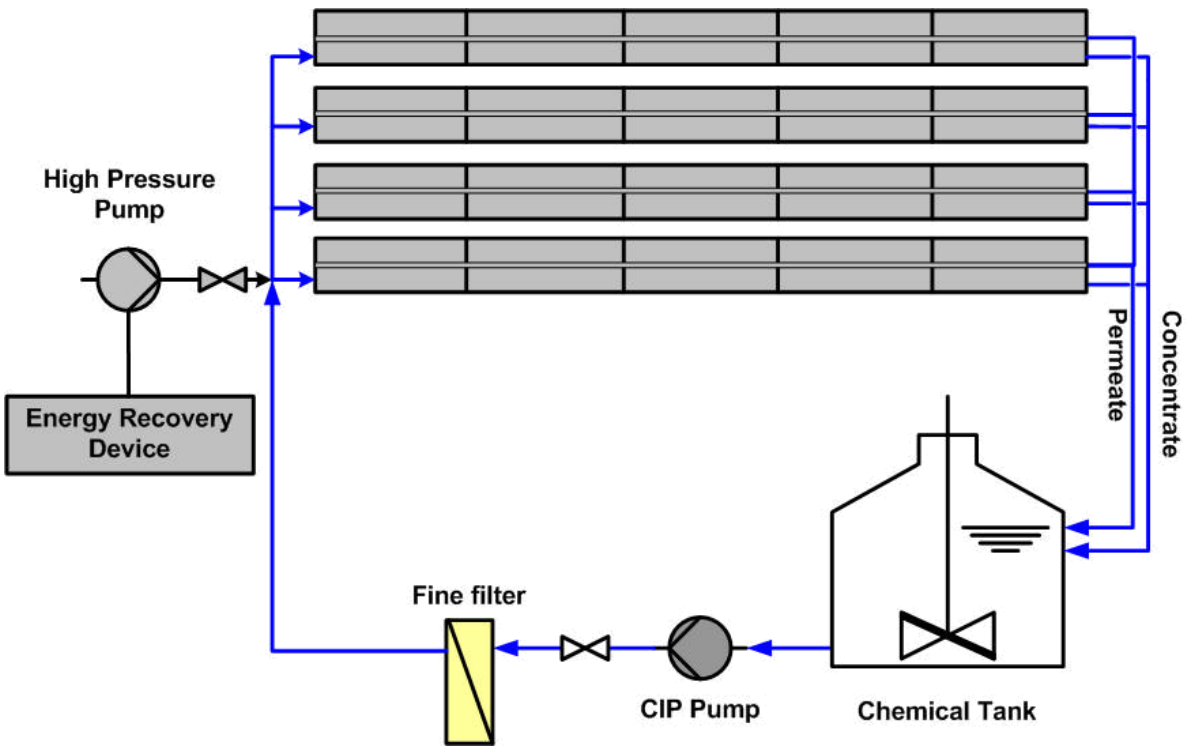


Figura 33: Diagrama típico de un sistema de limpieza de membranas

9.3 Limpieza de pozos

Una de las condiciones necesarias para llevar a cabo la limpieza de un pozo es la presencia de una filtración excesiva de fangos a través de las rejillas de contención. En el caso específico del pozo de extracción mencionado en el documento, se observa una disminución en el flujo y, al mismo tiempo, una alta concentración de fangos en la entrada de la instalación. Por lo tanto, después de un análisis previo, se procede a realizar la limpieza del pozo.

Los trabajos por realizar deben incluir la revisión y el mantenimiento de todos los componentes del sistema de bombeo:

- El pozo profundo, la tubería ciega y los filtros deben ser revisados y, en caso necesario, limpiados o reemplazados para asegurar un flujo adecuado de agua y evitar obstrucciones.
- El equipo de bombeo, incluyendo la bomba y cualquier otro componente relacionado, debe ser inspeccionado y mantenido para garantizar un

funcionamiento óptimo. Esto puede incluir la lubricación de partes móviles, la reparación de posibles fugas y el reemplazo de piezas desgastadas.

- La tubería de descarga, a través de la cual se transporta el agua desde el pozo hasta su destino, también debe ser examinada para detectar posibles daños, como grietas o corrosión, y reparada o reemplazada si es necesario.
- La acometida eléctrica del sistema, que abastece de energía al equipo de bombeo, debe ser evaluada para asegurarse de que cumple con los estándares de seguridad y funcionamiento. Esto implica la revisión de los tableros eléctricos, los cables y los elementos de control eléctrico, como interruptores y relés, para identificar cualquier problema y corregirlo.
- La descontaminación o desinfección del agua es una parte importante del proceso de limpieza del pozo. Esto puede implicar el uso de productos químicos o métodos de tratamiento para eliminar cualquier bacteria, virus u otros contaminantes presentes en el agua, asegurando así su potabilidad y seguridad para su uso.

Durante la primera etapa del proceso de limpieza, se utiliza el método de inyección de agua a presión, también conocido como jetting. En esta etapa, se emplea agua limpia que se inyecta a presión frente a cada uno de los filtros para destaparlos, eliminar los sólidos acumulados y reacomodar el empaque de grava.

En caso de que el nivel del agua en el pozo lo permita, se realiza un lavado adicional utilizando aire comprimido. Este procedimiento tiene como objetivo eliminar los posibles sólidos incrustados en los filtros de rejilla. El aire comprimido se introduce en el pozo, generando un flujo de alta presión que ayuda a desalojar y expulsar cualquier sedimento o partícula que esté adherida a los filtros.

Es importante mencionar que el uso de aire comprimido para el lavado de los filtros de rejilla se realiza cuando las condiciones del pozo y del sistema lo permiten, considerando el nivel del agua presente. Esto se hace para garantizar una limpieza efectiva y evitar cualquier daño o inconveniente en el proceso de limpieza.

10. Gestión de corrientes de rechazo

Para la gestión de las corrientes de rechazo de la planta potabilizadora de agua, es necesario realizar una separación de los sólidos en suspensión presentes en el agua. Para lograr esto, se utilizará un decantador que permitirá separar las impurezas provenientes de las membranas de ósmosis inversa, así como de los filtros de cartucho y de arena. Este decantador será suministrado por la misma empresa que provee los filtros de arena, Hidro Water. (Robledo López, 2011)

La corriente de rechazo de los bastidores de ósmosis inversa será dirigida hacia el decantador, ingresando por la parte inferior a través de una columna central. Desde allí, el agua ascenderá por la columna hasta desembocar en un tanque metálico cilíndrico que romperá la velocidad del agua, eliminando las turbulencias. Luego, el agua caerá hacia el fondo del decantador, donde los fangos se depositarán por acción de la gravedad, mientras que el agua ascenderá y saldrá a través de un canal periférico para su desagüe.

El fondo del decantador tendrá una forma cónica con el objetivo de que los fangos depositados se desplacen hacia el centro, facilitando su gestión. Por otro lado, la materia sólida flotante será conducida mediante un deflector radial de arrastre de grasas hasta el perímetro exterior del puente, donde una raqueta la recogerá y la introducirá en la tolva destinada a la recolección de los elementos flotantes, como se muestra en la figura adjunta.



Figura 34: Decantador de la empresa Hidro Water

El agua clarificada que sale del decantador será descargada al mar. De esta manera, se asegura que el agua tratada siga los procesos adecuados para su posterior uso.

En cuanto a los fangos que son extraídos de la parte inferior del decantador, estos serán enviados a un gestor de residuos especializado. El objetivo es llevar a cabo una valorización energética de los fangos, con el fin de minimizar el impacto negativo de la planta potabilizadora de agua. Esta valorización energética implica utilizar los fangos como fuente de energía, aprovechando su contenido energético de manera responsable y sostenible. De esta manera, se busca reducir al máximo el impacto ambiental y contribuir a la gestión adecuada de los residuos generados por la planta potabilizadora.

La bomba utilizada para bombear el agua clarificada a la planta EDAR es el modelo NBE 50-160/167 de la empresa GRUNDFOS en una configuración 1 + 1R. El agua será transportada mediante una tubería de acero inoxidable de diámetro DN-100.

11. Post-tratamiento

11.1. Remineralización

El propósito de la remineralización es, en términos generales, lograr que el agua tenga un índice de Langelier casi igual a cero y que se mantenga estable cuando está expuesta a la atmósfera.

El índice de Langelier se usa para determinar el equilibrio del agua:

Tabla 23: índices de Langelier

= 0	El agua está perfectamente equilibrada
< 0	Indica que el agua es corrosiva
> 0	Indica que el agua es incrustante

Además, se busca lograr esto con la menor cantidad posible de CO₂ consumido, con el objetivo de reducir al máximo los costos de operación.

Según (Suárez, 2010), “Guía para la remineralización de las aguas desaladas”, para que el agua desalada esté bien remineralizada, deberá cumplir con estas características:

Tabla 24: Características recomendadas nivel adecuado de remineralización

Parámetro	Rango
pH	8.2±0.1
Alk,mg CaCO₃ /L	56±3
HCO₃⁻ , mg/L	68±3
Ca²⁺ , mg/L	21±2
CO₂ , mg/L	0.7±0.1
LSI (SM2330)	±0.15

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

- Dosificación de CO₂ y cal viva.
- Dosificación de CO₂ e hidróxido cálcico.
- Dosificación de CO₂ y lechos de carbonato cálcico.
- Dosificación de CO₂ y torres de dolomitas.
- Dosificación de cloruro magnésico y bicarbonato sódico.

11.2. Cloración

Durante el proceso de oxidación y desinfección del agua, el cloro es el producto más comúnmente utilizado (en pequeñas fuentes de suministro se suelen emplear sus derivados). Sin embargo, en algunas aguas no se logra el resultado deseado debido a la presencia de diversas sustancias con las cuales el cloro no es tan efectivo. Además, la reacción del cloro con sustancias orgánicas puede dar lugar a la formación de compuestos orgánicos clorados, los cuales son ampliamente cuestionados debido a su potencial perjuicio para la salud.

Cuando se añade cloro al agua, reacciona con las sustancias presentes en ella, lo que resulta en una reducción de la cantidad de cloro disponible para actuar como desinfectante. Entre estas sustancias se encuentran el manganeso, hierro, nitritos, sulfhídrico y diversas materias orgánicas. Además de consumir cloro, estas sustancias generan compuestos orgánicos clorados que pueden ser responsables de olores y sabores desagradables.

Cuando se añade cloro al agua, reacciona con las sustancias presentes en ella, lo que resulta en una reducción de la cantidad de cloro disponible para actuar como desinfectante. Entre estas sustancias se encuentran el manganeso, hierro, nitritos, sulfhídrico y diversas materias orgánicas. Además de consumir cloro, estas sustancias generan compuestos orgánicos clorados que pueden ser responsables de olores y sabores desagradables.

En general, la cantidad de cloro requerida para la desinfección del agua se determina utilizando dos métodos comunes: el método de demanda de cloro y el método de breakpoint.

Para que el cloro residual libre esté presente en un agua tratada con cloro, después del suficiente tiempo de contacto, es necesario que la cloración se lleve a cabo mediante una

dosis lo suficientemente elevada de cloro, hecho conocido como «dosificación con cloro sobrante», «cloración por el punto crítico» o «cloración al Breakpoint».

Se establece que la desinfección ha alcanzado el breakpoint. cuando el 85% o más del cloro residual en el agua se encuentra en forma libre. Esta información se muestra claramente en la Figura 35 . El punto de quiebre se refiere a la dosis de cloro correspondiente al mínimo de la curva. Sin embargo, las aguas con poca materia orgánica o compuestos nitrogenados no presentan claramente este punto en el gráfico.

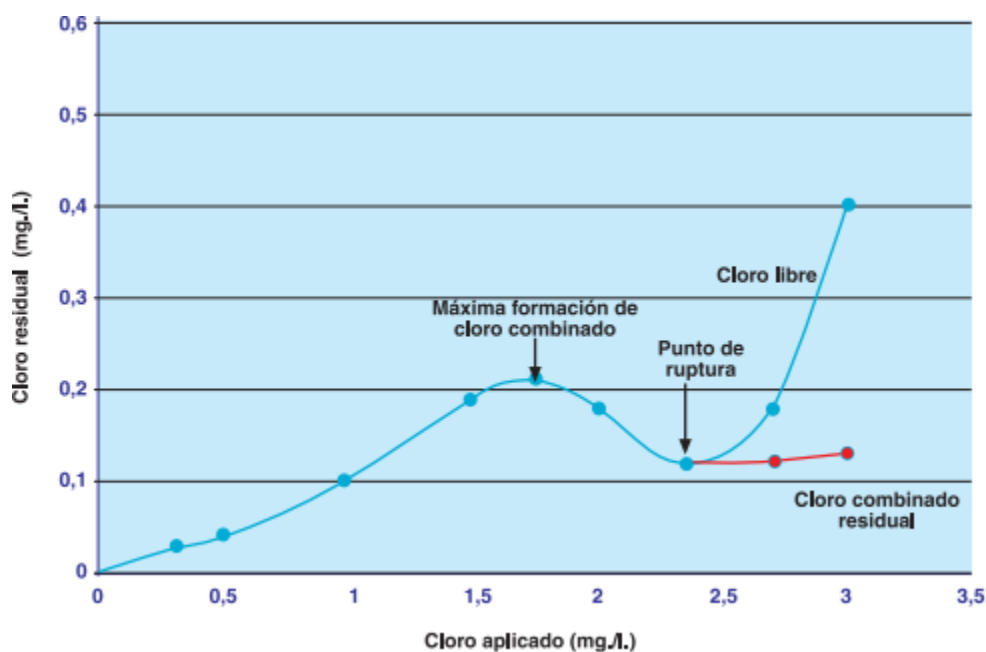


Figura 35: Evolución temporal del cloro residual

12. Estudio económico

Se ha realizado un estudio económico comparativo de varios escenarios de simulación eligiendo la opción más viable económicamente y que cumpla con la calidad de agua para consumo humano dictado por la legislación. (Lora,J, 2022).

La mejor opción ha resultado ser la que trabaja en una conversión del 80% con las membranas de ósmosis inversa BW30XFRLE-400/34i.

12.1. Presupuesto

Para calcular los costes de la planta se dividen en coste de capital o inversión total en el que está incluido el coste en la unidad de ósmosis inversa, el coste anual de operación y mantenimiento y por último el coste del agua potabilizada.

Costes de inversión en la unidad de ósmosis inversa

Tabla 25: Costes de inversión en la unidad de ósmosis inversa

BW30XFRLE-400/34i.	
Coste de cada elemento (€/elemento)	650,96 €
Coste por bastidor	205.052,40 €
Coste total (3 bastidores)	615.157,20 €

Tubo de presión	Codeline 8 1200 psi
Coste por tubo de presión	1.651,00 €
Coste por bastidor	49.530,00 €
Coste total (3 bastidores)	148.590,00 €

Bomba y motor	
Coste bomba y motor	48.987,00 €
Coste por bastidor	48.987,00 €
Coste total (3 bastidores)	146.961,00 €

Reserva bomba y motor	48.987,00 €
-----------------------	-------------

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Coste total unidades OI bastidor	959.695,20 €
Coste total unidades OI instalado (3 bastidores)	2.879.085,6 €

Tabla 26: Coste total anual de reemplazos

REEMPLAZO DE MEMBRANAS Y FILTROS	
Tasa de reemplazo (%/año)	0,2%
Coste de reemplazo membranas	123.031,44 €
Coste de reemplazo filtros (15% membranas)	18.454,72 €
Coste total anual reemplazo	141.486,16 €

A partir del coste total de inversión, se calculan los demás costes, construcción, de ingeniería, de desarrollo y financieros del proyecto, y el coste total neto de inversión (Lora,J, 2022).

Tabla 27: Inversión total de la planta

COSTES CAPITAL DIRECTOS (CONSTRUCCIÓN)	%	Precio
Preparación terreno, accesos, parking, etc	0,015	80.662,36 €
Captación de agua	0,055	295.761,98 €
Pretratamiento	0,09	483.974,15 €
Equipos para el sistema de ósmosis inversa	0,38	2.043.446,40 €
Post-tratamiento	0,02	107.549,81 €
Gestión de concentrados	0,035	188.212,17 €
Gestión de residuos	0,03	161.324,72 €
Sistemas eléctricos e instrumentación	0,3	1.613.247,16 €
Instalaciones y equipos auxiliares	0,025	134.437,26 €
Edificios	0,05	268.874,53 €
Puesta en marcha y pruebas de aceptación	0,025	134.437,26 €
Costes totales		5.377.490,53 €

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

COSTES CAPITAL INDIRECTOS (CONSTRUCCIÓN)-costes de ingeniería del proyecto	%	Precio
Ingeniería preliminar	0,01	53.774,91 €
Ensayos piloto	0,005	26.887,45 €
Diseño de detalle	0,04	215.099,62 €
Gestión y supervisión de la construcción	0,015	80.662,36 €

COSTES CAPITAL INDIRECTOS (CONSTRUCCIÓN)- desarrollo del proyecto	%	Precio
Administración, contratación y gestión	0,015	80.662,36 €
Permisos ambientales	0,03	161.324,72 €
Servicios legales	0,01	53.774,91 €

COSTES CAPITAL INDIRECTOS (CONSTRUCCIÓN) -costes financieros del proyecto	%	Precio
Intereses durante la construcción	0,015	80.662,36 €
Fondo de reserva para el servicio de la deuda	0,025	134.437,26 €
Contingencias	0,065	349.536,88 €
Otros costes financieros	0,015	80.662,36 €
Costes totales de capital		5.377.490,53 €

El coste de inversión total de la planta asciende a cinco millones trescientos setenta y siete mil cuatrocientos noventa euros con cincuenta y tres céntimos.

Tabla 28: Presupuesto de inversión

Coste total de inversión (construcción) bruto	5.377.490,53 €
Beneficio industrial (10%)	537.749,05 €
Presupuesto de ejecución por contrata	5.914.701,83 €
IVA (21%)	1.242.087,38 €
Presupuesto base de licitación	7.156.789,21 €

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Costes anuales de operación y mantenimiento

Los gastos anuales de operación y mantenimiento se han determinado teniendo en cuenta el costo anual de consumo de energía de la planta, así como el costo anual de reemplazar las membranas de ósmosis inversa y los filtros de cartucho.

Tabla 29: Coste anual de consumo energético

Producción anual de agua	4.380.000,00	m3/año
Consumo específico	0,47	kWh/m3
Precio energía eléctrica	0,2	€/kWh
Coste energía	411720	€/año

Dado que se menciona que el coste energético representa el 50% y el coste de reemplazo de las membranas de ósmosis inversa y los filtros de cartucho supone el 7% del coste total de operación y mantenimiento (Lora).

Tabla 30: Costes anuales de operación y mantenimiento- costes variables

Costes anuales de operación y mantenimiento- Costes variables	%	Precio
Energía	0,5	359.160,00 €
Productos químicos	0,06	43.099,20 €
Reemplazo de membranas y filtros de cartucho	0,07	50.282,40 €
Gestión de las corrientes residuales	0,04	28.732,80 €
		481.274,40 €

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Tabla 31: Costes anuales de operación y mantenimiento-costes fijos

Costes anuales de operación y mantenimiento- Costes fijos	%	Precio
Término de potencia	0,05	41.172,00 €
Personal	0,08	65.875,20 €
Mantenimiento	0,07	57.640,80 €
Vigilancia ambiental	0,02	16.468,80 €
Costes indirectos	0,11	90.578,40 €
		271.735,20€

Tabla 32: Coste anual de operación y mantenimiento

Costes variables	551.704,80 €
Costes fijos	271.735,20 €
Coste anual de operación y mantenimiento	823.440,00 €

Por lo tanto, el coste anual de operación y mantenimiento de la planta asciende a la cantidad que se expresa como doscientos ochenta y dos mil cuatrocientos veintidós euros y cuarenta céntimos.

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

Costes del agua potabilizada

El cálculo del coste de agua potabilizada se basa en los costes totales de producción.

Tabla 33: Total coste de producción anual

Amortización de la inversión	728.707,96 €	0,166 €
Total costes operación y mantenimiento	823.440,00 €	0,188 €
Total costes de producción	1.552.147,96 €	0,35 €

Tabla 34: Total coste del agua potabilizada

Total costes de producción	0,35 €
Beneficio industrial (10%)	0,04 €
Impuestos (10%)	0,04 €
Total coste del agua potabilizada	0,425 €

Resumen presupuesto

Tabla 35: Resumen presupuesto

Coste de capital o inversión total	5.377.490,53 €
Costes anuales de operación y mantenimiento	823.440,00 €
Coste de agua potabilizada	0,425 €

13. Conclusiones

La instalación de tratamiento de agua ubicada en la comarca Camp de Morvedre, diseñada para abastecer a los 65.000 habitantes de dicha localidad con un caudal de permeado de 12.000 m³/día, trabajando bajo las condiciones de una conversión del 80%, siendo el caudal de alimentación de 5.333,33 m³/día se ha diseñado con el fin de aprovechar los pocos recursos hídricos de la zona. Más concretamente el aprovechamiento del agua del acuífero de Plana de Sagunto el cuál sufre una contaminación por sulfatos de origen agrícola, así como la salinización causada por procesos de intrusión marina, como el uso de fertilizantes, especialmente nitrogenados.

Tras haber realizado diferentes escenarios variando conversión, número de tubos, probando diferentes tipos de membranas, se ha llegado a la conclusión de que la alternativa más viable económicamente es aquella que trabaja con una conversión de 80% con un paso de membrana, con el primer paso de 14 tubos y el segundo paso de 7 tubos, y la membrana BW30XFRLE-400/34i de DUPONT.

El agua producto de la instalación tiene las siguientes características:

Tabla 36: Características agua producto

<i>Ion/compuesto</i>	<i>Valores</i>
<i>Conductividad (μS/cm)</i>	626,0
<i>Ca⁺² (mg/l)</i>	48,6
<i>Na⁺ (mg/l)</i>	30,6
<i>CO₃⁻² (mg/l)</i>	0,2
<i>SO₄⁻² (mg/l)</i>	120,7
<i>Cl⁻ (mg/l)</i>	71,0
<i>NO₃⁻ (mg/l)</i>	39,7
<i>HCO₃⁻ (mg/l)</i>	46,4
<i>TDS^a (mg/l)</i>	392,5
<i>pH (mg/l)</i>	6,5

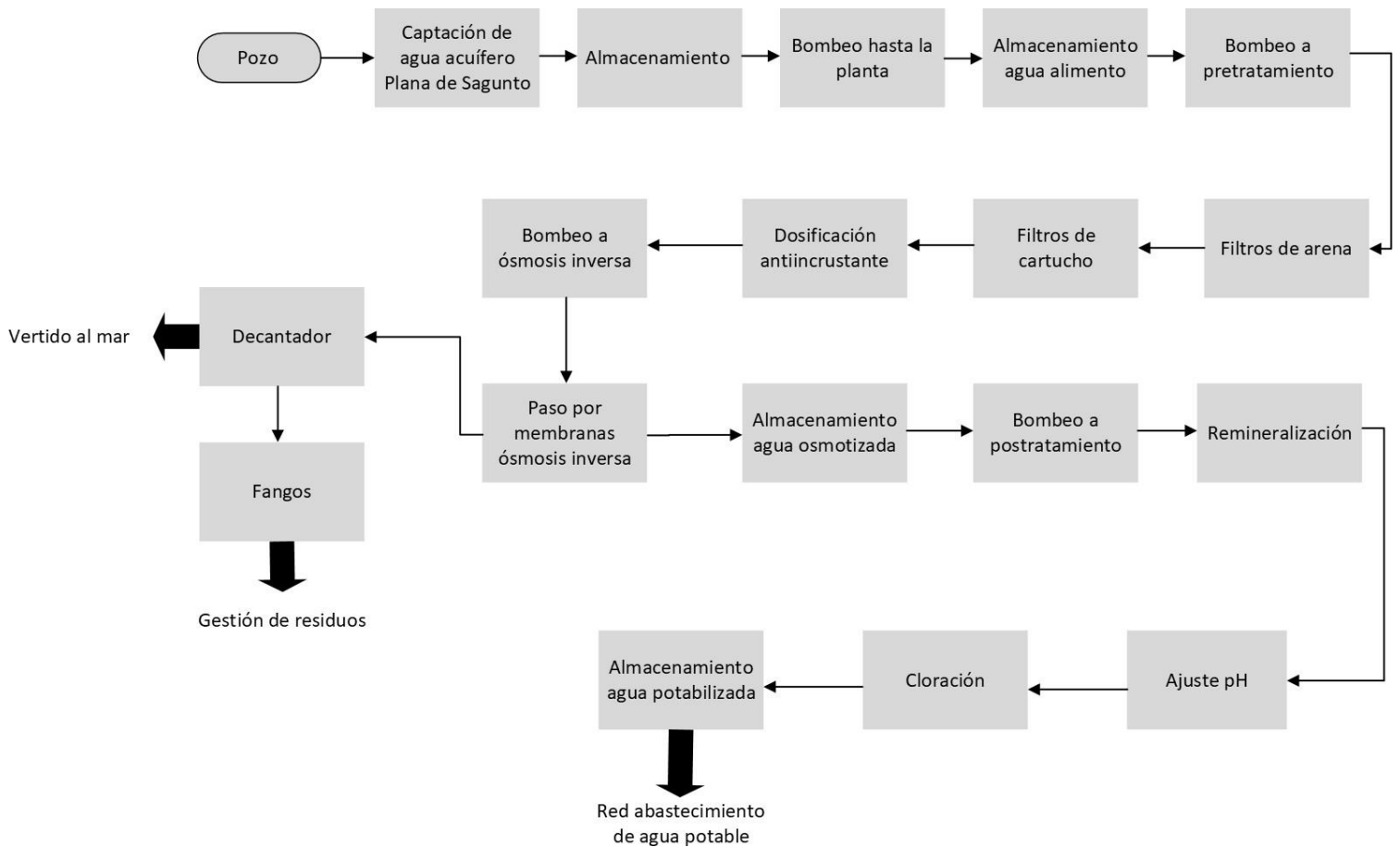
Tal y como se observa en la tabla se puede afirmar que se trata de agua apta para el consumo humano ya que todos los parámetros característicos se encuentran dentro de los valores admitidos por la legislación vigente.

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m^3/d .

Finalmente, los costes de la inversión total son 5.377.490,53€, los costes del operación y mantenimiento son 823.440,00€ así como el coste del agua potabilizada de 0,425€.

Los cuales pueden considerarse admisibles y aceptables para los habitantes de esta localidad, convirtiéndose en un proyecto económicamente viable para la localidad.

14. Diagrama de bloques de la planta



Bibliografía

- AEDYR Asociación española de desalación y reutilización. (2020). Obtenido de <https://aedyr.com/desalacion-reutilizacion-agua-mundial/>
- Amancay Villalba, M. d. (s.f.). (2016). *Los derechos humanos al agua potable y al saneamiento en la Agenda 2030*. UNESCO Etxea, Centro UNESCO del País Vasco, ONGAWA, Ingeniería para el Desarrollo Humano.
- Amorós, A. M. (2002). Insuficiencia de recursos hídricos y competencia de usos en La Comunidad Valenciana
- CCD. (2016). *Una Comunitat comprometida con la Cooperación y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Valencia. Obtenido de <https://cooperaciovalenciana.gva.es/documents/164015995/164820199/Estatregia+ODS+de+la+Generalitat+Valenciana/07af71ca-54cd-445c-b37d-e4cc3483a9e8>
- CEDEX. (2020). *Informe del CEDEX sobre la Evaluación de Recursos Hídricos en Régimen Natural en España (1940/41-2017/18)*. Obtenido de España 2050 fundamentos y propuestas para una estrategia Nacional de largo plazo: https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2021/200521-Estrategia_Espana_2050.pdf
- Criado, A. M. (2009). *Metas + propuestas estrategia territorial Comunidad Valenciana: Agua, Objetivo 07 ser el territorio europeo más eficiente en la gestión de recursos hídricos*. Obtenido de <https://politicaterritorial.gva.es/documents/20551069/91101391/40841-71453-OB07SF+120111/b073fa5d-f082-4aa2-a1d9-54ecc4a7553a?version=1.0>
- Cui, Z. J. (2010). *Fundamentals of Pressure-Driven Membrane Separation Processes. Membrane Technology. Elsevier Ltd, 1-18*.
- Decreto, R. (2003). Obtenido de Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro.: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2023-628
- Grueso-Dominguez, M. C.-J.-O.-M. (2019). *State of the Art: Desalination Using Membrane Technologies as an Alternative for the Problem of Fresh Water Shortage*.
- IGME. (1989). *Balance Plana Castellón-Sagunto*.
- IGME. (2005). *TRABAJOS TÉCNICOS PARA LA APLICACIÓN DE LA DIRECTIVA MARCO DEL AGUA EN MATERIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS*. Obtenido de TRABAJOS TÉCNICOS PARA LA APLICACIÓN DE LA: http://info.igme.es/SidPDF%5C123000%5C550%5CANexos%5C123550_0003.pdf
- IGME. (2009). *ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre*

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m³/d.

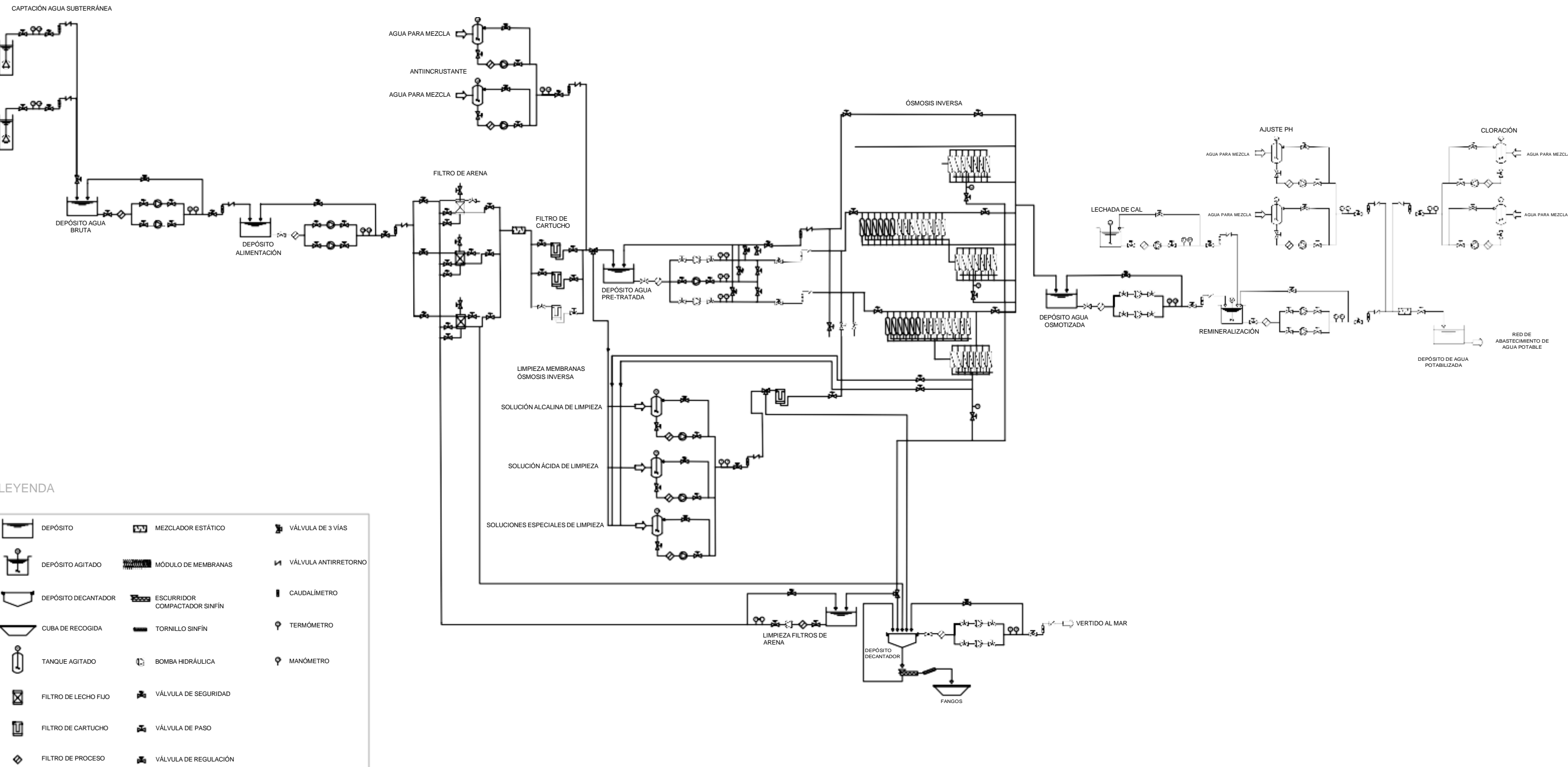
aguas subterráneas... Obtenido de MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA 081.130 MEDIO PALANCIA: http://info.igme.es/SidPDF/148000/11/148011_0000003.pdf

- Lenntech. (s.f.). *Tratamiento de agua & purificación*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/sulfatos.htm#:~:text=Los%20ni%C3%B1os%20son%20a%20menudo,sulfato%20despu%C3%A9s%20de%20unos%20d%C3%ADas>.
- Lora, J. (s.f.). *Desalación de aguas. Análisis de costes del agua*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: Departamento de Ingeniería Química y Nuclear.
- María Grueso-Domínguez, C. C.-J.-O.-M. (2019). Estado del arte: desalinización mediante tecnologías de membrana como alternativa frente al problema de escasez de agua dulce. *Scielo*.
- Miteco. (2006). *INFORME DE VIABILIDAD DE LA ACTUACIÓN 3.2.n REFUERZO DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO*. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/es/agua/planes-y-estrategias/informes-de-viabilidad-de-obras-hidraulicas/saguntof_tcm30-82634.pdf
- Moreno, D. P. (2006). *Desalación y reutilización de aguas. Situación en la provincia de Alicante*. Obtenido de <https://iuaca.ua.es/en/documentos/documents/ebooks/ebook-desalacion-y-reutilizacion-de-aguas-en-la-provincia-de-alicante.pdf>
- Navarro, B. J. (2005). *ESTUDIO PILOTO DE CARACTERIZACIÓN ADICIONAL DE MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEAS APLICADO A LA U.H. (08.21) PLANA DE SAGUNTO*. .
- PHJ. (2023). *PLAN HIDROLÓGICO DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR*. Obtenido de Ciclo de planificación hidrológica 2022 - 2027: https://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Documents/Plan-Hidrologico-cuenca-2021-2027/PHC/Documents/PHJ2227_Anejo08_OAMB_20220329.pdf
- Robledo López, A. (2011). *APLICACIÓN DEL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA AL TRATAMIENTO DEL AGUA DE MAR. ESTUDIO TÉCNICO I DE VIABILIDAD ECONÓMICA*. Barcelona.
- Sagunto, A. d. (s.f.). Obtenido de <https://aytosagunto.es/es/actualidad/aigues-de-sagunt-aprueba-una-reduccion-en-las-facturas-por-suministro-de-agua/>
- Sánchez, J. M. (2009). *Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano*. Madrid: MINISTERIO DE SANIDAD Y POLÍTICA SOCIAL. Obtenido de https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/Guia_desalacion.pdf
- Sandoval, M. (2022). *IdenCity*. Obtenido de <https://www.idencityconsulting.com/la-escasez-del-agua-espana-reto-la-sostenibilidad-hidrica/#:~:text=Se%20calcula%20que%20para%20el,en%20su%20red%20de%20distribuci%C3%B3n>.
- Sotto Díaz, A. (2008). *Aplicación de la tecnología de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos*.

Diseño de una instalación de tratamiento de aguas subterráneas con elevado contenido en sulfatos por ósmosis inversa para el abastecimiento de la comarca Camp de Morvedre mediante la producción de un caudal de 12.000 m^3/d .

Soutullo, R. G. (2016). *Ingeniero marino*. Obtenido de <https://ingenieromarino.com/sistema-de-osmosis-inversa-como-generador-de-agua-dulce/>

Suárez, M. H. (2010). *Guía para la remineralización de las aguas desaladas*. Obtenido de https://www.acuamed.es/media/publicaciones/guia_para_la_remineralizacion_de_aguas_desaladas_rev3_2.pdf



LEYENDA

	DEPÓSITO		MEZCLADOR ESTÁTICO		VÁLVULA DE 3 VÍAS
	DEPÓSITO AGITADO		MÓDULO DE MEMBRANAS		VÁLVULA ANTIRRETORNO
	DEPÓSITO DECANTADOR		ESCURRIDOR COMPACTADOR SINFIN		CAUDALÍMETRO
	CUBA DE RECOGIDA		TORNILLO SINFIN		TERMÓMETRO
	TANQUE AGITADO		BOMBA HIDRÁULICA		MANÓMETRO
	FILTRO DE LECHO FIJO		VÁLVULA DE SEGURIDAD		
	FILTRO DE CARTUCHO		VÁLVULA DE PASO		
	FILTRO DE PROCESO		VÁLVULA DE REGULACIÓN		



TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERIA QUÍMICA

PROYECTO:
DISEÑO DE INSTALACIÓN DE TRATAMIENTO DE AGUA MEDIANTE ÓSMOSIS INVERSA PARA ABASTECER LA COMARCA DEL CAMP DE MORVEDRE

PLANO:
DIAGRAMA DE FLUJO DE LA INSTALACIÓN

AUTOR:
LUCÍA SEÑORÁNS MARTÍNEZ

FECHA:
22 noviembre 2023
ESCALA:
S/E

Nº PLANO:
1