



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

2020-2021

PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA UBICADA EN LA COMARCA EL MARESME

TRABAJO FIN DE MÁSTER

AUTOR: VICTORIA MACIÀ AIX

DIRECTORES: JAIME LORA GARCÍA Y VICENT FOMBUENA BORRÁS

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SEGURIDAD INDUSTRIAL Y MEDIO AMBIENTE

VALENCIA, SEPTIEMBRE 2021

RESUMEN

En los últimos años, debido al abuso de herbicidas y pesticidas en las actividades agroalimentarias ha aumentado considerablemente la contaminación de los suelos que se dedican a estas actividades y, por consiguiente, las aguas subterráneas debido a las filtraciones de estos contaminantes.

En el presente documento se realiza el diseño e implementación de una planta potabilizadora de agua con el fin de aprovechar los recursos hídricos existentes haciendo uso de tecnología de membranas de ósmosis inversa para reducir dichos elementos contaminantes, concretamente la contaminación por nitratos.

Se trata de una planta potabilizadora de agua diseñada para abastecer a la localidad de Mataró en la comarca El Maresme, la cual cuenta con una población de 126.988 habitantes tratándose de un proyecto seguro, eficiente energéticamente y viable económicamente.

Palabras clave: Potabilizadora, nitratos, agua potable, membranas, ósmosis inversa.

RESUM

En els últims anys, a causa de l'abús d'herbicides i pesticides en les activitats agroalimentàries ha augmentat considerablement la contaminació dels sòls que es dediquen a estes activitats i, per consegüent, les aigües subterrànies a causa de les filtracions d'estos contaminants.

En el present document es realitza el disseny i implementació d'una planta potabilitzadora d'aigua a fi d'aprofitar els recursos hídrics existents fent ús de tecnologia de membranes d'osmosi inversa per a reduir els dits elements contaminants, concretament la contaminació per nitrats.

Es tracta d'una planta potabilitzadora d'aigua dissenyada per a abastir a la localitat de Mataró en la comarca El Maresme, la qual compta amb una població de 126.988 habitants tractant-se d'un projecte segur, eficient energèticament i viable econòmicament.

Paraules clau: Potabilitzadora, nitrats, aigua potable, membranes, osmosi inversa.

ABSTRACT

In recent years, due to the abuse of herbicides and pesticides in agri-food activities, the contamination of the soils used for these activities and, consequently, groundwater due to the seepage of these pollutants has increased considerably.

In this document, the design and implementation of a water purification plant is carried out to take advantage of existing water resources by using reverse osmosis membrane technology to reduce these polluting elements, specifically nitrate pollution.

It is a water purification plant designed to supply the town of Mataró in the El Maresme region, which has a population of 126,988 inhabitants, being a safe, energy efficient and economically viable project.

Keywords: Water treatment, nitrates, drink water, membranes, reverse osmosis.

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TRABAJO FINAL DE MÁSTER

- Memoria
- Presupuesto
- Anexo

PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA UBICADA EN LA COMARCA EL MARESME

TRABAJO FIN DE MÁSTER

AUTOR: VICTORIA MACIÁ AIX

DIRECTORES: JAIME LORA GARCÍA Y VICENT FOMBUENA BORRÁS

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SEGURIDAD INDUSTRIAL Y MEDIO AMBIENTE

VALENCIA, SEPTIEMBRE 2021

DOCUMENTO 1. MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN	19
2. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	26
2.1. DATOS DE PARTIDA	26
2.2. UBICACIÓN DE LA PLANTA POTABILIZADORA.....	28
1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA	32
1.1. CAPACIDAD DE LA PLANTA	35
1.2. CAPTACIÓN DEL AGUA.....	36
1.3. PRETRATAMIENTO.....	41
1.4. DISEÑO DE LA CONFIGURACIÓN MODULAR	48
1.5. LIMPIEZA	56
1.5.1. LIMPIEZA DE LAS MEMBRANAS	56
1.5.2. LIMPIEZA DE LOS FILTROS	58
1.6. GESTIÓN DE CONCENTRADOS	59
1.7. REMINERALIZACIÓN DEL AGUA PRODUCTO	61
2. MARCO LEGISLATIVO	69
3. ESTUDIO ECONÓMICO	71
4. CONCLUSIONES.....	74
5. BIBLIOGRAFÍA.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características organolépticas.....	27
Tabla 2. Determinaciones físico-químicas	27
Tabla 3. Gases disueltos.....	27
Tabla 4. Determinaciones físico-químicas de laboratorio.....	27
Tabla 5. Cationes.....	27
Tabla 6. Aniones.....	28
Tabla 7. Presión de trabajo y densidad de flujo de permeado	32
Tabla 8. Población y dotación de la localidad de Mataró [13].....	35
Tabla 9. Caudal de permeado de la planta potabilizadora de agua.....	35
Tabla 10. Caudales de alimentación que se van a tener en cuenta en la simulación	35
Tabla 11. Número de pozos según el caudal de alimentación.....	39
Tabla 12. Diámetro de pozo vertical según la capacidad del pozo. Fuente: Voutchkov, 2013.	39
Tabla 13. Diámetro interno de la tubería según el caudal de alimentación.	40
Tabla 14. Guía de acondicionamiento del agua. (Weinrich et al., 2015; Edzward and Haarhoff, 2011; Voutchkov; 2010a; Vrouwenvelder, et al. 2000).	41
Tabla 15. Número de filtros de arena	43
Tabla 16. Características del filtro de cartuchos.....	44
Tabla 17. Características técnicas del filtro de cartuchos.	44
Tabla 18. Número de filtros de cartuchos.	45
Tabla 19. Escenario de diseño de la membrana CPA5 MAX.	49
Tabla 20. Escenario de diseño de la membrana CPA6 MAX	49
Tabla 21. Desviaciones “típicas” provocadas por las incrustaciones.....	56
Tabla 22. Matriz de resolución de problemas de ósmosis inversa causados por incrustaciones.....	57
Tabla 23. Características recomendadas para el agua remineralizada.....	61
Tabla 24. Técnicas para la remineralización.	62
Tabla 25. Parámetros químicos del agua para consumo humano (RD 140/2003).....	69
Tabla 26. Parámetros indicadores del agua para consumo humano (RD 140/2003). ...	70
Tabla 27. Valores límite de la composición del agua producto (RD 140/2003).....	70
Tabla 28. Coste en la unidad de ósmosis inversa.....	71
Tabla 29. Coste total anual de reemplazos.....	71
Tabla 30. Inversión total de la planta potabilizadora de agua.....	72
Tabla 31. Costes anuales de Operación y Mantenimiento.	73
Tabla 32. Costes del agua potabilizada (€/m ³).....	73
Tabla 33. Características del agua producto final potabilizada.	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del nitrógeno.	21
Figura 2. Aguas superficiales continentales – Concentración media de nitrato para el periodo 2016-2019. Fuente: Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico.	22
Figura 3. Aguas subterráneas – Concentración media de nitrato para el periodo 2016-2019. Fuente: Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico.....	22
Figura 4. Procesos de eliminación de NO_3^-	23
Figura 5. Mapa de Cultivos y Aprovechamientos y localización de explotaciones ganaderas en la comarca El Maresme	24
Figura 6. Mapa de los acuíferos de la comarca El Maresme	25
Figura 7. Valores anuales medios de concentraciones de nitratos por acuífero.	26
Figura 8. Comarca El Maresme [9].....	28
Figura 9. Plano de Mataró	29
Figura 10. Mapa topográfico de Mataró.....	29
Figura 11. Estación depuradora de aguas de Mataró	30
Figura 12. Localización del terreno de la planta potabilizadora de agua en vista satélite	31
Figura 13. Localización del terreno del registro catastral.	31
Figura 14. Operaciones de presión en la filtración con membranas	32
Figura 15. Membranas utilizadas en el proceso de ósmosis inversa	33
Figura 16. Módulo de ósmosis inversa en configuración espiral.	33
Figura 17. Esquema del proceso industrial de la ósmosis inversa (Fariñas, 1999).	33
Figura 18. Entrada al pozo de Jacob	36
Figura 19. Pozo radial.....	38
Figura 20. Bomba para el bombeo del pozo al depósito pulmón de la empresa GRUNDFOS.....	40
Figura 21. Guía de selección del proceso de pretratamiento para plantas de ósmosis inversa.	42
Figura 22. Diagrama de flujo del pretratamiento de la planta.	43
Figura 23. Características técnicas de los filtros de arena de HIDROMETÁLICA.	44
Figura 24. Filtro de arena de HIDROMETÁLICA.....	44
Figura 25. Filtro de cartuchos de SHELCO.....	45
Figura 26. Buscador de productos y soluciones de GRUNDFOS.	45
Figura 27. Especificaciones para la búsqueda de la bomba en GRUNDFOS.	46
Figura 28. Especificaciones técnicas de la bomba LS 500-300-680F de GRUNDFOS.	46
Figura 29. Curva de rendimiento de la bomba LS 500-300-680F.....	46
Figura 30. Bomba LS 500-300-680F de GRUNDFOS.	47
Figura 31. Definición del agua de alimentación en la pestaña “Análisis” del software IMSDesign.	48
Figura 32. Pestaña diseño de la membrana CPA% MAX con conversión del 40%.	49
Figura 33. Diagrama flotante del proceso de ósmosis inversa.	50
Figura 34. Resultado simulación membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.....	50
Figura 35. Resultado simulación membrana CPA5 MAX con conversión 45%.....	51
Figura 36. Resultado simulación membrana CPA5 MAX con conversión 50%.....	51

Figura 37. Resultado simulación membrana CPA6 MAX con conversión 40%.....	52
Figura 38. Resultado simulación membrana CPA6 MAX con conversión 45%.....	52
Figura 39. Resultado simulación membrana CPA6 MAX con conversión 50%.....	53
Figura 40. Diagrama de flujo típico de una cámara de intercambio de presión de desplazamiento.....	54
Figura 41. Funcionamiento de las cámaras de intercambio de presión de rotación.	54
Figura 42. Comparación energética sin sistema de recuperación de energía, turbina Peltron e intercambiador PX.....	54
Figura 43. Decantador por gravedad de la empresa HIDROMETÁLICA.	59
Figura 44. Especificaciones del decantador por gravedad de la empresa HIDROMETÁLICA.....	60
Figura 45. Esquema general del modelo de gestión de la Agència de Residus de Catalunya.	60
Figura 46. Aspectos del equilibrio $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^-$ en el proceso de remineralización del agua osmotizada.....	61
Figura 47. Resultados de la simulación de la membrana CPA5 MAX con conversión 40%.	62
Figura 48. Resultados de la simulación de la membrana CPA5 MAX con conversión 45%.	63
Figura 49. Resultados de la simulación de la membrana CPA5 MAX con conversión 50%.	63
Figura 50. Resultados de la simulación de la membrana CPA6 MAX con conversión 40%.	63
Figura 51. Resultados de la simulación de la membrana CPA6 MAX con conversión 45%.	64
Figura 52. Resultados de la simulación de la membrana CPA6 MAX con conversión 50%.	64
Figura 53. Relación entre la dosificación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el aumento del pH . Adaptado de Mutschmann y Stimmelmayer (2002).	65
Figura 54. A la izquierda, el esquema de una instalación de preparación de lechada de cal. A la derecha, planta de tratamiento con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y CO_2	65
Figura 55. Resultado remineralización membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.	66
Figura 56. Resultado remineralización membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.	66
Figura 57. Resultado remineralización membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.	66
Figura 58. Resultado remineralización membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.	67
Figura 59. Resultado remineralización membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.	67
Figura 60. Resultado remineralización membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.	67

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un bien indispensable para la vida, para la seguridad, para los hogares y para conseguir alcanzar un desarrollo social, económico y medioambiental. Éste es un bien abundante, pero a la vez escaso. Abundante porque al menos el 70% de la superficie terrestre está cubierta de agua, pero escaso porque tan sólo el 2,5% representa el agua dulce de la Tierra. Es por ello que, esta escasez de agua se ha convertido en una problemática a nivel mundial ya que no es suficiente para abastecer a la población de la Tierra.

A la escasez de agua dulce en el mundo hay que añadir que en muchos lugares ésta está contaminada por la actividad humana de vertidos de industrias, de uso de fertilizantes, pesticidas, herbicidas y nitratos y nitritos entre otros. Es el caso de contaminación por nitratos y nitritos el principal problema de las aguas subterráneas de España por la actividad agrícola y ganadera.

Esta problemática ha dado la voz de alarma a las autoridades europeas, concretamente dándole a España un ultimátum por contaminar las aguas subterráneas con nitratos. La Comisión Europea (CE) le ha dado a España el último aviso para que afronte, de una vez por todas, la contaminación de las reservas de agua subterráneas por nitratos, residuos de origen ganadero producidos por la industria agroalimentaria.

La contaminación de las aguas subterráneas se define como la alteración de su calidad natural que la inhabilita, parcial o totalmente, como recurso para el uso al que se destina. La calidad de las aguas subterráneas condiciona su posterior uso, siendo los niveles de exigencia sensiblemente más estrictos para el consumo humano que si se trata para el riego de cultivos. Siendo los niveles más estrictos para el consumo humano con un valor máximo de 50 mg/l de nitratos establecido tanto por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como por las legislaciones europeas y española (en el Real Decreto 140/2003). Sin embargo, existen organismos que son más estrictos en cuanto al límite de éstos y sitúan los límites máximos en 10 mg/l de nitrato como es el caso de la Agencia para la Protección del Medio Ambiente Norteamérica (EPA) [1].

Ante este tipo de contaminación emergente se han establecido una serie de normativas impuestas por los organismos pertinentes muy estrictas con tal de impedir y/o minimizar la extinción de los recursos hídricos naturales existentes y este es el objetivo principal del presente estudio, realizar un diseño de la una planta potabilizadora de agua ubicada en la comarca El Maresme, lugar donde la contaminación por nitratos en los acuíferos de la zona sextuplica el límite legal establecido de 50 mg/l.

La contaminación de las aguas subterráneas por nitratos y nitritos en España es algo más habitual de lo que debería ser provocado por la actividad agroalimentaria, la cual es una de las principales potencias económicas del país.

Los nitratos son iones formados por un átomo de nitrógeno, tres de oxígeno y una carga negativa (NO_3^-) que en la naturaleza se encuentra disuelto en agua debido al ciclo natural del nitrógeno como se muestra en la Figura 1. La presencia de estos iones ha aumentado debido, principalmente, por su uso en la agricultura y la ganadería intensiva ya que favorecen al crecimiento de las plantaciones y aumentan su rendimiento en el caso de la agricultura, mientras que en caso de la ganadería su origen se encuentra en las heces de los

animales. Estas grandes cantidades del ion se filtran a los acuíferos provocando la inhabilitación del consumo del agua.

Los posibles orígenes de nitratos en las aguas subterráneas son:

- Naturales:
 - o El nitrógeno geológico que está presente en las rocas y minerales avanza a través del suelo mediante la lixiviación, llegando así a las aguas subterráneas.
 - o El nitrógeno que se almacena de forma natural en los bosques y que pueden avanzar hacia las aguas subterráneas debido a la deforestación, principalmente.
- Residuales:
 - o Aguas residuales no tratadas.
 - o Uso inadecuado de los lodos generados en las depuradoras.
 - o Disposiciones inadecuadas de las fosas sépticas.
 - o Tratamientos inadecuados de basura y residuos sólidos urbanos.
 - o Deficiencias en las instalaciones destinadas a la recogida y almacenamiento de deyecciones animales (porcino, bobino).
- Agrícolas:
 - o Uso excesivo de fertilizantes nitrogenados en la agricultura.
 - o Aplicación inadecuada de las deyecciones animales en el suelo.
 - o Exceso de concentración de ganado.

En la Figura 1 se muestra de forma sintetizada los procesos que se llevan a cabo en el ciclo de vida del nitrógeno y se describen a continuación de forma más detallada:

- **Absorción de nitrógeno por las plantas**, de donde parte de éste vuelve al suelo después de la cosecha y es o puede ser aprovechado para las siguientes cosechas.
- **Volatilización**, es la emisión del amoniaco en forma de gas desde el suelo a la atmósfera. Si el estiércol no se incorpora al suelo pierde gran parte del nitrógeno que contiene en forma de amoniaco.
- **Deposición atmosférica**, es el nitrógeno que proviene de las precipitaciones de la lluvia.
- **Mineralización**, es la transformación del nitrógeno orgánico en amonio que hay en el suelo provocado por la acción de microorganismos mientras que el proceso contrario se denomina inmovilización. Siendo la mineralización neta el balance entre ambos procesos.
- **Nitrificación**, es la transformación del amonio en nitrito y luego en nitrato debido a la acción de bacterias aeróbicas en el suelo.
- **Desnitrificación**, es la conversión del nitrato en nitrógeno gas o en dióxido de nitrógeno.
- **Lixiviación**, es el arrastre del nitrato sin aprovechar por debajo de la zona radicular mediante la lluvia o riego provocando la contaminación de las aguas residuales [2]

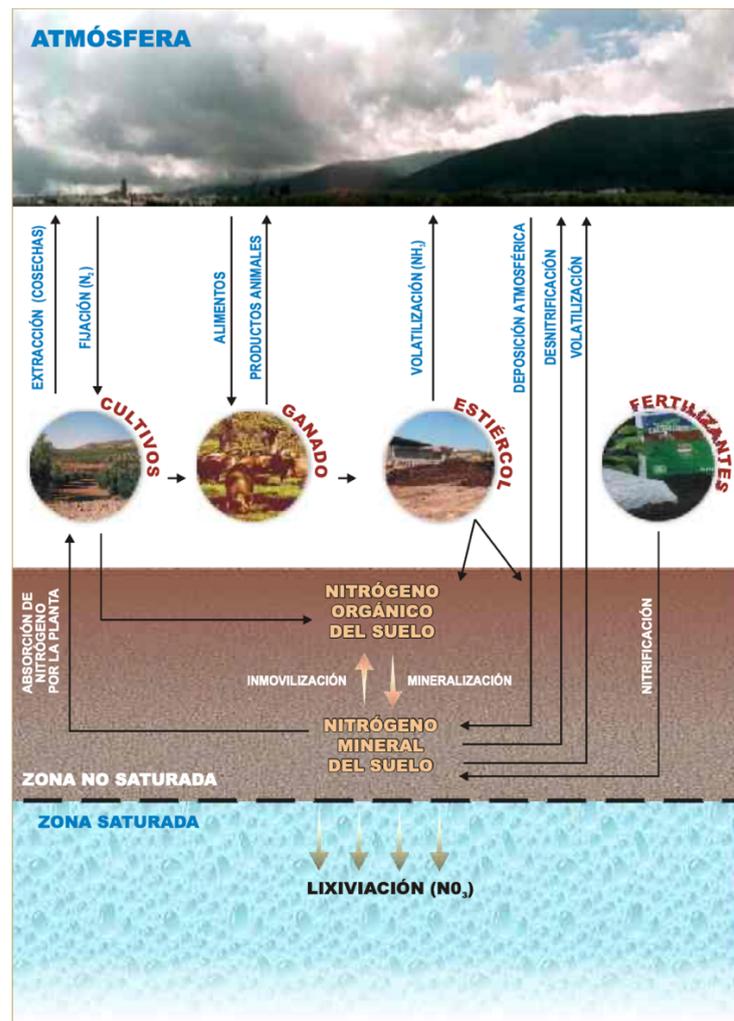


Figura 1. Ciclo del nitrógeno.

Por tanto, existe una relación muy estrecha entre la contaminación de los suelos y aguas subterráneas con las prácticas agrarias cuyo manifiesto es el incremento del contenido en nitratos provocado por el desarrollo agrícola y el consumo de fertilizantes.

A pesar de poder relacionar los nitratos con la contaminación de suelos y aguas subterráneas no existe una relación directa entre los nitratos y problemas de salud diagnosticados con fundamento consolidado. Sin embargo, existen estudios que relacionan la posible implicación de estas sustancias en problemas de salud como la metahemoglobina en bebés, la cual provoca la limitación del transporte de oxígeno a los tejidos.

El diagnóstico de la contaminación por nitratos en España se lleva a cabo mediante los programas de seguimiento del estado de las masas de agua de la DMA coordinado con lo establecido en el artículo 8 del Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, que transpone la directiva de nitratos [3].

Las siguientes imágenes presentan el resultado en España de las aguas superficiales y subterráneas:

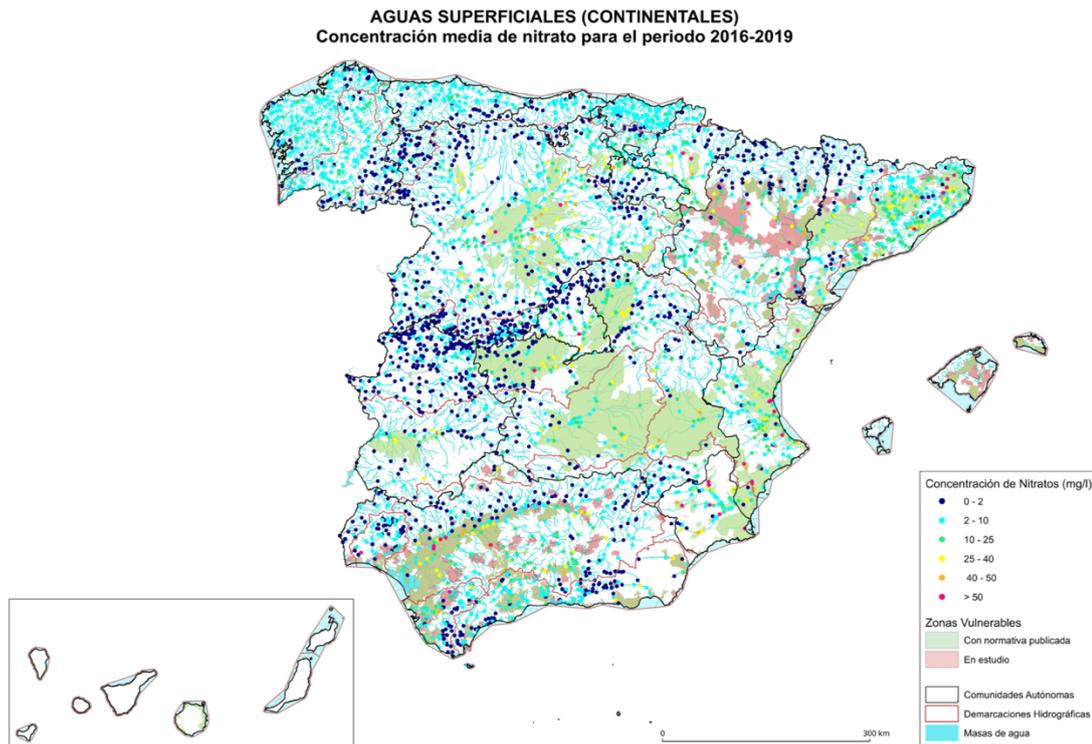


Figura 2. Aguas superficiales continentales – Concentración media de nitrato para el periodo 2016-2019.

Fuente: Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

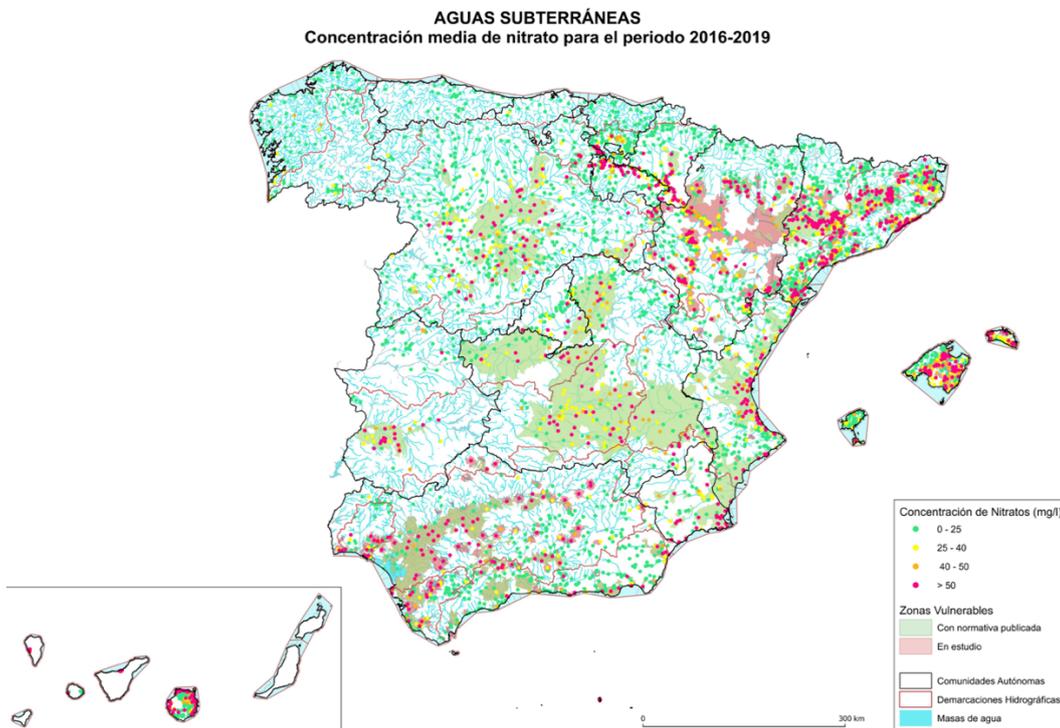


Figura 3. Aguas subterráneas – Concentración media de nitrato para el periodo 2016-2019. Fuente: Ministerio

de Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Tal y como se puede apreciar en la Figura 3 es evidente que en España el problema de contaminación por nitratos no es algo excepcional, sino que ocurre en la mayoría del territorio donde se llevan a cabo actividades agroalimentarias lo que provoca que se reduzcan los recursos hídricos naturales. A este problema de contaminación hay que añadir

que el cambio climático está favoreciendo la desertificación del territorio español favoreciendo esta reducción de los recursos hídricos naturales. Todas estas cuestiones ambientales combinadas podrían desencadenar un problema medioambiental irreversible con unas consecuencias catastróficas para el medio ambiente y, por supuesto, para el desarrollo de la actividad personal e industrial de ser humano.

Es por ello que, actualmente se dispone de la información y tecnología necesaria para evitar llegar a esta situación irreversible y con el fin de evitarlo los organismos públicos pertinentes, ya sean locales, provinciales, regionales, estatales o a nivel europeo, han dictado una serie de directrices para evitar desencadenar dicha catástrofe. Queda entonces, en la mano de cada individuo en particular y de las industrias y organismos en general de poner en marcha este plan para combatir la desertificación, el cambio climático y la extinción de los recursos naturales existente.

Para combatir esta problemática existen varias técnicas para la eliminación de los nitratos en las aguas, pudiendo clasificarse en dos grupos:

- **Técnicas de separación.** Las cuales pretenden separar los nitratos de la corriente de agua a depurar concentrándolos en segundo desecho (la salmuera) para tratarlo o almacenarlo. Dentro de estas técnicas se encuentran la electrodiálisis, la ósmosis inversa y las resinas aniónicas.
- **Técnicas de transformación.** Mediante estas técnicas se transforman los nitratos en otros compuestos químicos inocuos por medio de vías biológicas y catalíticas [4].

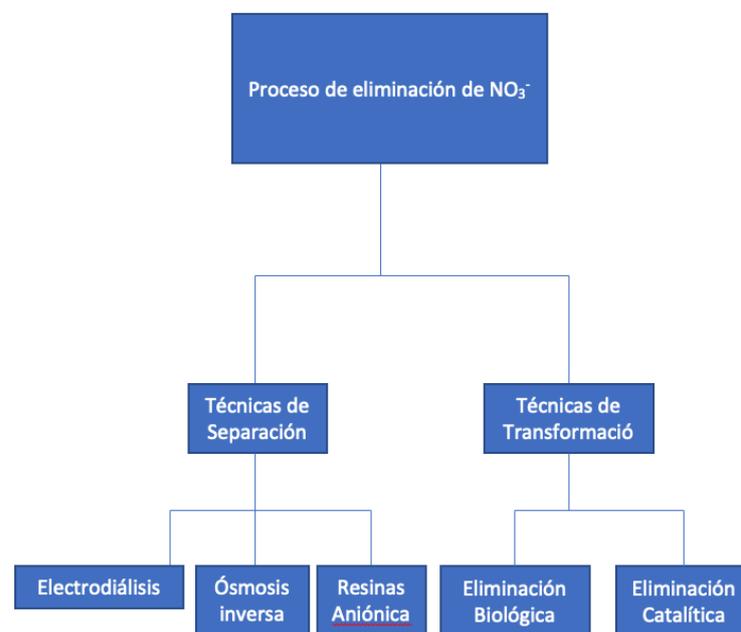


Figura 4. Procesos de eliminación de NO_3^-

Para el presente estudio se va a hacer uso la técnica de separación por ósmosis inversa mediante una simulación en con software *IMSDesign Hydranautics*.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Centrando la atención en el caso de la comarca El Maresme cuya principal actividad es la agricultura (con cultivos de secano como viñas, cereal y olivo) y la pesca. Es en esta comarca donde han saltado las alarmas de contaminación por nitratos en el acuífero de la zona llegando a alcanzar unos valores que superan los 300 mg/l.

Por tanto, las zonas vulnerables de la comarca se componen básicamente de la totalidad de la masa de agua subterránea perteneciente a las Cuencas internas catalanas, siendo la extensión de ésta de 45609 hectáreas.

El uso del suelo de esta comarca es principalmente forestal, arbolado y no arbolado, siendo el segundo uso predominante de esta masa de agua de superficie improductiva. Es decir, los núcleos urbanos le han ganado territorio a la superficie agrícola tanto por tratarse de una zona costera como por ser una zona muy cercana a la ciudad de Barcelona.

Sin embargo, el 10,54% de la superficie terrestre de la comarca corresponde a superficie agrícola, donde predomina el regadío y huertas y cultivos forzados. Por tanto, se trata de una agricultura intensiva donde se excede el uso de fertilizantes para exprimir los recursos de la tierra tanto en aplicación directa como en el riego convirtiéndose en una zona potencialmente de riesgo.

La Figura 5 muestra el mapa de cultivos y las explotaciones ganaderas y en la Figura 6 se muestra el mapa de los acuíferos de la zona.

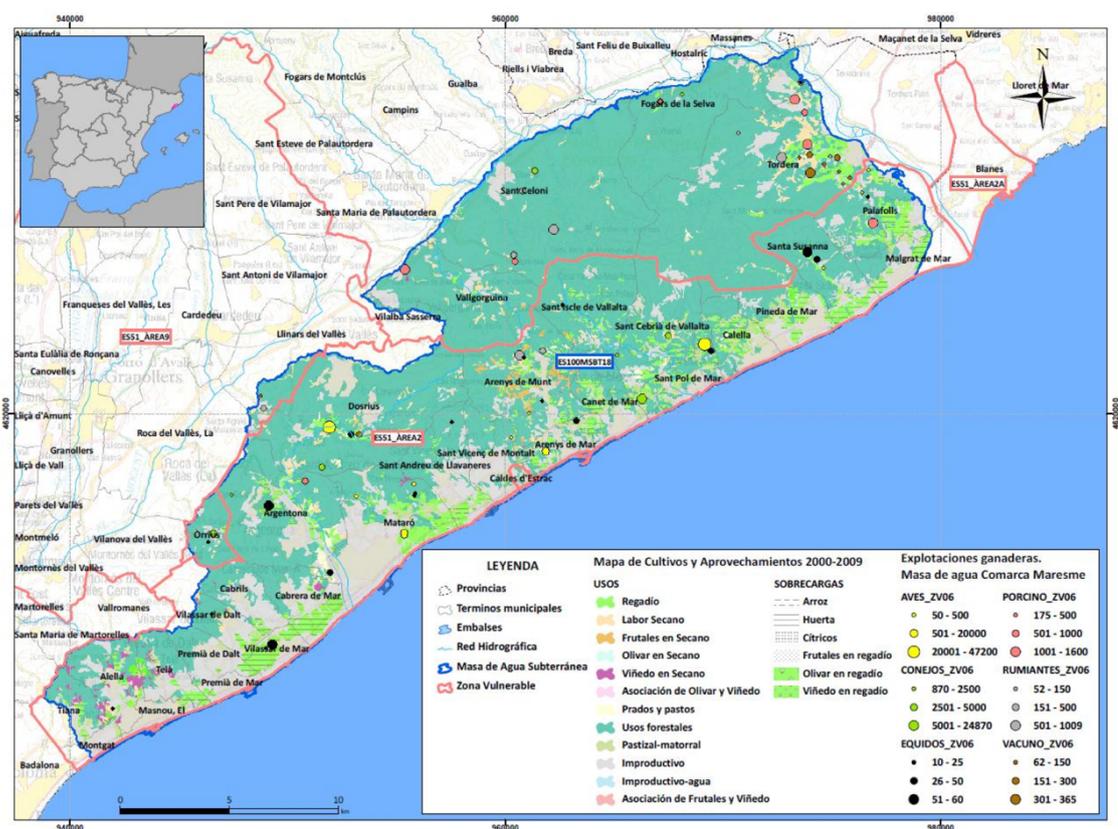


Figura 5. Mapa de Cultivos y Aprovechamientos y localización de explotaciones ganaderas en la comarca El Maresme

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

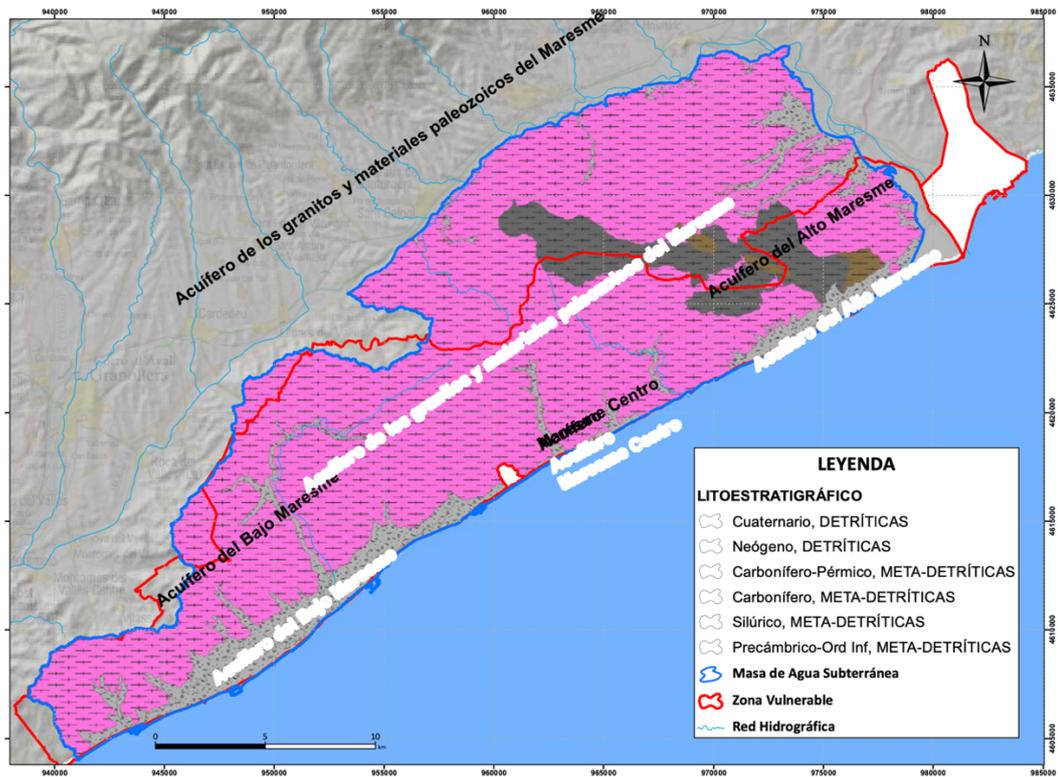


Figura 6. Mapa de los acuíferos de la comarca El Maresme

La mayoría de entrada al sistema acuífero se lleva a cabo por la recarga de lluvia, por la recarga de los cursos de agua y por los retornos de riego, mientras que las salidas de este se producen hacia el mar siguiendo un curso del agua de entrada por el noroeste y del curso de salida hacia el sureste.

2. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

En este contexto el objetivo del presente proyecto es plantear una solución a los problemas de contaminación por nitratos en los recursos hídricos existentes de la comarca El Maresme con el fin de aprovechar dichos recursos hídricos utilizando tecnología de membranas por ósmosis inversa en una potabilizadora de agua para eliminar dicha contaminación.

Es entonces cuando se va a centrar especial interés en el Acuífero del Bajo Maresme, el cual va a ser el objeto de estudio del presente proyecto. Este acuífero es del tipo cuaternario aluvial, tratándose de un acuífero aislado constituido por rocas plutónicas con retrazos de materiales paleozoicos cuya cobertura está formada por arcillas, arenas y arenas gruesas provenientes de la meteorización de los materiales graníticos y por el arrastre por los cursos torrenciales [5]. Este acuífero de aluviales y cuaternario que se encuentra entre Tiana y Caldes d'Estrac es un acuífero libre de entre 24 y 100 m de espesor.

Los resultados del estudio de contaminación por nitratos obtenidos por la Agencia Catalana del Agua (ACA) mostraron en 2011 que los límites más bajos de nitratos se encontraban a lo largo del límite noroccidental de la masa de agua, mientras que el nivel de nitratos aumentaba a medida que se avanzaba hacia la costa superando los 300 mg/l. Y, este aumento de concentración por nitratos está ligado a la presencia de zonas de cultivo en las zonas con mayor concentración. Se muestra en la Figura 7 la evolución de la concentración de nitratos desde 2003 hasta 2012 por acuíferos.

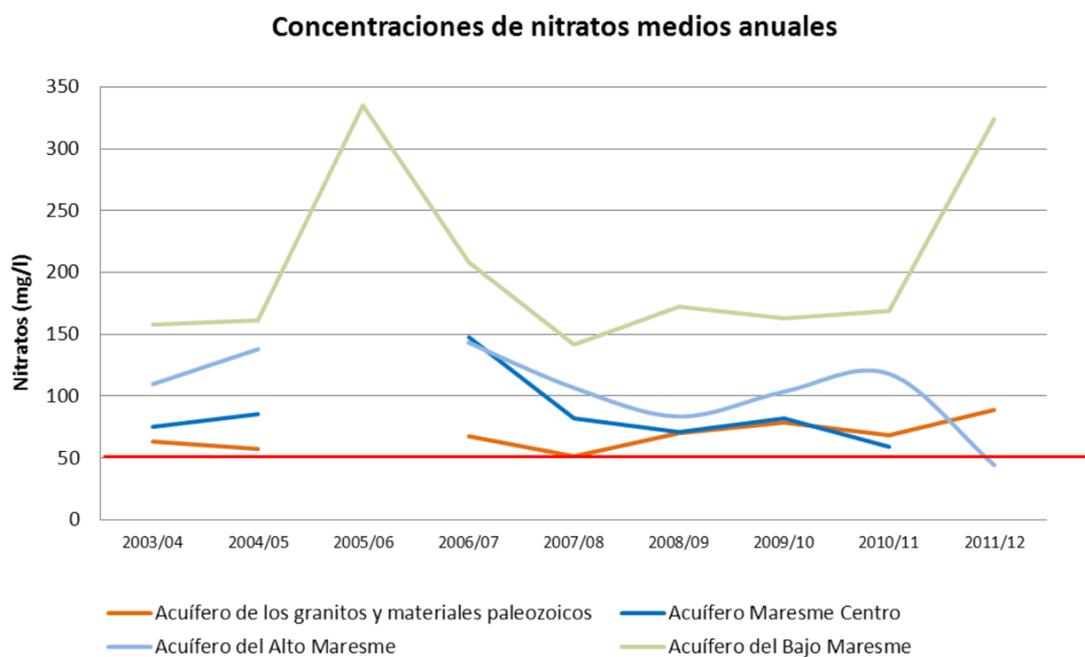


Figura 7. Valores anuales medios de concentraciones de nitratos por acuífero.

2.1. DATOS DE PARTIDA

En general, la calidad del agua del Maresme es mala principalmente porque presenta una elevada dureza y un alto contenido en NO_3^- , además, también muestra una elevada salinización en las áreas litorales resultando incluso agua de mala calidad para el uso agrícola.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Esta composición hidroquímica de las aguas subterránea del Maresme han modificado su composición inicial generalmente por los siguientes factores:

- Por la importación de aguas procedentes del río Ter y del delta del Tordera.
- Por el efecto contaminante del abono intensivo de los cultivos de regadío a través del lixiviado.
- Por el efecto contaminante del vertido de residuos sólidos y líquidos.
- Y, por el efecto contaminante de la intrusión marina.

De los factores mencionados anteriormente, el primero de ellos es quizás el menos perjudicial ya que el agua procedente del río Ter y del delta del Tordera es agua con escasa mineralización. Sin embargo, el caso de la contaminación toma especial relevancia debido al elevado contenido aniónico producido por abonos de tipo nitrato, fosfato y cloruro de amonio y potasio provocando un aumento de los Cl^- , SO_4^- y NO_3^- [6].

Las aguas del acuífero corresponden a facies cloruradas con presencia de bicarbonatos y con un alto contenido en nitratos (entre 31 y 587 mg/l) atribuido a las prácticas agrícolas intensivas.

A continuación, se muestran los datos obtenidos de caracterización del agua de estudio a pie de manantial [7]:

Tabla 1. Características organolépticas

Olor	inolora
Sabor	insípida
Color	incolora

Tabla 2. Determinaciones físico-químicas

Temperatura de emergencia	38.8 °C
Conductividad (a 38,8 °C)	1.8 mS/cm
pH (a 38,8 °C)	7.37
rH (a 38,8 °C)	29.2

Tabla 3. Gases disueltos

Anhídrido carbónico	0.495 mg/l
---------------------	------------

Y, seguidamente, se muestran los datos obtenidos de caracterización del agua de estudio en el laboratorio [8]:

Tabla 4. Determinaciones físico-químicas de laboratorio

Dureza total	10 °Franceses
Residuo seco a 110 °C	658 mg/l
Residuo seco a 180 °C	643 mg/l
Residuo fijo a 600 °C	614 mg/l

Tabla 5. Cationes

CATIONES	mg/l	mEq/l	%mEq
Na^+	232.700	10.122	80.713
K^+	12.400	0.317	2.529
Ca^{2+}	34.700	1.732	13.809
Mg^{2+}	4.500	0.370	2.951
TOTAL		12.541	100.000

Tabla 6. Aniones

ANIONES	mg/l	mEq/l	%mEq
Br ⁻	0.700	0.009	0.071
Cl ⁻	277.100	7.814	63.190
CO ₃ ²⁻	11.300	0.377	3.046
HCO ₃ ⁻	151.000	2.475	20.013
NO ₃ ⁻	7.300	0.118	0.952
SO ₄ ²⁻	75.600	1.574	12.728
TOTAL		12.266	100.000

Como se observa en la Tabla 6, en este caso el muestreo de los aniones da unos valores normales para el caso de los nitratos. Sin embargo, en la simulación que se va a llevar a cabo con el software *IMSDesign* para diseñar la configuración de las membranas se va a suponer un valor de 350 mg/l de nitratos con el fin de simular una captación de agua en caso extremo de picos de concentración.

2.2. UBICACIÓN DE LA PLANTA POTABILIZADORA

La comarca El Maresme se encuentra en la provincia de Barcelona situada en el centro del litoral catalán, donde limita por el norte con las comarcas de la Selva y del Vallès Oriental, por el sur con el Barcelonés y por el sureste con el mar Mediterráneo. En la siguiente figura se muestran las localidades de la comarca El Maresme.

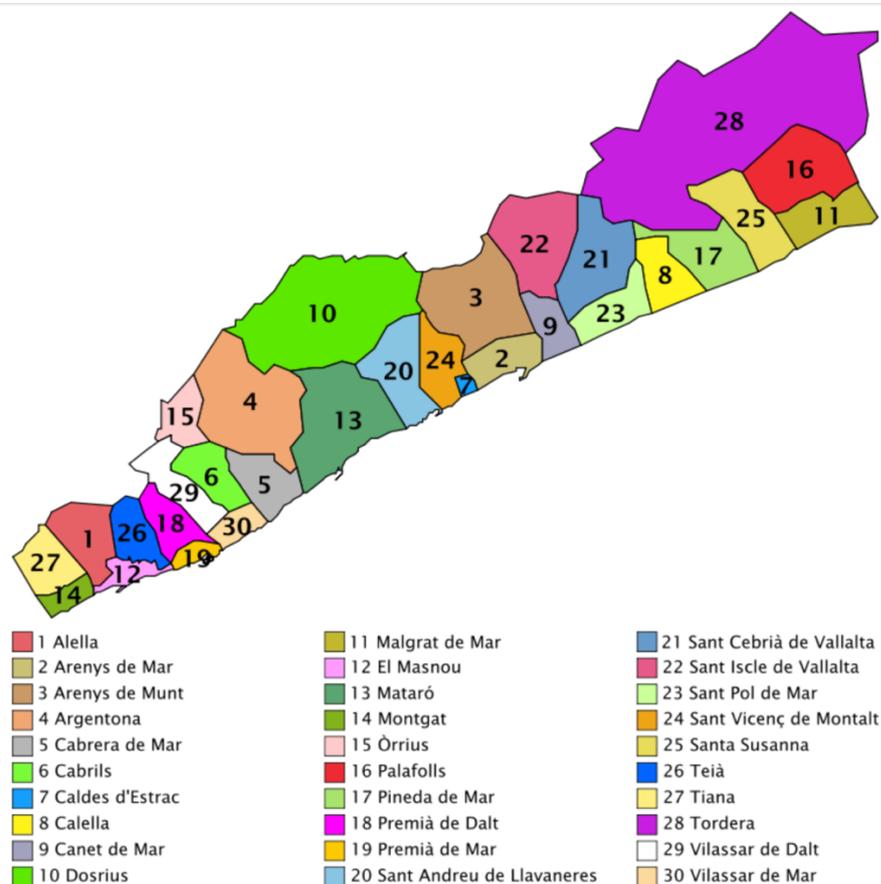


Figura 8. Comarca El Maresme [9]

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Esta comarca de tradición agrícola y pesquera tiene aproximadamente 436487 habitantes en su totalidad. Concretamente, el municipio donde se va a ubicar la planta potabilizadora de agua, Mataró (Figura 9 y Figura 10), lugar que se encuentra en la superficie del acuífero El Bajo Maresme el cual es el objeto de estudio por la elevada concentración de nitratos [10].

Esta localidad cuenta con una superficie de 22.53 km² a 28 m por encima del nivel del mar y cuenta con una población de 126988 habitantes.



Figura 9. Plano de Mataró

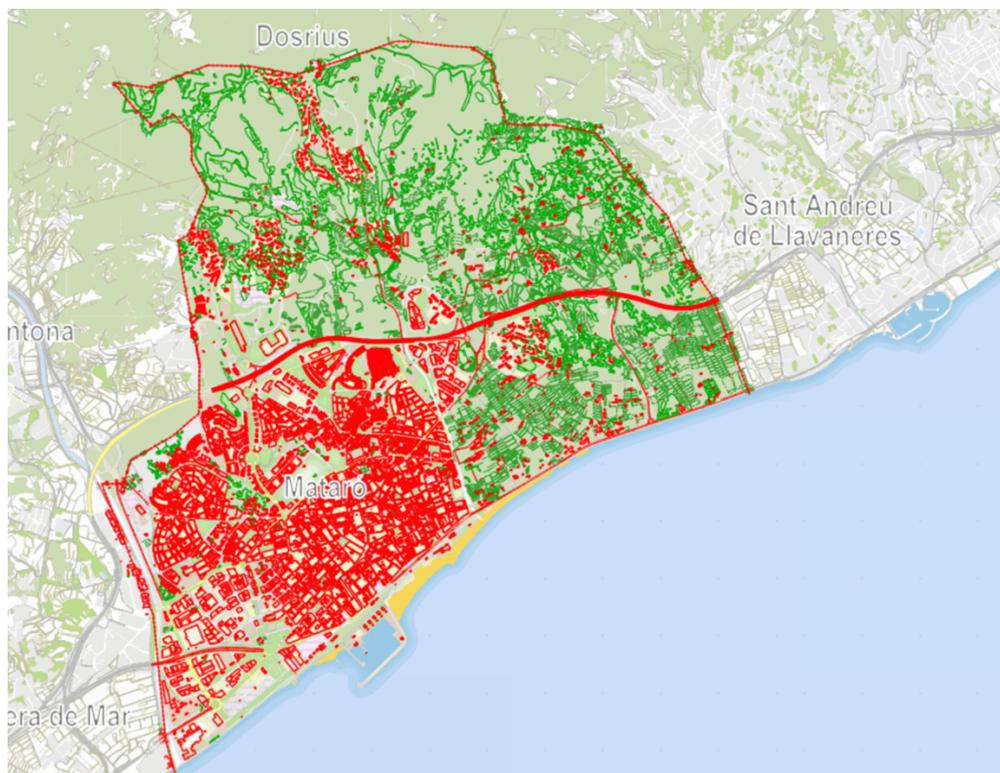


Figura 10. Mapa topográfico de Mataró

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

La ciudad cuenta ya con una estación depuradora de aguas perteneciente al grupo SIMMAR, cuya función principal es la gestión de sistemas de saneamiento que hay en la comarca El Maresme, así como la gestión de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARS). Esta estación depuradora se encarga del saneamiento de una red de colectores que recogen las aguas residuales de las poblaciones de Vilassar de Mar, Vilassar de Dalt, Cabrera de Mar, Cabrils, Argentona, Dosrius y Mataró.

Esta planta depuradora de agua se encuentra situada en el paraje de Les Hortes del Camí Real (Figura 11), en cuya línea de agua desarrolla un proceso biológico de doble etapa, como consecuencia de la incidencia de las aguas industriales y una línea de fangos con recirculación, espesadores, deshidratación y almacenaje. Y, finalmente, las aguas tratadas se abocan al mar a través de un emisor submarino de 2000 metros de longitud [11].



Figura 11. Estación depuradora de aguas de Mataró

El terreno escogido se encuentra fuera del núcleo urbano y zona turísticas de la localidad de Mataró con el fin de no influir negativamente al impacto visual tal y como se puede observar en las siguientes imágenes. El terreno consta con una superficie de 196283 m² cuyo uso principal era agrario. Los datos catastrales del inmueble se encuentran más detalladamente en el **Documento 3. Anexo**.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

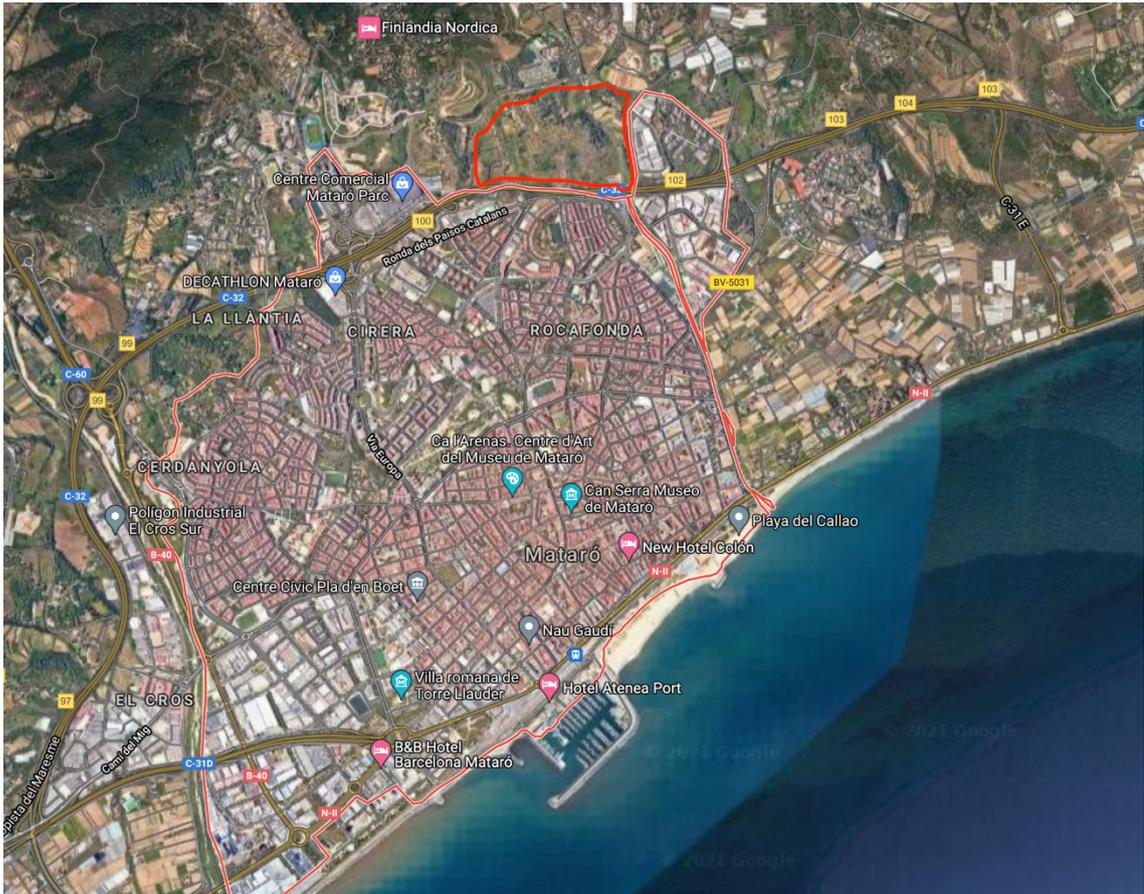


Figura 12. Localización del terreno de la planta potabilizadora de agua en vista satélite

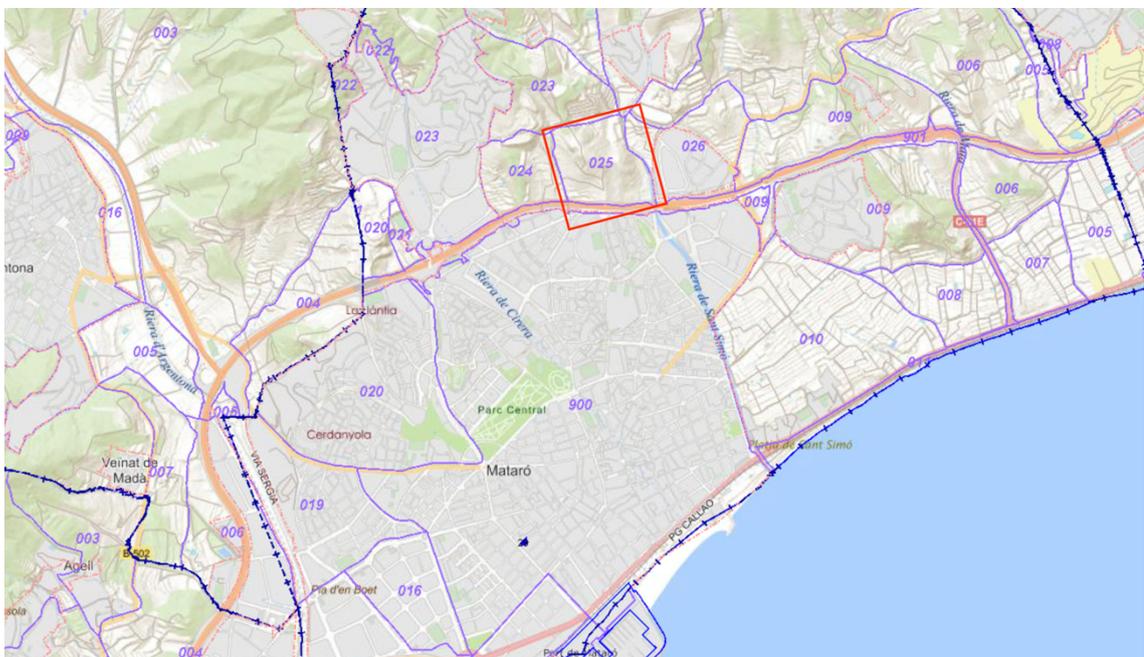


Figura 13. Localización del terreno del registro catastral.

1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

De las técnicas de eliminación de nitratos mencionadas anteriormente en la Figura 4, la escogida para el presente proyecto es la ósmosis inversa. Esta técnica de filtración impide el paso de bacterias, protozoos, virus, algas, materia orgánica disuelta, iones mono y divalentes.

Este mecanismo de separación funciona aplicando una fuerza a modo de presión al agua de alimentación haciéndola pasar por las membranas semipermeables. Esta presión requerida es mayor que si se habla de otros procesos de filtración como microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración. Y, sin embargo, a pesar de requerir mayor presión de trabajo el caudal de permeado por unidad de área que se obtiene es menor que en comparación con las otras tecnologías de filtración mencionadas tal y como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7. Presión de trabajo y densidad de flujo de permeado

PROCESO	MF	UF	NF	OI
Presión (bar)	0.5-2	0.5-5	5-15	5-80
J (L/m ² h)	>200	5-200	5-80	5-40

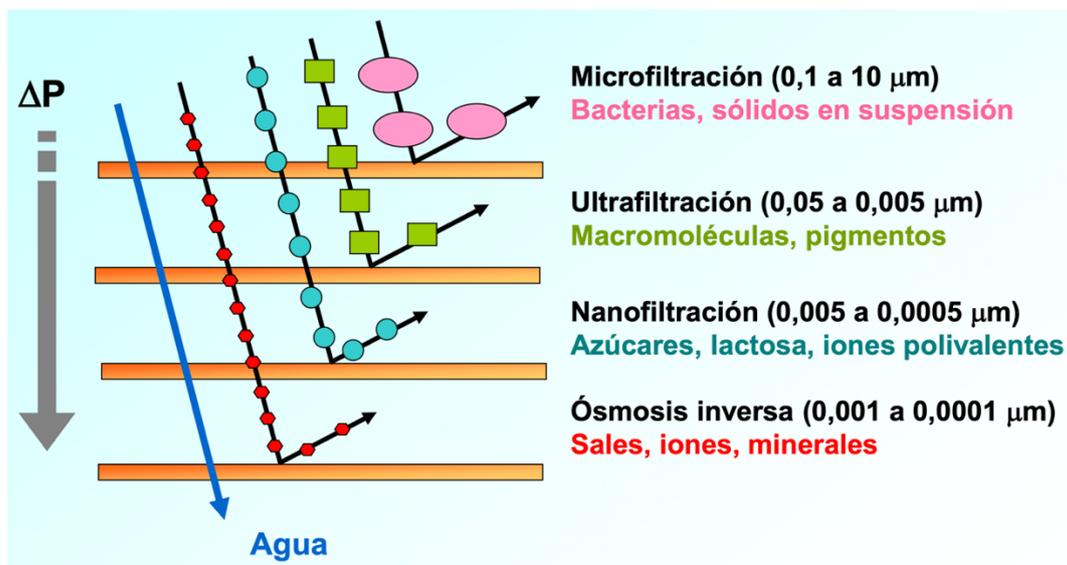


Figura 14. Operaciones de presión en la filtración con membranas

Las membranas más utilizadas en los procesos de ósmosis inversa son las de acetato de celulosa y las de poliamida aromática cuyas principales ventajas e inconvenientes se encuentran en la Figura 15. Y, las configuraciones modulares más utilizadas son la espiral y de fibras huecas, siendo el módulo en espiral el utilizado para el presente proyecto [12].

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Acetato de celulosa	Poliamida aromática
Ventajas: <ul style="list-style-type: none"> • Hidrófilas • Bajo coste • Resistentes al cloro • Superficie muy lisa 	Ventajas: <ul style="list-style-type: none"> • Amplio rango de temperatura • Elevado flujo de agua • Gran selectividad • Buen rechazo a compuestos orgánicos • Resistente a ácidos y bases fuertes
Desventajas: <ul style="list-style-type: none"> • Se hidrolizan a pH 4-7 • El Fe cataliza la oxidación en presencia de cloro • No deben secarse • Temperatura máxima de operación limitada • No retienen bien algunos compuestos orgánicos 	Desventajas: <ul style="list-style-type: none"> • Son más caras • Son sensibles al cloro • Tienen superficie más rugosa

Figura 15. Membranas utilizadas en el proceso de ósmosis inversa

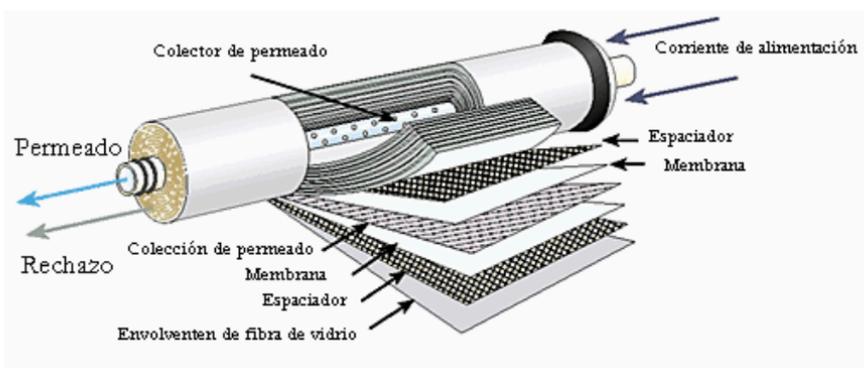


Figura 16. Módulo de ósmosis inversa en configuración espiral.

En la Figura 17 se muestra cómo a nivel industrial se lleva a cabo el proceso de ósmosis inversa.

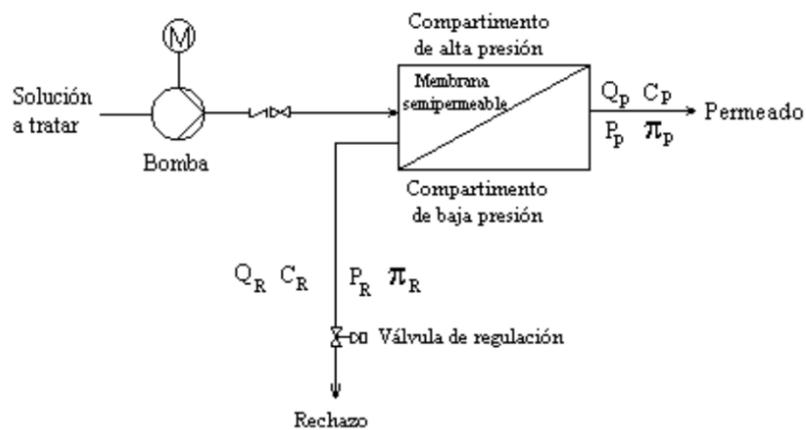


Figura 17. Esquema del proceso industrial de la ósmosis inversa (Fariñas, 1999).

- *Corriente de alimentación*. Es la corriente que llega a las membranas de ósmosis inversa. También es conocida como “aporte”, “solución de aporte”, “solución a tratar” o “alimentación”. La nomenclatura que se utiliza es la siguiente:
 - Caudal: Q_a
 - Concentración: C_a
 - Presión hidráulica: P_a
 - Presión osmótica: Π_a
- *Permeado*. Es la corriente que se obtiene después de haber atravesado la membrana semipermeable. Se le conoce como “producto”. La nomenclatura es:
 - Caudal: Q_p
 - Concentración: C_p
 - Presión hidráulica: P_p
 - Presión osmótica: Π_p
- *Rechazo*. Es la corriente que no puede atravesar la membrana semipermeable por tanto tiene mayor concentración que la de alimentación. Se le conoce como “concentrado” o “salmuera de rechazo”. La nomenclatura es:
 - Caudal: Q_R
 - Concentración: C_R
 - Presión hidráulica: P_R
 - Presión osmótica: Π_R
- *Coefficiente de permeabilidad (A)*. Es el volumen de agua (disolvente) que atraviesa la membrana semipermeable por unidad de volumen, de tiempo y de presión, a una temperatura y salinidad determinada, ambas constantes. Suele tener unidades de $m^3/día.bar$ o con unidades de flujo específico ($m^3/m^2.día.bar$).
- *Porcentaje de recuperación (Y)*. Es el cociente entre el caudal de permeado y el caudal de alimentación, expresado en tanto por ciento. También es conocido como “factor de conversión”

$$Y = \frac{\text{Caudal de permeado}}{\text{Caudal de alimentación}} \cdot 100 = \frac{Q_p}{Q_a} \cdot 100 \quad (1)$$

- *Porcentaje de rechazo (R)*. Es el cociente entre la diferencia de la concentración de alimentación y la concentración de permeado, y la concentración de alimentación, expresado en tanto por ciento.

$$R = \frac{C_a - C_p}{C_a} \cdot 100 \quad (2)$$

Siendo el rechazo en tanto por uno el siguiente:

$$r = \frac{C_a - C_p}{C_a} = 1 - \frac{C_p}{C_a} \quad (3)$$

$$C_p = (1 - r) \cdot C_a \quad (4)$$

1.1. CAPACIDAD DE LA PLANTA

La capacidad de la planta potabilizadora de agua para el tratamiento de agua contaminada con elevados niveles de nitratos se va a determinar teniendo en cuenta la población de la zona y la dotación en la localidad de Mataró. Entendiéndose como dotación el consumo de agua por habitante y día, incluyendo todos los servicios que realiza en un día medio anual contando, también, las pérdidas.

Tabla 8. Población y dotación de la localidad de Mataró [13]

	Población	Dotación
Mataró	126988 *	153 l/hab/día

* Fuente: Instituto Nacional de Estadística (2018)

Por tanto, el caudal de permeado de la planta potabilizadora de agua es el siguiente:

$$Caudal = 126988 \text{ hab} \cdot \frac{153 \text{ l}}{\text{hab día}} = 19429164 \frac{\text{l}}{\text{día}} = 19429.16 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \quad (5)$$

Tabla 9. Caudal de permeado de la planta potabilizadora de agua

	(m³/día)
Caudal de permeado	20000

Una vez conocido el caudal de agua libre de impurezas que debe salir de la planta potabilizadora de agua se va a determinar el caudal de alimentación de la planta teniendo en cuenta que para realizar el estudio económico se va a variar la conversión del sistema en la simulación del software *IMSDesign* entre 40, 45 y 50% con el fin de obtener la mejor alternativa con mayor rentabilidad económica.

$$Conversión \% = \frac{Q_{\text{permeado}}}{Q_{\text{alimentación}}} \cdot 100 \quad (6)$$

Tabla 10. Caudales de alimentación que se van a tener en cuenta en la simulación

Conversión	Caudal de alimentación (m³/ día)	Caudal de alimentación (m³/h)
40%	50000	2084
45%	44445	1852
50%	40000	1667

1.2. CAPTACIÓN DEL AGUA

El caudal de agua con el que se va a abastecer a la planta potabilizadora de agua es de origen subterráneo y por ello se necesita hacer un estudio geológico para determinar el número de pozos o sondeos necesarios para dicho abastecimiento. Con dicho estudio se pretende determinar el número y tipo de pozos, el diámetro, profundidad y ubicación.

Esta técnica de captación de aguas subterráneas se viene utilizando desde el siglo X a. C. hasta la actualidad. En la Biblia se menciona el pozo que Jacob (2000 a. C.) compró a Hanor ubicado cerca de Nablus (Cisjordania) el cual tiene un diámetro de 3 metros y una profundidad de 32 m.



Figura 18. Entrada al pozo de Jacob

Se van a considerar las siguientes soluciones como las idóneas para la captación de agua subterránea:

- Pozo. “Un pozo se define como un hueco cilíndrico excavado en el terreno, manualmente o con maquinaria, con diámetro y profundidad variable, que al atravesar un lecho permeable permite la afluencia del agua hacia el mismo mediante la disposición de material adecuado”. Los pozos presentan un diámetro entre 1.5 – 8 metros y cuyo principal inconveniente es el achique del agua y la seguridad del personal debido a los desprendimientos. La obtención del agua se realiza mediante bombas. La capacidad de captación de un pozo es la siguiente:

$$Q = \mu \cdot S \cdot \varphi \cdot V \quad (7)$$

Q = caudal afluyente al pozo (m^3/s).

μ = coeficiente por el que hay que multiplicar la sección geométrica de fluencia para obtener la sección real de entrada que ofrecen los poros del terreno. $\mu=0.03$ en terreno con materiales gruesos y finos; y, $\mu=0.27$ en terreno con materiales gruesos.

S = superficie geométrica de fluencia del pozo (m^2).

φ = coeficiente reductor de la velocidad de Thiem (normalmente=0.5).

V = velocidad de Thiem (m/s).

- Sondeos. *“Son perforaciones verticales realizadas por medios mecánicos con diámetros reducidos (40 – 80 cm). Presentan la ventaja de que pueden alcanzar grandes profundidades y tienen un coste normalmente inferior a cualquier otro tipo de captaciones. Los sondeos se revisten de tuberías metálicas con ranuras u orificios a lo largo de ellas para permitir el paso del agua”*.
- Pozos radiales. *“Estos pozos conocidos como pozos Ranney se diferencian de los ordinarios en el mecanismo de captación que consiste en unos tubos drenantes que con ayuda de gatos hidráulicos se introducen en el terreno en posición horizontal y siguiendo direcciones radiales. El diámetro mínimo es de 4 m, con paredes y solera de hormigón armado de espesor del orden de 0.5 m”*. Las principales ventajas son que permite, para la misma velocidad de captación, caudales muy superiores al de los pozos ordinarios, las fluctuaciones de nivel freático no afectan tanto como en los pozos convencionales, existe la posibilidad de regular el caudal del pozo incluso el cierre total para el mantenimiento de éste, la velocidad de entrada a los drenes es baja lo que evita el peligro de atoramiento aumentando la vida útil del dispositivo de captación y se evita el fenómeno de corrosión ya que los drenes permanecen continuamente sumergidos. Y, los principales inconvenientes son, que se precisa una elevada inversión inicial y asegurarse grandes volúmenes de agua que den rentabilidad y que el acuífero no tenga demasiada profundidad y tenga, también, recarga abundante de agua [14].

La capacidad de captación es la siguiente:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \cdot \frac{\sqrt{K}}{15} \quad (8)$$

Q = caudal (m^3/s).

r = radio del pozo (m).

h = altura del agua sobre la solera en régimen normal (m).

K = coeficiente de permeabilidad (m/s).

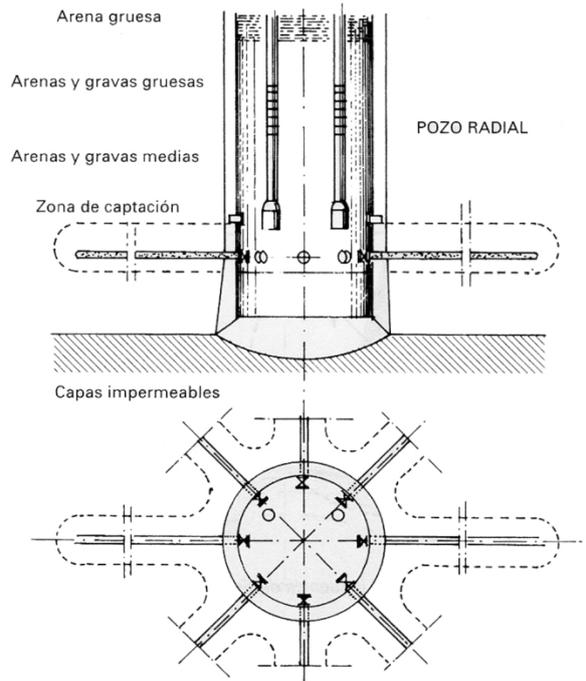


Figura 19. Pozo radial

Mediante la siguiente ecuación se determina la capacidad de producción de cada pozo:

$$Q_{\text{pozo}} = T \times A_d / 4.4 \quad (9)$$

Q_{pozo} = capacidad de producción de un pozo ($\text{m}^3/\text{día}$).

T = Transmisividad del acuífero ($\text{m}^2/\text{día}$).

A_d = Descenso del nivel del acuífero (m).

Y, una vez conocido este valor, junto con el caudal de alimentación, se determina el número de pozos mediante la siguiente expresión:

$$n_{\text{pozos}} = \frac{Q_a}{Q_{\text{pozo}}} \quad (10)$$

n_{pozos} = número de pozos.

Q_a = Caudal de alimentación de la potabilizadora de agua ($\text{m}^3/\text{día}$).

Q_{pozo} = Capacidad de producción de un pozo ($\text{m}^3/\text{día}$).

Los valores de transmisividad del acuífero quedan comprendidos entre 100 y 200 $\text{m}^2/\text{día}$ dependiendo de si se trata de granito alterado o arenas gruesas y limpias [15], por lo que se va a escoger un valor medio de 150 $\text{m}^2/\text{día}$ y dado que la profundidad es imprecisa se va a suponer 50 m ya que Mataró tiene una altura sobre el nivel del mar de 26 m y el acuífero se encuentra por debajo de éste.

$$Q_{\text{pozo}} = \frac{(150 \times 50)}{4.4} = 1704.55 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 0.0197 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (11)$$

Conociendo, también, los supuestos caudales de alimentación en función de las conversiones que se van a estudiar se calculan con la ecuación (10) los números de pozos para cada caso, considerando que la elección de los pozos va a ser los pozos verticales por ser más económicos:

Tabla 11. Número de pozos según el caudal de alimentación.

Caudal de alimentación (m ³ /día)	Número de pozos
50000	30
44445	27
40000	24

Conociendo la profundidad del pozo, supuesta anteriormente de 50 m, en la siguiente tabla se muestran las dimensiones recomendadas del diámetro de la tubería del pozo según la capacidad del pozo:

Tabla 12. Diámetro de pozo vertical según la capacidad del pozo. Fuente: Voutchkov, 2013.

Capacidad del pozo (m ³ /día)	Diámetro óptimo de la tubería del pozo (mm)
< 545	150
409 – 954	200
818 – 1910	250
1640 – 3820	300
2730 – 5450	350
4360 – 9810	400
6540 – 16400	400
10900 – 20700	500

Sabiendo la capacidad del pozo calculada con la ecuación (11) de 1704.55 m³/día, el diámetro óptimo de la tubería de PVC del pozo corresponde a 300 mm.

Por otro lado, es necesario escoger el tipo de tubería idóneo para la instalación desde el depósito pulmón de captación hasta el tanque de almacenamiento de la potabilizadora, para ello se va a calcular el diámetro interno de la tubería y conociendo éste se escogerá la tubería comercial que más se asemeje.

$$D_i = \sqrt{4 \cdot Q / \pi \cdot v} \quad (12)$$

D_i = diámetro interno de la tubería (m).

Q = caudal de agua en el interior de la tubería (m³/s).

v = velocidad del agua dentro de la tubería (m/s).

Supondremos, para este caso de cálculo, que la velocidad media del agua por el interior de una tubería corresponde a 2 m/s.

Tabla 13. Diámetro interno de la tubería según el caudal de alimentación.

Caudal de alimentación (m ³ /día)	Caudal de alimentación (m ³ /h)	Caudal de alimentación (m ³ /s)	Diámetro interno (mm)
50000	2084	0.5787	607
44445	1852	0.5144	573
40000	1667	0.4630	543

El material de las tuberías que van del depósito pulmón hasta el tanque de almacenamiento de la potabilizadora de agua será de acero inoxidable con el fin de evitar el fenómeno de corrosión. Por otra parte, el depósito de almacenamiento tendrá una capacidad de 50.000 m³/día con el fin de abastecer la potabilizadora de agua en caso de algún tipo de avería.

Para el bombeo del agua del pozo hasta el depósito pulmón se ha escogido una bomba de acoplamiento cerrado con motor NBG de la empresa GRUNDFOS tal y como se muestra en la siguiente imagen. La elección de esta bomba se debe a la capacidad de la misma, aunque en los tres posibles casos de conversión el caudal de alimentación supera el límite de la bomba, por esa razón se necesitarían dos bombas en cada uno de los casos.



NBG

Bombas de acoplamiento cerrado conforme a ISO 2858

NBG

Altura máx.	176.6 m
Caudal máx.	1576 m³/h
Temperatura líquido	-25 .. 140 °C
p máx.	25 bar

Figura 20. Bomba para el bombeo del pozo al depósito pulmón de la empresa GRUNDFOS.

1.3. PRETRATAMIENTO

El pretratamiento toma una relevancia importante en los procesos de tratamiento de aguas ya que condiciona la operatividad de la planta a la cual va a abastecer. No existe el proceso idóneo de pretratamiento del agua para posteriormente utilizar el sistema de membranas, sino que dicho pretratamiento está condicionado por el agua de alimentación. A continuación, en la siguiente tabla se presenta una guía de acondicionamiento del agua origen basada en la experiencia operativa de las plantas a gran escala.

Tabla 14. Guía de acondicionamiento del agua. (Weinrich et al., 2015; Edzward and Haarhoff, 2011; Voutchkov; 2010a; Vrouwenvelder, et al. 2000).

Tipo de ensuciamiento	Recomendaciones
Precloración	<ul style="list-style-type: none"> • La cloración de choque (1 a 3 veces por semana) o intermitente (1 a 4 veces al día) es mejor que la cloración continua, ya que la exposición prolongada al cloro desencadena la producción de polisacáridos extracelulares. • La precloración se ha vuelto menos común como resultado de las preocupaciones sobre la generación de compuestos orgánicos biodegradables a partir de la materia orgánica natural en la fuente agua.
Coagulación	<ul style="list-style-type: none"> • Se debe evitar el uso de coagulantes con base de aluminio, ya que tiene una carga fuerte opuesta a la de la superficie de la membrana de ósmosis inversa que causa el ensuciamiento irreversible de dichas membranas. • El pretratamiento de membrana puede eliminar partículas tan finas como 0.2 μm (membranas de microfiltración) o 0.02 μm (membranas de ultrafiltración) sin coagulación. Sin embargo, la coagulación puede ser necesaria cuando el agua a tratar contiene niveles muy altos de materia orgánica natural. • Si las floraciones de algas aumentan en el alimento a 2 mg/L o más, entonces las algas y especialmente la materia orgánica disuelta asociada con las algas crean una demanda de coagulante que debe satisfacerse agregando suficiente Fe en la coagulación para formar primero un complejo con los compuestos de materia orgánica natural y luego precipitar el hidróxido férrico en condiciones de floculación de barrido.
Floculación	<ul style="list-style-type: none"> • Se recomienda la ayuda de floculación para el agua de mar con concentraciones moderadas a altas de algas (contenido de 40.000 células/l o más). • La sobredosis de polímero puede causar ensuciamiento orgánico en las membranas y debe evitarse. • Sólo se deben aplicar polímeros no ionicoraniónicos porque la mayoría de los elementos de las membranas de ósmosis inversa tienen una carga negativa. El uso de polímero catiónico debe considerarse solo después de discutirlo con los fabricantes de membranas, ya que es probable que se forme una película de polímero en la superficie de la membrana.
Inhibidor de incrustaciones	<ul style="list-style-type: none"> • El ácido sulfúrico generalmente se prefiere al ácido clorhídrico debido a razones de seguridad y protección. Sin embargo, se puede usar ácido clorhídrico si el sulfato introducido en la corriente de

	<p>agua de alimentación mediante la adición de ácido sulfúrico afecta significativamente al diseño y el coste del sistema.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se ha demostrado que los antiincrustantes y los ácidos minerales aumentan el potencial de bioincrustación. El antiincrustante a base de fosfato podría aumentar los niveles de carbono orgánico asimilable a casi 100 µg/l. • El hexametáfosfato de sodio puede servir como un nutriente bacteriano y debido a que contiene fosfatos podría resultar en la descarga de salmuera con alto contenido de fósforo la proliferación de algas en el área de descarga. • Las formulaciones antiincrustantes patentadas recientes se han alejado de los productos químicos a base de fosfato y se clasifican como polifosfonato, policarboxilato o poliácido, pero aún puede contener impurezas que aumentan el carbono orgánico asimilable y el potencial de bioincrustación.
Agentes reductores	<ul style="list-style-type: none"> • El metabisulfito de sodio residual que no se consume para la reducción de cloro reacciona con el oxígeno natural de la corriente de concentrado y puede representar un impacto negativo (hipoxia) en el ambiente marino que recibe este concentrado. • El bisulfito de sodio podría servir como alimento para algunas de las bacterias bioincrustantes que crecen en las membranas de ósmosis inversa y exacerbar el ensuciamiento de la membrana al aumentar los niveles de carbono orgánico asimilable en el agua.

Siguiendo la siguiente figura de guía de selección a seguir en los procesos de pretratamiento de agua donde se indica que para agua de pozo (subsuface), con concentración de hierro inferior a 0.1 mg/l o manganeso inferior a 0.05 mg/l y con un carbono orgánico total (TOC) inferior a la unidad se debe aplicar un pretratamiento de filtros de cartucho.

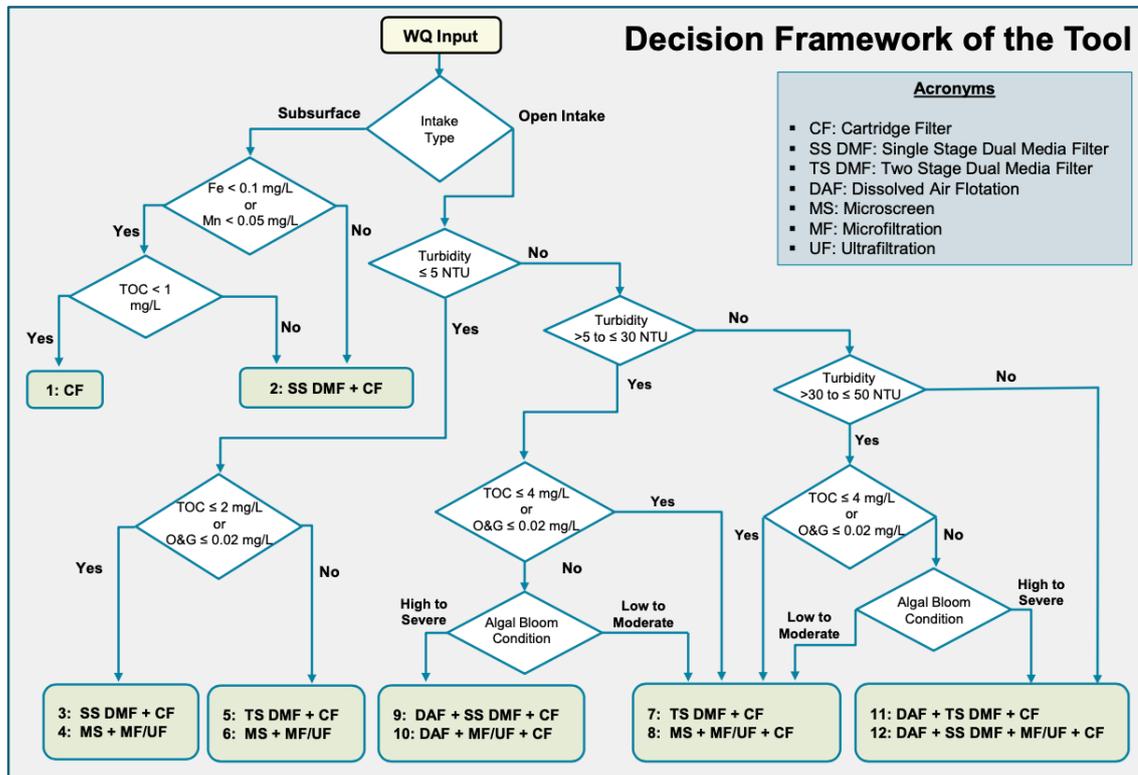


Figura 21. Guía de selección del proceso de pretratamiento para plantas de ósmosis inversa.

Teniendo en cuenta la guía anterior y según se indica en el capítulo “11. Guidelines for Pretreatment System Selection” (Voutchkov, 2017) y, concretamente, en el apartado “11.2.1 Plants With Subsurface Intake” se recomienda las siguientes tres opciones:

- Filtros de cartucho únicamente.
- Filtros de cartucho y filtros de arena dual a presión de una sola etapa con tasa de carga entre 16 – 25 m³/m² h (7 – 10 gpm/ft²).
- Filtros de ultrafiltración/microfiltración (UF/MF) impulsados por presión con un flujo de diseño de 100 – 120 Lmh (60 – 70 gfd).

Atendiendo a las dos fuentes consultadas se ha escogido la utilización de filtros de cartucho y filtros de arena dual a presión de una sola etapa. Se descarta la opción de usar filtros de ultrafiltración/microfiltración porque es una opción más cara y se suele utilizar cuando existe contaminación por hierro y manganeso en su forma reducida; y, se descarta la opción de usar únicamente filtros de cartucho ya que se desconoce el nivel de ensuciamiento exacto del agua de alimentación a la planta potabilizadora de agua.

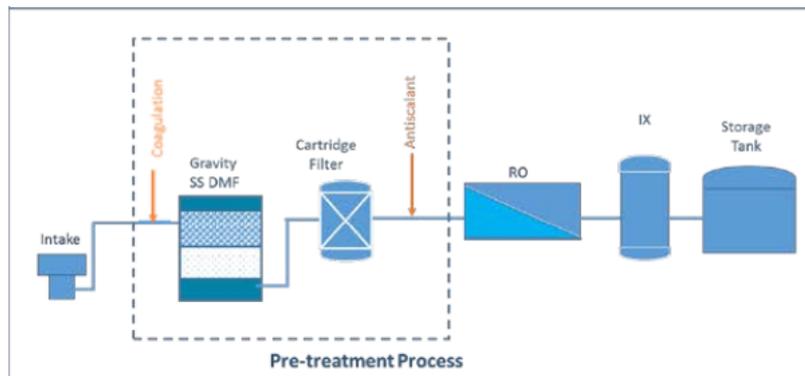


Figura 22. Diagrama de flujo del pretratamiento de la planta.

Para calcular el número de filtros de arena Morrill y Wallace (1934) sugieren la siguiente expresión:

$$N = 0.044 \cdot \sqrt{Q_{\text{alimentación}}} \quad (13)$$

Por tanto, según los distintos caudales supuestos dependiendo de la conversión utilizada se muestra a continuación el número de filtros en cada caso:

Tabla 15. Número de filtros de arena

Conversión	Caudal de alimentación (m ³ /h)	Número de filtros
40%	2084	2 + 1
45%	1852	1.89 ≈ 2 + 1
50%	1667	1.79 ≈ 2 + 1

En los tres casos es necesario mínimo dos filtros de arena para el pretratamiento, sin embargo, se instalará un filtro de arena adicional en caso de que alguno de los dos falle o se esté sometiendo al proceso de lavado o mantenimiento, y en ese caso la planta pueda funcionar con normalidad.

Los filtros escogidos son de la empresa HIDROMETÁLICA, concretamente el modelo FA-1200 tomando como referencia 23 m³/m² h de velocidad de filtración, siendo el diámetro del filtro de 1200 mm, la altura de 1990 mm y el diámetro de salida de 2 pulgadas.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

MODELO	Φ filtro mm	H filtro mm	Φ salida Pul-DN	Caudal (m ³ /h) en función de la velocidad de filtración (m ³ /h/m ²)								
				6	8	12	15	20	25	30	50	90
FA-900	900	1868	1½"-32	4	5	8	10	13	16	19	32	57
FA-1000	1000	1906	1½"-40	5	6	9	12	16	20	24	39	71
FA-1100	1100	1944	1½"-40	6	8	11	14	19	24	29	48	86
FA-1200	1200	1990	2"-50	7	9	14	17	23	28	34	57	102
FA-1300	1300	2030	2"-50	8	11	16	20	27	33	40	66	119
FA-1400	1400	2066	2½"-65	9	12	18	23	31	38	46	77	139

Figura 23. Características técnicas de los filtros de arena de HIDROMETÁLICA.



Figura 24. Filtro de arena de HIDROMETÁLICA.

Después de los filtros de arena y antes de los bastidores de ósmosis inversa se lleva a cabo la filtración mediante cartuchos, cuya utilización garantiza un nivel de filtración mínimo de 5 micras, el requerido por los fabricantes de membranas de ósmosis inversa.

Para esta fase del pretratamiento se ha escogido el filtro de la empresa SHELCO, el modelo 52FOS4 de acero inoxidable con las siguientes características:

Tabla 16. Características del filtro de cartuchos.

Modelo	Cantidad (longitud) de cartuchos	Capacidad de flujo nominal (gpm)	Entrada/salida (tamaño de la tubería)	Cartucho de diámetro máximo	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	F (cm)
52FOS4	52 (40'')	1040	6''	25/8''	192.9	82.2	35.6	14.1	75.9	66.0

Tabla 17. Características técnicas del filtro de cartuchos.

Máxima presión de operación (bar)	10.3
Máxima temperatura de operación (°C)	149
Tipo de cartucho	Estilo DOE (diámetro máximo de 25/8'')

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

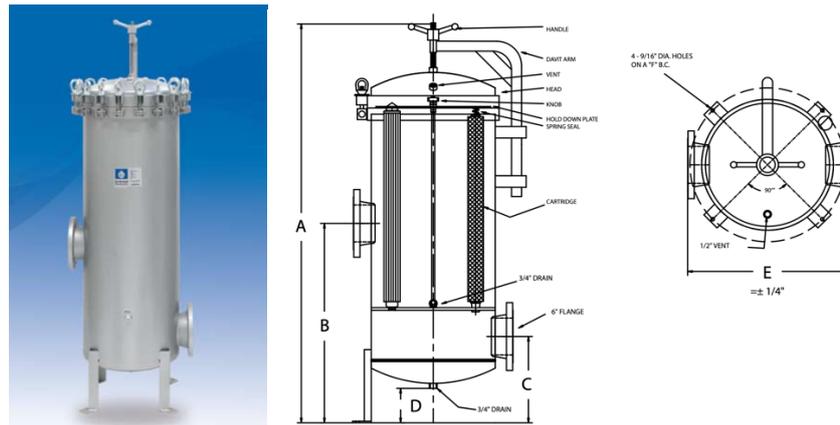


Figura 25. Filtro de cartuchos de SHELCO.

A continuación, para cada caudal supuesto de alimentación en función de la conversión se va a determinar el número de filtros de cartuchos necesarios en cada caso, sabiendo que un filtro tiene una capacidad de filtración de 1040 gpm, o lo que es lo mismo 283.68 m³/h.

$$N_{\text{filtros}} = \frac{Q_{\text{alimentación}}}{Q_{\text{filtro}}} \quad (14)$$

Tabla 18. Número de filtros de cartuchos.

Conversión	Caudal de alimentación (m ³ /h)	Número de filtros
40%	2084	7.34 ≈ 8 + 1
45%	1852	6.53 ≈ 7 + 1
50%	1667	5.88 ≈ 6 + 1

Como se observa en la tabla anterior, se ha calculado los filtros necesarios para cada caso y se ha añadido un filtro de reserva.

Finalmente, se va a seleccionar la bomba hidráulica mediante el software *Product Center* de GRUNDFOS, tal y como se muestra en la siguiente figura.

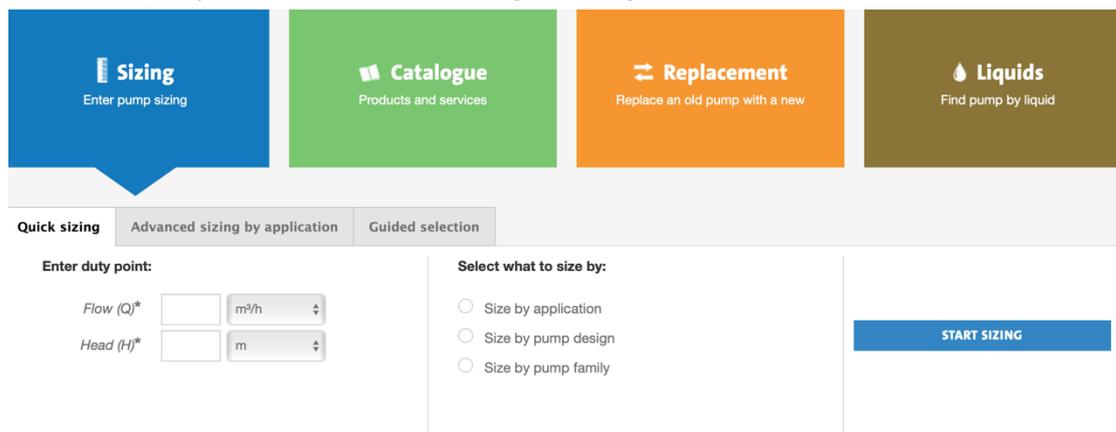


Figura 26. Buscador de productos y soluciones de GRUNDFOS.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Quick sizing **Advanced sizing by application** **Guided selection**

Enter duty point:

Flow (Q)* 1667 m³/h

Head (H)* 100 m

Number of pumps 1

Mains Voltage 1 x 230 or 3 x 400 V

Select what to size by:

Size by application

Size by pump design

Size by pump family

LS

Select application: Pressure boosting

Variable speed: No

Impeller size: Duty point specific (exact)

START SIZING

Figura 27. Especificaciones para la búsqueda de la bomba en GRUNDFOS.

Tras introducir las especificaciones en el software de búsqueda éste nos da los posibles resultados. La opción escogida para la planta potabilizadora de agua es la bomba LS 500-300-680F, 4F2DSBAQE2 560/4, cuyas especificaciones se muestran en las siguientes figuras.

Sizing result

Type	LS 500-300-680F
Quantity * Motor	1 * 560 kW
Flow	1668 m ³ /h
H total	100 m
Power P1	544.3 kW
Power P2 required in the duty point	522.5 kW
Eta pump	86.8 %
Eta motor	96.0 %
Eta pump+motor	83.3 % =Eta pump * Eta motor
Eta total	83.3 %
Flow total	1854405 m ³ /year
Energy consumption	1080800 kWh/Year
Price	On request
Life cycle cost	2320492 EUR /10Years

Load profile	1	2	3	4	5
Flow	100	75	55	35	12 %
Head	100	113	120	123	123 %
P1	544.2	468.1	398.1	326.2	260.6 kW
Eta total	83.3	82.1	74.9	59.8	25.7 %
Time	149	299	448	896	1493 h/a
Energy consumption	81261	139800	178330	292260	389100 kWh/Year
Quantity	1	1	1	1	1

Figura 28. Especificaciones técnicas de la bomba LS 500-300-680F de GRUNDFOS.

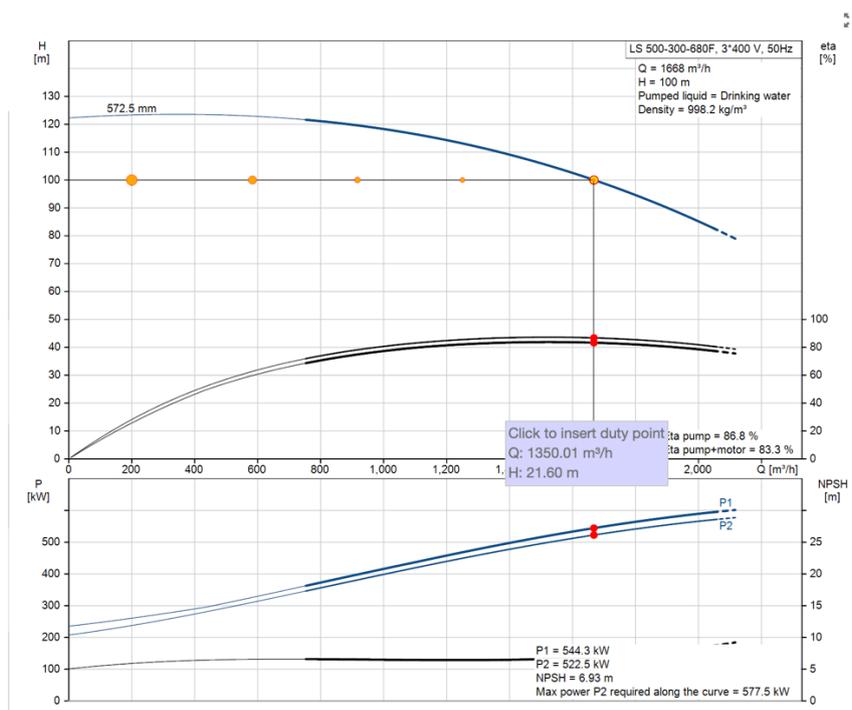


Figura 29. Curva de rendimiento de la bomba LS 500-300-680F.

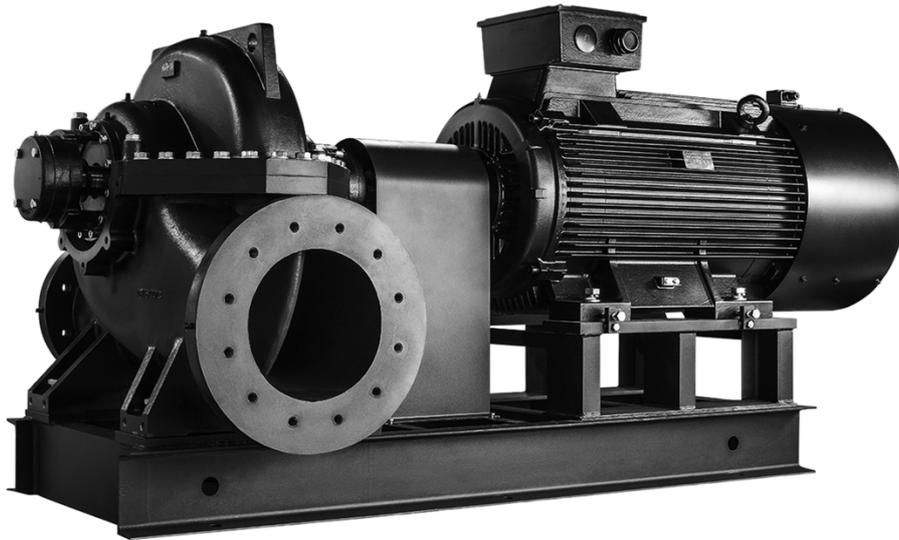


Figura 30. Bomba LS 500-300-680F de GRUNDFOS.

1.4. DISEÑO DE LA CONFIGURACIÓN MODULAR

En el presente apartado se va a determinar el funcionamiento de las membranas de ósmosis inversa comparando diferentes estrategias en el software *IMSDesign* con el fin de obtener la opción más rentable para la planta potabilizadora de agua. Estas estrategias están basadas en realizar un análisis de la conversión y de las membranas, para ello se ha simulado diferentes escenarios comparando conversiones y diferentes membranas. Las conversiones que se van a simular son de 40%, 45% y 50%; y, en cada una de esas conversiones se comparan dos membranas diferentes, la *CPA5 MAX* y la *CPA6 MAX*.

En primer lugar, se va a definir el agua de alimentación en el software de simulación. Definir el agua de alimentación consiste en introducir parámetros del agua que son conocidos como temperatura, pH, tipo de agua, y las concentraciones de aniones y cationes. Es importante definir bien el tipo de agua ya que dependiendo de esta elección el software considera qué tipo de membranas son idóneas para el tratamiento. Por tanto, para el presente estudio se ha escogido agua tipo salobre de pozo.

Cationes		Aniones			
	mg/l	mg/l CaCO3			
Calcio	34,70	86,75	HCO3	151,00	123,77
Mg	65,29	267,59	SO4	75,60	78,75
Na	232,70	505,87	Cl	277,10	390,83
K	12,40	15,86	F	0,00	0,00
NH4	0,00	0,00	NO3	350,00	282,26
Ba	0,000	0,00	PO4	0,00	0,00
Sr	0,000	0,00	SiO2	0,00	
			B	0,00	
Total, meq/l		17,52	Total, meq/l		17,52

Saturaciones	
TDS Calculado	1199 mg/l
Presión osmótica	0,7 bar
Ca3(PO4)2 SI	0,00
CCPP	-13,26 mg/l
Langelier SI	-0,6
CaSO4	0,7 %
BaSO4	0,0 %
SrSO4	0,0 %
CaF2	0,0 %
Silica	0,0 %

Figura 31. Definición del agua de alimentación en la pestaña "Análisis" del software *IMSDesign*.

Una vez definida el agua de alimentación se procede a caracterizar el proceso de ósmosis inversa en la pestaña "Diseño", la cual está compuesta por tres partes: trenes, sistema y especificaciones del sistema.

- Trenes. En esta sección se introducen datos de conversión, pH, flujo de permeado por tren, edad de la membrana, factor de ensuciamiento, disminución de flujo por año (%) e incremento de paso de sales por año (%).
- Sistema. Aquí se especifica el número de trenes.
- Especificaciones del sistema. Aquí se especifica el tipo de elemento (membrana), los tubos de presión y el número de tubos de presión.

Una vez introducidos los datos característicos de cada escenario de simulación el software calcula el flujo promedio (lmh), el caudal de alimentación (m³/h), el caudal de rechazo (m³/h), la tasa de dosificación de producto químico (mg/l) y el factor de ensuciamiento.

A continuación, se muestra las tablas con las especificaciones en cada uno de los escenarios simulados.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Tabla 19. Escenario de diseño de la membrana CPA5 MAX.

Membrana CPA5 MAX	
pH	7.37
Número de trenes	2
Edad de la membrana (años)	0
Disminución de flujo por año (%)	5,00
Factor de ensuciamiento	1
Incremento de paso de sales por año (%)	7.00
Flujo de permeado por tren (m ³ /d)	10000
Caudal de alimentación – Conversión 40% - (m ³ /d)	25000.0
Caudal de alimentación – Conversión 45% - (m ³ /d)	22222.2
Caudal de alimentación – Conversión 50% - (m ³ /d)	20000.0

Tabla 20. Escenario de diseño de la membrana CPA6 MAX

Membrana CPA6 MAX	
pH	7.37
Número de trenes	2
Edad de la membrana (años)	0
Disminución de flujo por año (%)	5.00
Factor de ensuciamiento	1
Incremento de paso de sales por año (%)	7.00
Flujo de permeado por tren (m ³ /d)	10000
Caudal de alimentación – Conversión 40% - (m ³ /d)	25000.0
Caudal de alimentación – Conversión 45% - (m ³ /d)	22222.2
Caudal de alimentación – Conversión 50% - (m ³ /d)	20000.0

A continuación, se muestra una figura de la pestaña diseño, concretamente se trata de la pestaña diseño para la membrana CPA5 MAX con conversión del 40% y una figura del diagrama flotante del proceso.

Figura 32. Pestaña diseño de la membrana CPA% MAX con conversión del 40%.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

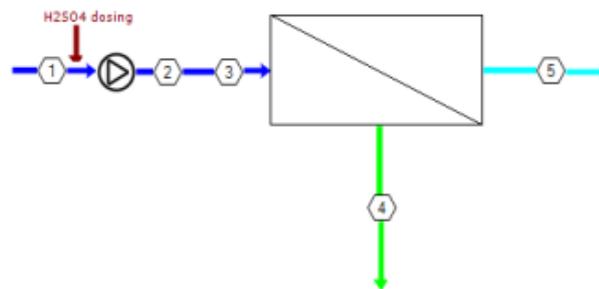


Figura 33. Diagrama flotante del proceso de ósmosis inversa.

Una vez establecidos los criterios de simulación el software muestra los resultados obtenidos en la sección “Resultados de cálculo”. En esta pestaña el software muestra los datos de las concentraciones de rechazo y permeado, siendo las concentraciones de permeado las que tomen más importancia ya que dependiendo de ellas se tendrá que diseñar el postratamiento idóneo. Los resultados de las simulaciones son los siguientes:

- Membrana CPA5 MAX.

Proyecto: Simulación 1 Calculado por: Victoria Maciá Temperatura: 25.0 °C Tipo de agua: Salobre Pozo Sin ensuciamiento Fecha: 10/08/2021

Trenes

Paso 1		Paso 1	
pH alimentación	7,37	Producto químico	H2SO4
Conversión %	40,00	Concentración de la solución, %	100
Flujo/tren de permeado, m3/d	10000,0	Tasa de dosificación de productos químic mg/l	0,000
Flujo promedio lmh	26,9	Edad membrana años	0,0
Caudal de alimentación, m3/d	25000,0	Disminución Fluj por año	5,00
Caudal de rechazo m3/d	15000,0	Factor de ensuciamiento	1,00
		Incremento de paso de sales/año, %	7,0

Sistema

Caudal total de permeado/Planta m3/d: 20000,00

Número de trenes: 2

Resultados de Cálculo

(Flows are per vessel)

Arreglo	Tubo de presión	Alimentación (bar)	Conc (bar)	Alimentación (m3/h)	Conc (m3/h)	Flujo (lmh)	Flujo máximo (l/h)	Beta máximo
1-1	63	10,9	7,7	16,53	9,92	27	32,4	1,10

Concentración de permeado

Calcio	0,010	K	0,203	Sr	0,000	Cl	0,992	P04	0,000	C02	9,074
Mg	0,018	NH4	0,000	HC03	1,166	NO3	6,480	SI02	0,000	C03	0,000
Na	3,355	Ba	0,000	S04	0,068	F	0,000	B	0,000	pH	5,3
NH3	0,000									TDS	12,29 mg/l

Saturaciones del rechazo y parámetros

CaSO4, %	1	SrSO4, %	0	Presión osmótica	1,3 bar	pH	7,6
BaSO4, %	0	SI02, %	0	CCPP	7,48 mg/l	TDS	2039,9 mg/l
Ca3(P04)2 SI	0,00	CaF2, %	0	Langelier	0,06		

Cálculos ERD

Intercambiador de presión Turbo

Fuga: 1,00 %

Mezcla volumétrica: 6,00 %

H.P. diferencial: 0,50 bar

Bomba booster: 3,74 bar

Advertencia:

• Se requiere antincrustante

Figura 34. Resultado simulación membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Trenes

Paso1		Paso1	
pH alimentación	7,37	Producto químico	H2SO4
Conversión	45,00	Concentración de la solución, %	100
Flujo/tren de permeado,	10000,0	Tasa de dosificación de productos quimic	0,000
Flujo promedio	27,0	Edad membrana	0,0
Caudal de alimentación,	22222,2	Disminución Fluj por año	5,00
Caudal de rechazo	12222,2	Factor de ensuciamiento	1,00
		Incremento de paso de sales/año, %	7,0

Sistema

Caudal total de permeado/Planta m3/d

Número de trenes

Resultados de Cálculo

(Flows are per vessel)

Arreglo	Tubo de presión	Alimentación (bar)	Conc (bar)	Alimentación (m3/h)	Conc (m3/h)	Flujo (lmh)	Flujo máximo	Beta máximo
1-1	63	10,6	8	14,7	8,09	27	31,7	1,10

Concentración de permeado

Calcio	0,010	K	0,215	Sr	0,000	Cl	1,052	P04	0,000	CO2	9,074
Mg	0,019	NH4	0,000	HC03	1,236	NO3	6,869	SiO2	0,000	CO3	0,000
Na	3,557	Ba	0,000	SO4	0,072	F	0,000	B	0,000	pH	5,3
NH3	0,000								TDS	13,03 mg/l	

Saturaciones del rechazo y parámetros

CaSO4, %	1	SrSO4, %	0	Presión osmótica	1,4 bar	pH	7,6
BaSO4, %	0	SiO2, %	0	CCPP	13,64 mg/l	TDS	2229,8 mg/l
Ca3(PO4)2	0,00	CaF2, %	0	Langelier	0,17		

Cálculos ERD

Intercambiador de presión Turbo

Fuga %

Mezcla volumétrica %

H.P. diferencial bar

Bomba booster bar

Advertencia:

- Se requiere antincrustante

Figura 35. Resultado simulación membrana CPA5 MAX con conversión 45%.

Proyecto: Simulación 1

Calculado por: Victoria Maciá

Temperatura: 25,0 °C

Tipo de agua: Salobre Pozo Sin ensuciamiento

Fecha: 10/08/2021

Trenes

Paso1		Paso1	
pH alimentación	7,37	Producto químico	H2SO4
Conversión	50,00	Concentración de la solución, %	100
Flujo/tren de permeado,	10000,0	Tasa de dosificación de productos quimic	0,000
Flujo promedio	26,9	Edad membrana	0,0
Caudal de alimentación,	20000,0	Disminución Fluj por año	5,00
Caudal de rechazo	10000,0	Factor de ensuciamiento	1,00
		Incremento de paso de sales/año, %	7,0

Sistema

Caudal total de permeado/Planta m3/d

Número de trenes

Resultados de Cálculo

(Flows are per vessel)

Arreglo	Tubo de presión	Alimentación (bar)	Conc (bar)	Alimentación (m3/h)	Conc (m3/h)	Flujo (lmh)	Flujo máximo	Beta máximo
1-1	63	10,4	8,3	13,23	6,62	27	31,2	1,13

Concentración de permeado

Calcio	0,011	K	0,230	Sr	0,000	Cl	1,124	P04	0,000	CO2	9,074
Mg	0,020	NH4	0,000	HC03	1,320	NO3	7,326	SiO2	0,000	CO3	0,000
Na	3,795	Ba	0,000	SO4	0,077	F	0,000	B	0,000	pH	5,4
NH3	0,000								TDS	13,90 mg/l	

Saturaciones del rechazo y parámetros

CaSO4, %	2	SrSO4, %	0	Presión osmótica	1,5 bar	pH	7,7
BaSO4, %	0	SiO2, %	0	CCPP	21,66 mg/l	TDS	2458,8 mg/l
Ca3(PO4)2	0,00	CaF2, %	0	Langelier	0,29		

Cálculos ERD

Intercambiador de presión Turbo

Fuga %

Mezcla volumétrica %

H.P. diferencial bar

Bomba booster bar

Advertencia:

- Se requiere antincrustante

Figura 36. Resultado simulación membrana CPA5 MAX con conversión 50%.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

- Membrana CPA6 MAX.

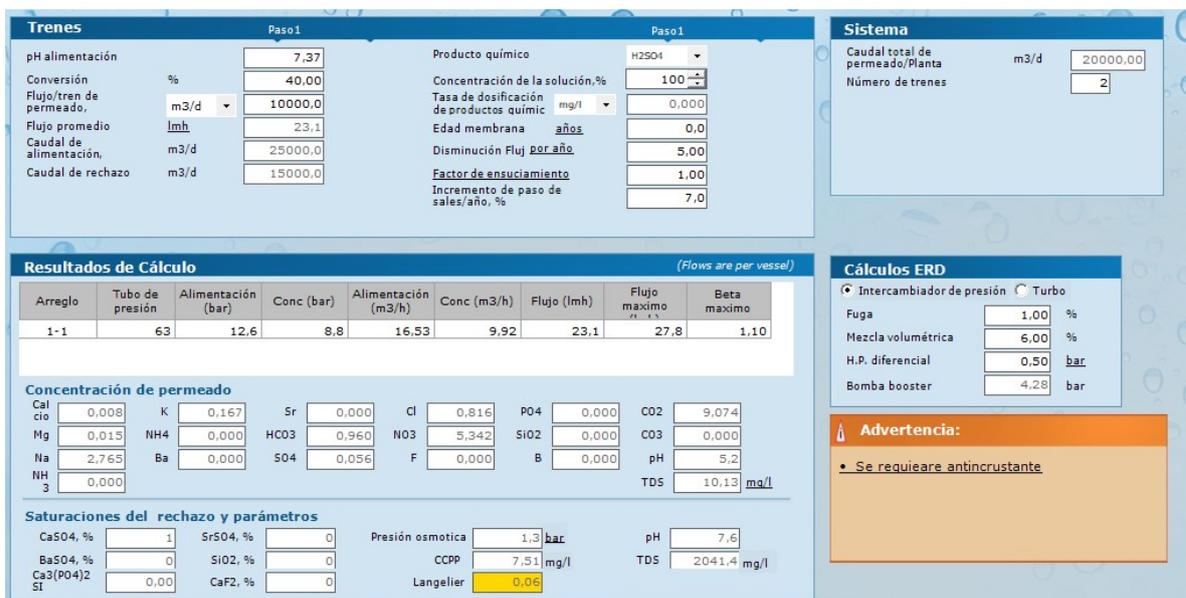


Figura 37. Resultado simulación membrana CPA6 MAX con conversión 40%.

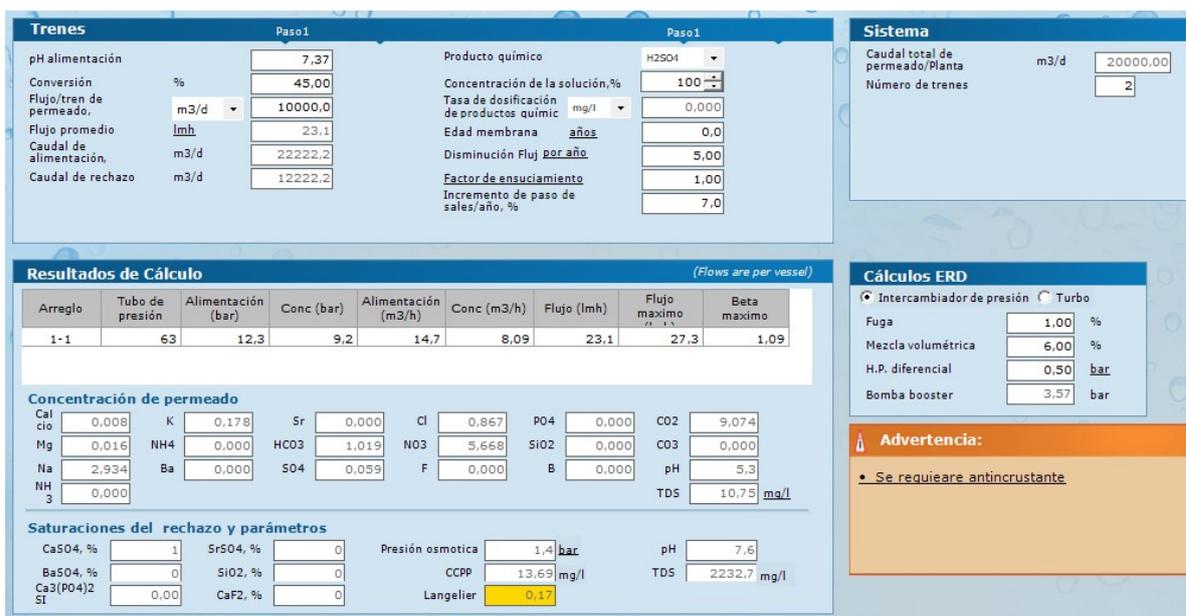


Figura 38. Resultado simulación membrana CPA6 MAX con conversión 45%.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Trenes

Paso 1

pH alimentación: 7,37

Producto químico: H2SO4

Conversión: 50,00 %

Concentración de la solución, %: 100

Flujo/tren de permeado, m3/d: 10000,0

Tasa de dosificación de productos químico, mg/l: 0,000

Flujo promedio, lmh: 23,1

Edad membrana, años: 0,0

Caudal de alimentación, m3/d: 20000,0

Disminución Fluj por año: 5,00

Caudal de rechazo, m3/d: 10000,0

Factor de ensuciamiento: 1,00

Incremento de paso de sales/año, %: 7,0

Sistema

Caudal total de permeado/Planta, m3/d: 20000,00

Número de trenes: 2

Resultados de Cálculo (Flows are per vessel)

Arreglo	Tubo de presión	Alimentación (bar)	Conc (bar)	Alimentación (m3/h)	Conc (m3/h)	Flujo (lmh)	Flujo máximo (l/h)	Beta máximo
1-1	63	12,1	9,5	13,23	6,62	23,1	26,8	1,11

Concentración de permeado

Ca: 0,009; K: 0,189; Sr: 0,000; Cl: 0,926; PO4: 0,000; CO2: 9,074

Mg: 0,017; NH4: 0,000; HCO3: 1,088; NO3: 6,048; SiO2: 0,000; CO3: 0,000

Na: 3,132; Ba: 0,000; SO4: 0,063; F: 0,000; B: 0,000; pH: 5,3

NH3: 0,000; TDS: 11,47 mg/l

Saturaciones del rechazo y parámetros

CaSO4, %: 2; SrSO4, %: 0; Presión osmótica: 1,5 bar; pH: 7,7

BaSO4, %: 0; SiO2, %: 0; CCPP: 21,70 mg/l; TDS: 2461,3 mg/l

Ca3(PO4)2: 0,00; CaF2, %: 0; Langelier: 0,29

Cálculos ERD

Intercambiador de presión: Turbo

Fuga: 1,00 %

Mezcla volumétrica: 6,00 %

H.P. diferencial: 0,50 bar

Bomba booster: 3,04 bar

Advertencia:

- Se requiere antiincrustante

Figura 39. Resultado simulación membrana CPA6 MAX con conversión 50%.

El software IMSDesign tras mostrar los resultados de las simulaciones lanza la advertencia de que se requiere antiincrustante. Esto es debido a que en la corriente de permeado existe una saturación del Índice de Langelier:

- Si el índice es negativo: indica que el agua es corrosiva y tiende a eliminar el carbonato cálcico (CaCO_3) presente que protegen tuberías y equipos.
- Si el índice es 0: el agua está perfectamente equilibrada.
- Si el índice es positivo: indica que el agua es incrustante.

Según RD 140/2003 de aguas de consumo humano, el Índice de Langelier debe estar comprendido entre -0.5 y 0.5.

El tipo de antiincrustante se determinará en el apartado **Limpieza de las membranas**.

En los procesos de ósmosis inversa la parte más importante de los costes de funcionamiento corresponden al bombeo de alta presión y con el fin de abaratar esos costes energéticos se emplean procesos de recuperación de energía a través del rechazo de alta presión. Estos sistemas aprovechan la energía de la corriente de rechazo generada en el proceso de ósmosis inversa para devolverla al sistema, al agua de entrada a las membranas, y reducir la energía a suministrar por las bombas para que alcancen las grandes presiones que requieren los procesos de ósmosis inversa. Es por ello que en el software *IMSDesign* tiene la opción la utilizar esta tecnología con tal de disminuir los costes energéticos, concretamente se ha escogido la opción de cámaras de intercambio de presión (CIP). Estos dispositivos intercambian presión entre dos corrientes de agua y se puede distinguir entre dos tipos:

- Cámaras de desplazamiento. Estos dispositivos intercambian la energía potencial en forma de presión que tiene la corriente de rechazo a la corriente de alimentación en unos cilindros mediante pistones.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

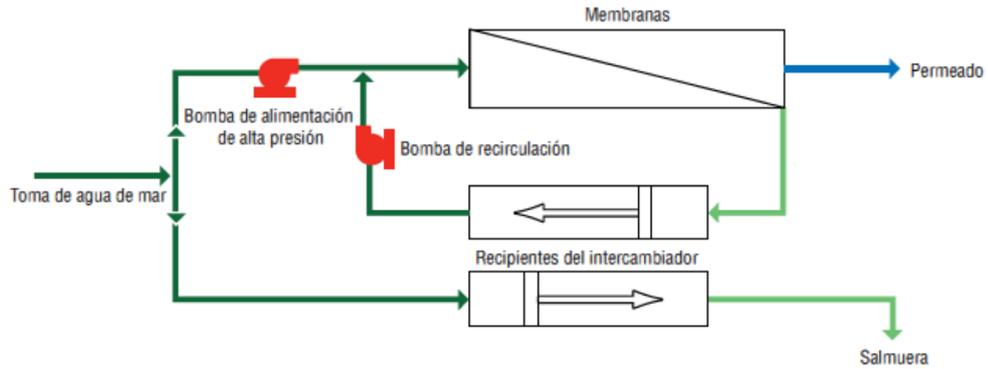


Figura 40. Diagrama de flujo típico de una cámara de intercambio de presión de desplazamiento.

- Cámaras de rotación. De este tipo de dispositivos destacan los ERI (denominación derivada de la empresa americana que los fabrica, Energy-Recovery Inc.) que a diferencia de las cámaras de desplazamiento no existen elementos móviles (válvulas) sino que la propia cámara en sí es la que se mueve. La principal ventaja es que tienen una eficiencia de hasta un 98% y pueden reducir los costes energéticos de los sistemas de ósmosis inversa hasta un 60%.

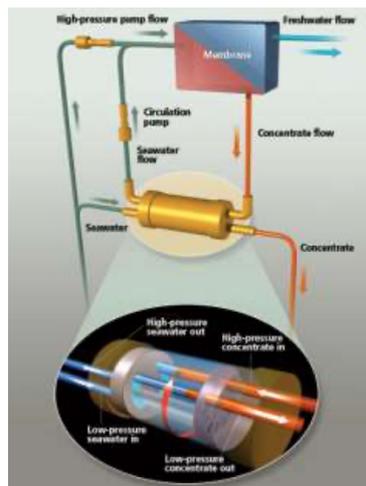


Figura 41. Funcionamiento de las cámaras de intercambio de presión de rotación.

En la actualidad el modelo ERI-PX es de los que actualmente está más evolucionado ya que proporciona un elevado rendimiento, transfiriendo una presión directa entre fluidos del 95% [15].

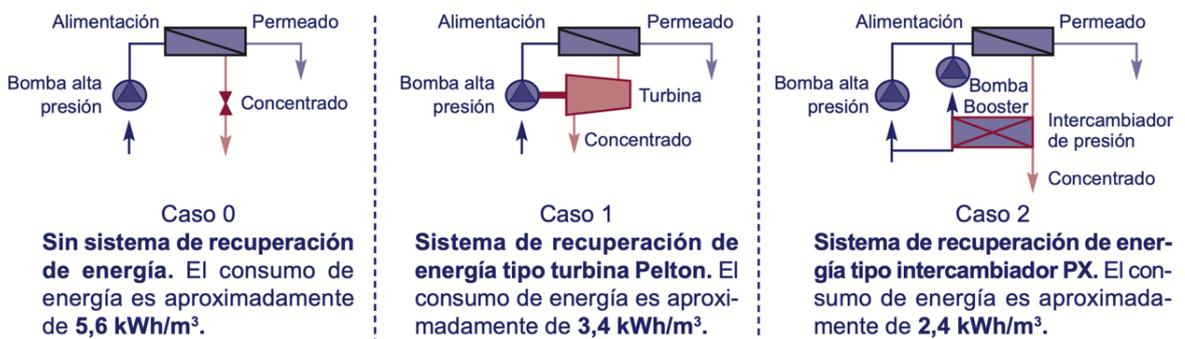


Figura 42. Comparación energética sin sistema de recuperación de energía, turbina Peltron e intercambiador PX.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Esta tecnología se suele emplear en aguas más salinas ya que se requiere mayor presión y, por tanto, se aprovecha más la presión de la corriente de rechazo. En este caso, el agua a tratar es un agua de pozo y no es realmente necesario la aplicación de dicha tecnología. Aunque se va a estudiar la aplicación del recuperador de energía en los dos mejores casos con mayor rentabilidad económica con el fin de averiguar si es o no una opción viable en los casos de agua poco salobre. Es decir, se va a comparar la opción más rentable económicamente para cada membrana la utilización o no del recuperador de energía. Dicho estudio se encuentra en el **Documento 2. Presupuesto**.

1.5. LIMPIEZA

1.5.1. LIMPIEZA DE LAS MEMBRANAS

Para la limpieza de las membranas se van a seguir las recomendaciones pautadas por el boletín de servicio técnico de *Hydranautics* “*Ensuciamiento y procedimientos de limpieza para elementos de membrana de ósmosis inversa/nanofiltración de poliamida compuesta*”.

Este ensuciamiento suele estar provocado por estar en contacto con materiales suspendidos o poco solubles que pueden estar presentes en el agua de alimentación. A continuación, se nombran los ejemplos más comunes de incrustaciones:

- Escamas de carbonato cálcico.
- Escamas de sulfato de calcio, bario o estroncio.
- Óxidos de metales (hierro, manganeso, cobre, níquel, aluminio, etc.)
- Escamas de sílice polimerizadas.
- Depósitos coloidales inorgánicos.
- Depósitos coloidales inorgánicos/orgánicos mixtos.
- Material orgánico NOM (Materia Orgánica Natural).
- Material orgánico artificial (por ejemplo, antiincrustantes/dispersantes, polielectrolitos catiónicos).
- Biológico (bioslimes bacteriana, algas, moho u hongos).

La naturaleza y la rapidez del ensuciamiento depende de factores como la naturaleza del agua de alimentación y de la tasa de recuperación del sistema. Dicho ensuciamiento suele ser progresivo y si no se aborda éste de forma temprana puede afectar al rendimiento de las membranas de ósmosis inversa. La limpieza de las membranas suele llevarse a cabo cuando hay evidencias de ensuciamiento, antes de un apagado prolongado o como una cuestión de mantenimiento de rutina programado. Los elementos se deben mantener limpios para evitar un ensuciamiento excesivo de las incrustaciones nombradas anteriormente. Estas incrustaciones no deben superar los valores típicos que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 21. Desviaciones “típicas” provocadas por las incrustaciones.

	Desviaciones típicas
Disminución del flujo de permeado	10%
Calidad de permeado normalizada	10%
Caída de presión normalizada	15%

Los parámetros operativos que deben mantenerse constantes son el flujo de permeado, la contrapresión de permeado, la recuperación, la temperatura y el TDS de alimentación. Si estos parámetros fluctúan *Hydranautics* recomienda encarecidamente que se normalicen los datos para determinar si se están produciendo incrustaciones o si el sistema de ósmosis inversa está funcionando con normalidad en función del cambio en un parámetro de funcionamiento crítico.

La frecuencia de limpieza de ósmosis inversa provocado por incrustaciones es una vez cada 3 a 12 meses. Es importante limpiar las membranas cuando sólo estén ligeramente sucias,

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

el fuerte ensuciamiento puede afectar a la eficiencia del producto químico de limpieza al impedir la penetración de éste en el ensuciamiento y a eliminar dicho ensuciamiento de los elementos. Si el rendimiento de la membrana cae entre un 30% y un 50% podría ser imposible restaurar el rendimiento inicial.

En la siguiente tabla se resume los efectos causados por incrustaciones comunes en el rendimiento.

Tabla 22. Matriz de resolución de problemas de ósmosis inversa causados por incrustaciones.

(La caída de presión se define como la presión de alimentación menos la presión del concentrado)

Causa Posible	Posible Ubicación	Caída de Presión	Presión de alimentación	Paso de las sales
Incrustaciones de óxido de metal (por ejemplo, Fe, Mn, Cu, Ni, Zn)	Elemento principal de la primera etapa	Incremento rápido	Incremento rápido	Incremento rápido
Ensuciamiento coloidal (complejos orgánicos y/o inorgánicos)	Elemento principal de la primera etapa	Incremento gradual	Incremento gradual	Pequeño incremento
Escalado de minerales (por ejemplo, Ca, Mg, Ba, Sr)	Última etapa. Elemento de la cola	Incremento moderado	Pequeño incremento	Marcado incremento
Sílice polimerizada	Última etapa. Elemento de la cola	Tiende a aumentar	Aumenta	Tiende a aumentar
Incrustaciones biológicas	Cualquier etapa, generalmente elementos principales	Marcado incremento	Incremento moderado	Tiende a aumentar
Ensuciamiento orgánico (NOM disuelto)	Todas las etapas	Incremento gradual	Aumenta	Disminuye
Incrustaciones antiincrustantes	Segunda etapa más severa	Tiende a aumentar	Aumenta	Tiende a aumentar
Daño oxidante (por ejemplo, Cl ₂ , ozono, KMnO ₄)	Primera etapa más severa	Tiende a disminuir	Disminuye	Aumenta
Daño por hidrólisis (pH fuera de rango)	Todas las etapas	Tiende a disminuir	Disminuye	Aumenta
Daño por abrasión (finos de carbono, etc.)	Primera etapa más severa	Tiende a disminuir	Disminuye	Aumenta
Fugas de juntas teóricas (en intercambiadores o adaptadores)	Aleatorio (normalmente en el adaptador de alimentación)	Tiende a disminuir	Tiende a disminuir	Aumenta

Fugas en la línea de pegamento (debido a la contrapresión de permeado en servicio o en espera)	Primera etapa más severa	Tiende a disminuir	Tiende a disminuir	Aumenta
Fugas en la línea de pegamento (debido a la válvula de permeado cerrada durante la limpieza o el lavado)	Todos los elementos de un escenario	Aumenta (basado en incrustaciones anteriores y delta P alto)	Aumenta (basado en incrustaciones anteriores y delta P alto)	Aumenta

Según las indicaciones de *Hydranautics* y tras la advertencia del software *IMSDesign* se ha seleccionado una solución limpiadora de pH bajo de ácido cítrico al 2.0% (en peso) ($C_4H_8O_7$). Esta solución de limpieza es útil para eliminar incrustaciones inorgánicas (por ejemplo, carbonato de calcio, sulfato de estroncio) y óxidos/hidróxidos metálicos (por ejemplo, hierro, manganeso, níquel, cobre y zinc) y material coloidal de base orgánica. La cantidad que suministrar es 7.7 kg de ácido cítrico a 40° y no requiere un ajuste del pH [16].

1.5.2. LIMPIEZA DE LOS FILTROS

Según el Manual Técnico del Agua (Degremont) para el lavado de los filtros a presión se va a utilizar el método de lavado sin expansión, simultáneamente con agua y aire. Para ello se inyecta aire a la vez que agua, siendo el caudal del agua superior a 5 m³/h, separando las impurezas del material filtrante y acumulándose en el agua. Una vez el agua acumula las impurezas se procede al método de aclarado mediante tres posibles métodos:

- Manteniendo constante el caudal de agua de retorno hasta que el agua evacuada sea clara. Cuanto mayor es el caudal del agua menor será el tiempo empleado para la operación (caudal de agua superior a 12 m³/h por m²).
- Aumentar el caudal de agua durante el aclarado hasta al menos 15 m³/h por m².
- Barrer la superficie del filtro por una corriente horizontal de agua bruta o agua decantada combinada con el retorno de agua.
- Vaciar el agua fangosa que está encima del material filtrante y barrer la superficie del filtro por una corriente horizontal de agua bruta o agua decantada combinada con el retorno de agua.

1.6. GESTIÓN DE CONCENTRADOS

Para la gestión de las corrientes de rechazo de la planta potabilizadora de agua primero se tiene que separar los sólidos en suspensión que pueda haber, para ellos se va a emplear un decantador para separar aquellas impurezas de las membranas de ósmosis inversa como de los filtros de cartucho y de arena. Para ellos se va a emplear un decantador por gravedad de la misma empresa que los filtros de arena, *HIDROMETÁLICA*.

La corriente de rechazo de los bastidores de ósmosis inversa llega al decantador y se introduce a éste desde la parte inferior a través de una columna central ascendiendo por ésta hasta desembocar en un tanque metálico cilíndrico el cual rompe la velocidad del agua eliminando las turbulencias. El agua cae al fondo del decantador donde se van depositando los fangos por gravedad, mientras que el agua asciende hasta desaguar por un canal periférico.

El fondo del decantador tiene forma cónica con el fin de que los fangos que se van depositando sobre el fondo se desplacen hacia el centro y poder gestionarlos más fácilmente. Por otra parte, la materia sólida que queda flotante es conducida mediante un deflector radial de arrastre de grasas hasta el perímetro exterior del puente donde una raqueta lo introduce en la tolva de recogida de flotantes tal y como se muestra en la siguiente figura.

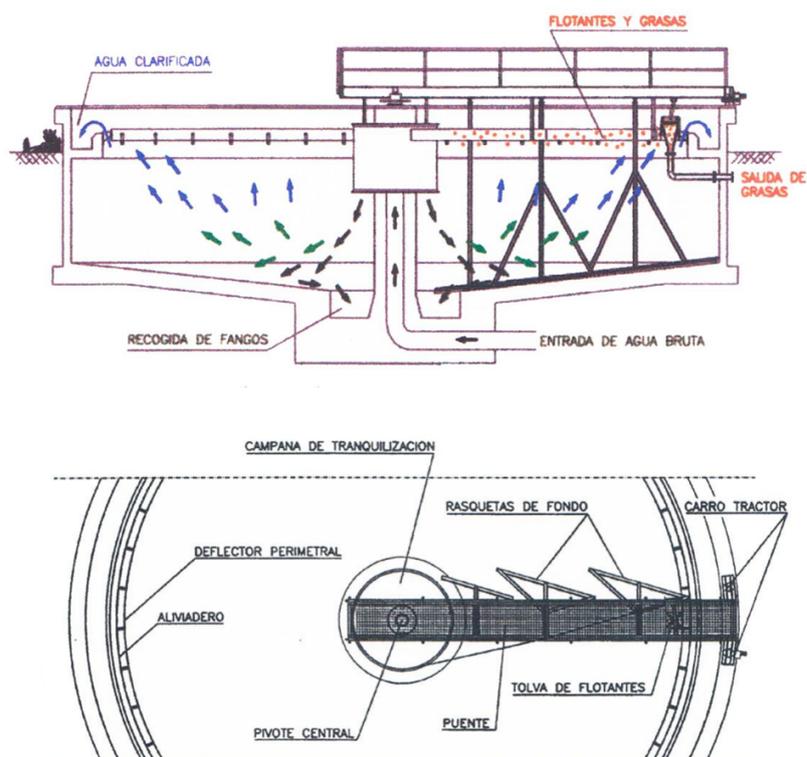


Figura 43. Decantador por gravedad de la empresa *HIDROMETÁLICA*.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

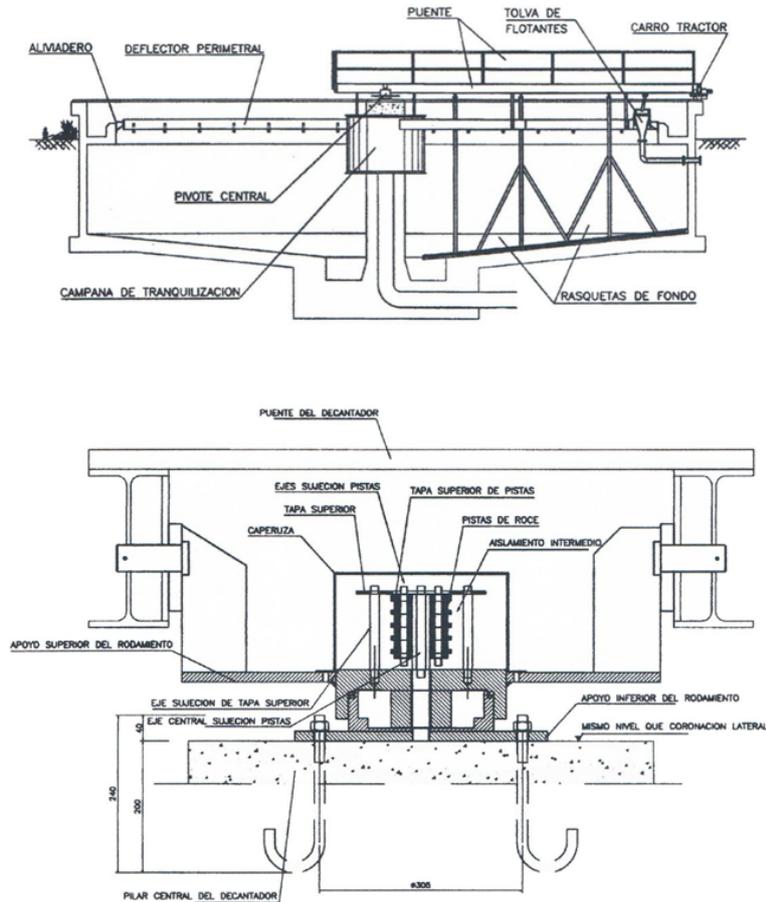


Figura 44. Especificaciones del decantador por gravedad de la empresa HIDROMETÁLICA.

El agua clarificada que sale del decantador será enviada, por la red de alcantarillado de la ciudad de Mataró, a la planta EDAR de dicha población. Mientras que los fangos extraídos por la parte inferior del decantador se envían a un gestor de residuos para su valorización energética con tal de minimizar el impacto negativo de la planta potabilizadora de agua. Para ello la potabilizadora de agua se debe registrar en la *Agència de Residus de Catalunya*, *Programa de gestió de residus industrials (PROGRIC)*, y ésta gestionará el proceso de contactar con el gestor más cercano para la recogida de los fangos [18].



Figura 45. Esquema general del modelo de gestión de la Agència de Residus de Catalunya.

1.7. REMINERALIZACIÓN DEL AGUA PRODUCTO

El objetivo de la remineralización es obtener un agua con índice de Langelier próximo a cero y que se mantenga constante en contacto con la atmósfera, con un consumo mínimo de CO_2 con el fin de minimizar los costes de explotación.

Tabla 23. Características recomendadas para el agua remineralizada.

Parámetro	Rango
pH	8.2 ± 0.1
Alk, mg CaCO_3/L	56 ± 3
HCO_3^- , mg/L	68 ± 3
Ca^{2+} , mg/L	21 ± 2
CO_2 , mg/L	0.7 ± 0.1
LSI (SM2330)	± 0.15

Dicho criterio de evaluación de las aguas remineralizadas recomienda el uso del Standard Method 2330 (SM2330), el cual es el método adoptado internacionalmente, pero deberá constatar, también, el RD 140/2003.

En la siguiente figura se muestra el principio de la remineralización de las aguas desaladas, desde el punto de vista del equilibrio $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-}$ y para un agua desalada normal: pH= 6.0; 1.5 mg HCO_3^-/L ; 3 mg CO_2/L ; 200 mg STD/L y $T=20^\circ\text{C}$. Dicho diagrama indica como en el proceso de remineralización se aumenta el contenido en bicarbonatos hasta los 75 mg/L consumiendo el CO_2 hasta dejarlo en 0,7 mg/L. Por tanto, consigue una estabilidad con la atmósfera y, con el aumento de bicarbonatos se consigue también un incremento en el pH.

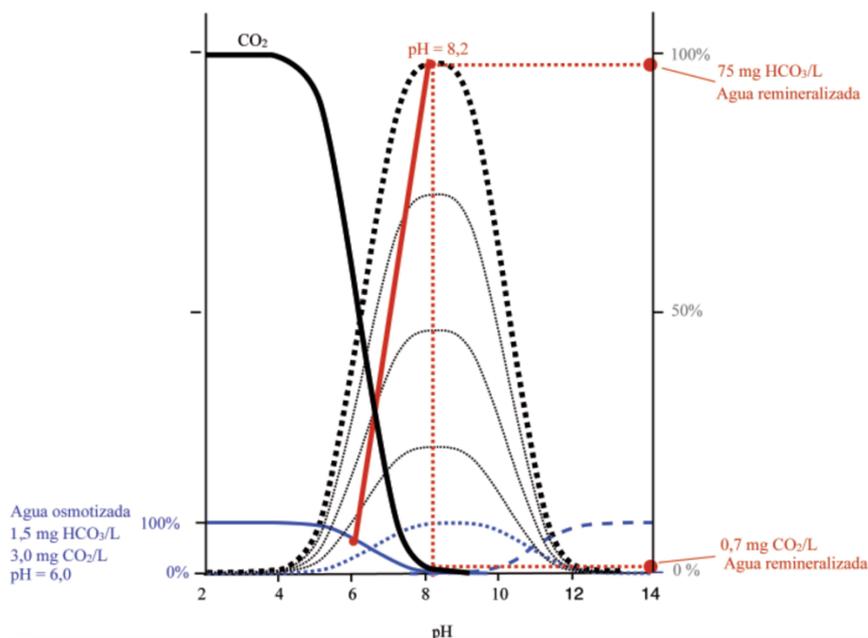


Figura 46. Aspectos del equilibrio $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^-$ en el proceso de remineralización del agua osmotizada.

A continuación, en la siguiente tabla, cinco posibles técnicas para la remineralización del agua osmotizada, siendo las dos primeras técnicas las más utilizadas en la práctica.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Tabla 24. Técnicas para la remineralización.

	Proceso de remineralización	Reacción del proceso	Consumo de químicos por incremento de 1 mmol (61 mg) de HCO ₃ ⁻	Incremento del contenido en cationes y aniones por 1 mmol (61 mg) de HCO ₃ ⁻
1	Carbonato cálcico + Dióxido de carbono	$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3^-)$	50.1 mg CaCO ₃ 100% 22 mg CO ₂	20 mg Ca ²⁺
2	Hidróxido Cálculo + Dióxido de carbono	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{CO}_2 \Leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3^-)$	37.1 mg Ca(OH) ₂ 100% 44 mg CO ₂ /L	20 mg Ca ²⁺
3	Dolomita + Dióxido de carbono	$\text{MgO} \cdot \text{CaCO}_3 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} + 4(\text{HCO}_3^-)$	35.1 mg MgOCaCO ₃ 100% 33 mg CO ₂	6.1 mg Mg ²⁺ 10 mg Ca ²⁺
4	Carbonato cálcico + Ácido Sulfúrico	$2\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \Leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3^-) + \text{Ca}(\text{SO}_4)$	100.1 mg CaCO ₃ 100% 49 mg H ₂ SO ₄ 100%	40.1 mg Ca ²⁺ 48 mg SO ₄ ²⁻
5	Cloruro Cálculo + Bicarbonato sódico	$\text{CaCl}_2 + 2\text{NaHCO}_3 \Leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3^-) + 2\text{NaCl}$	55.5 mg CaCl ₂ (100%) 84 mg NaHCO ₃ (100%)	23 mg Na ⁺ 20 mg Ca ²⁺ 35.5 mg Cl ⁻

Dado que los dos primeros procesos son los que se suelen llevar a cabo más a menudo en las plantas potabilizadoras de agua se va a escoger, concretamente, el segundo proceso porque los resultados obtenidos con las simulaciones mediante el software *IMSDesign* han dado valores muy altos de CO₂ y con el fin de disminuir este valor al recomendado para aguas remineralizadas, Tabla 23, ya que mediante esa reacción se consume el doble de dióxido de carbono que mediante el primer proceso. A continuación, se van a mostrar los datos obtenidos del agua producto tras la simulación del paso por el sistema de ósmosis inversa.

- Membrana CPA5 MAX

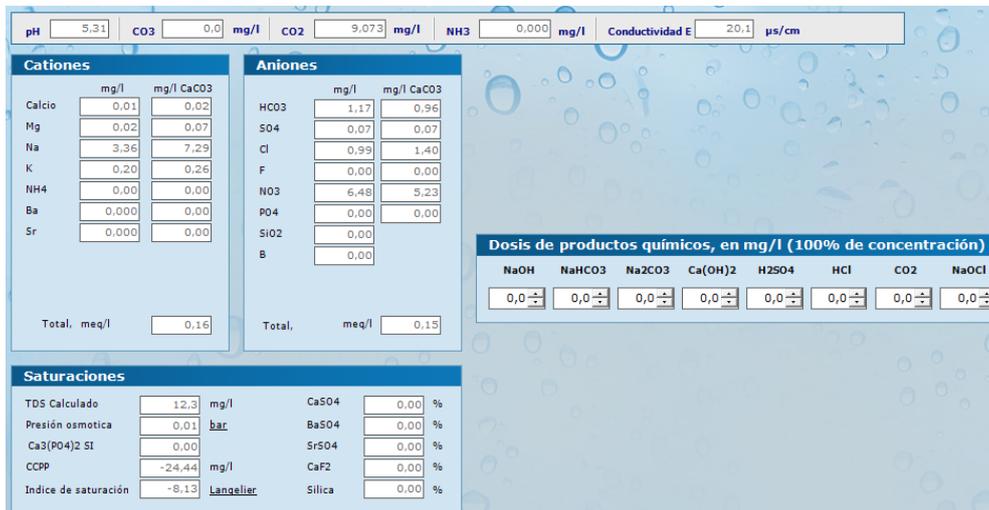


Figura 47. Resultados de la simulación de la membrana CPA5 MAX con conversión 40%.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

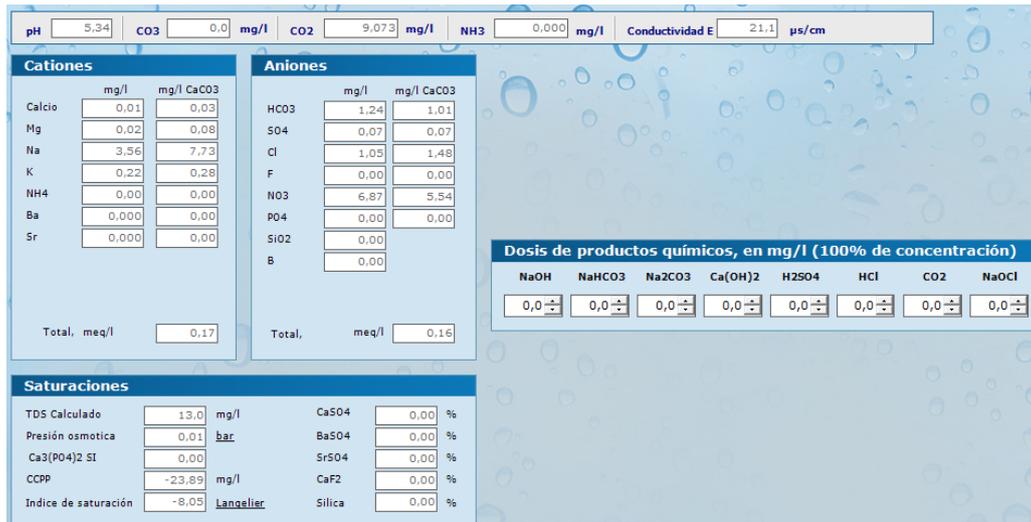


Figura 48. Resultados de la simulación de la membrana CPA5 MAX con conversión 45%.

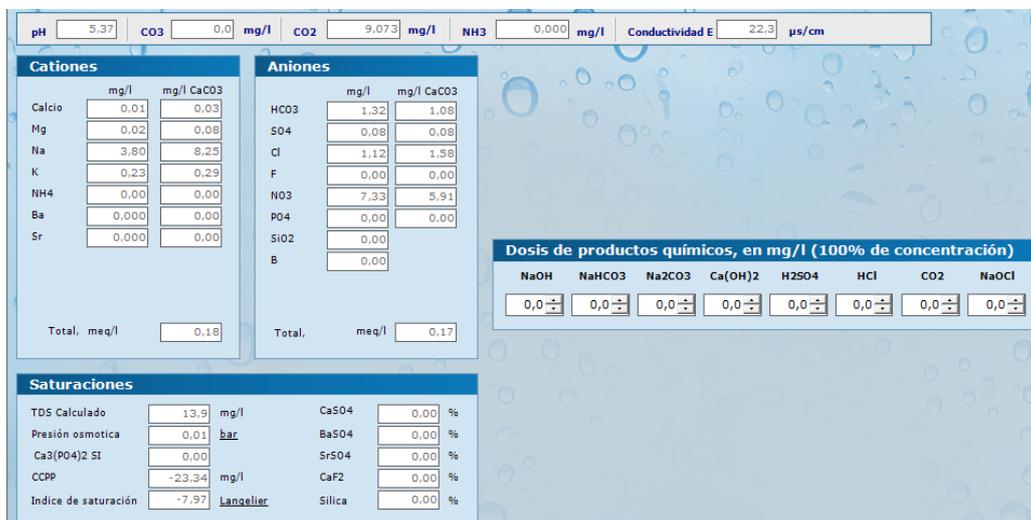


Figura 49. Resultados de la simulación de la membrana CPA5 MAX con conversión 50%.

- Membrana CPA6 MAX

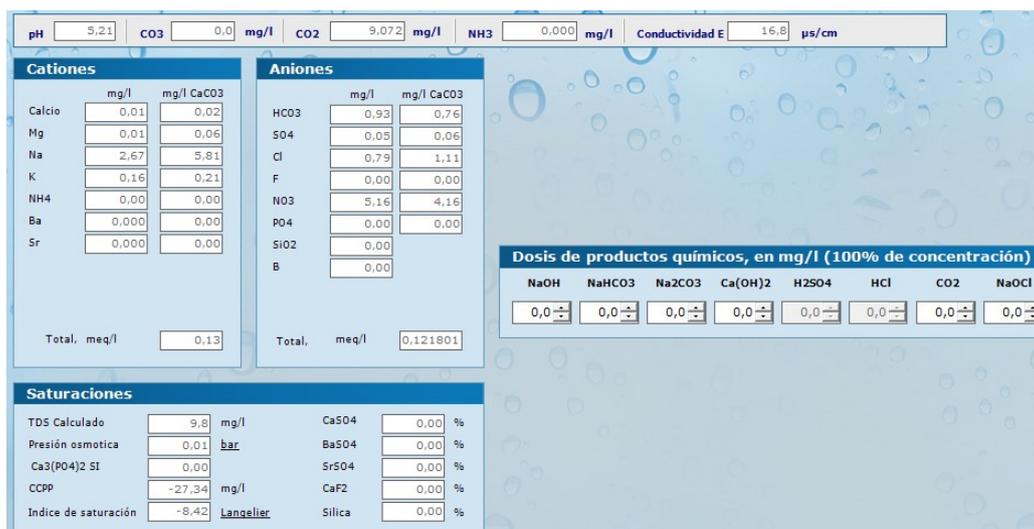


Figura 50. Resultados de la simulación de la membrana CPA6 MAX con conversión 40%.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

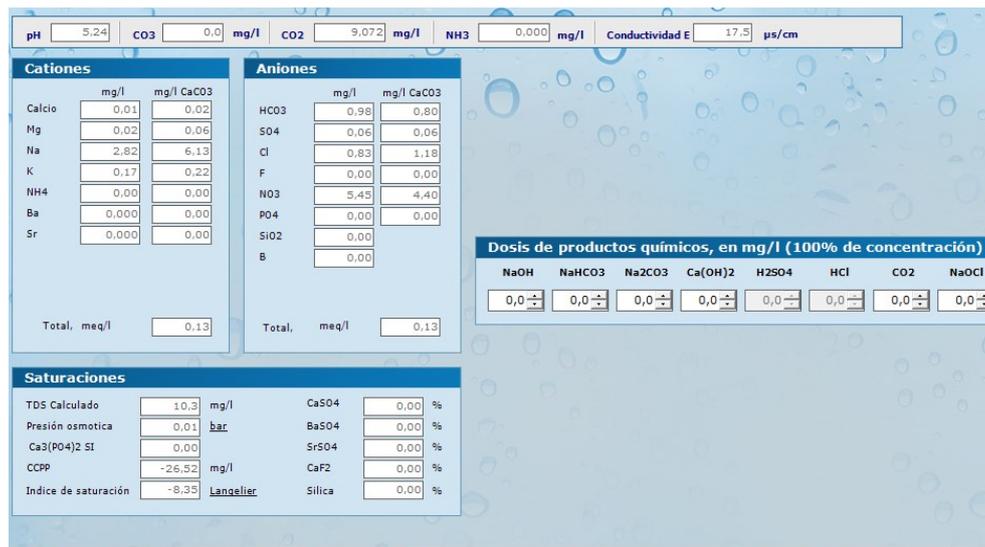


Figura 51. Resultados de la simulación de la membrana CPA6 MAX con conversión 45%.

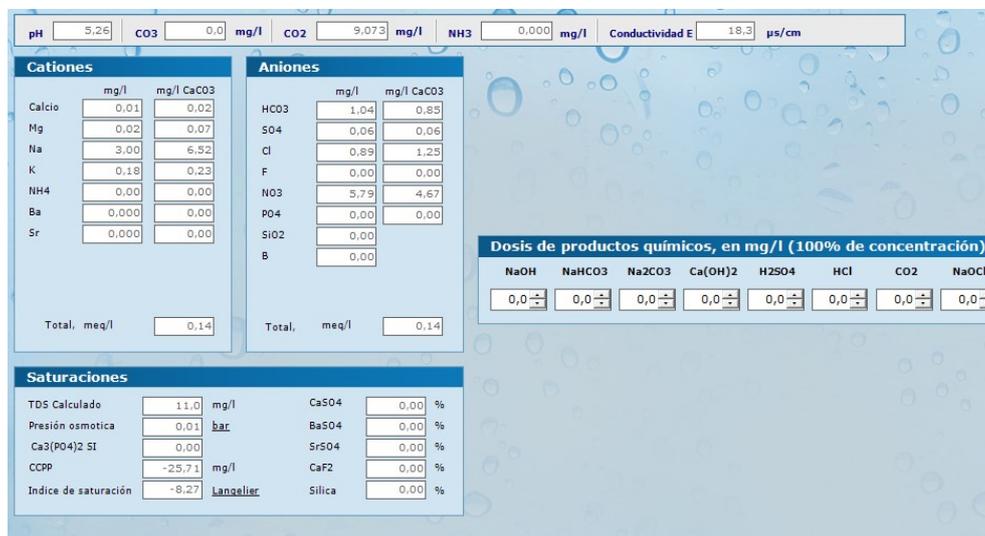
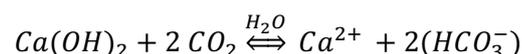


Figura 52. Resultados de la simulación de la membrana CPA6 MAX con conversión 50%.

Como se puede observar en cada una de las simulaciones, los valores de pH son muy inferiores a los requeridos en las aguas remineralizadas y el nivel de CO₂ rondan los 9 mg/l. Por tanto, se ha decidido aplicar el segundo proceso de remineralización mediante hidróxido cálcico y dióxido de carbono, ya que mediante este proceso se consume más CO₂ y así se podrá alcanzar el valor de 0.7 mg/L que se requiere, tal y como se indica en la Tabla 23. El proceso escogido de remineralización con Ca(OH)₂ + CO₂ el aporte de alcalinidad y dureza se lleva a cabo mediante la siguiente reacción:



En la siguiente figura se muestra la respuesta del agua osmotizada ante la dosificación del hidróxido de calcio. Se trata de una respuesta inmediata, pero que se vuelve una dosificación más precisa con el aumento de dióxido de carbono.

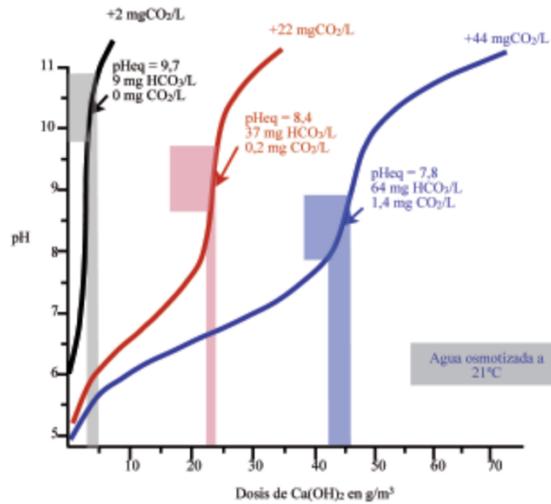


Figura 53. Relación entre la dosificación de Ca(OH)₂ y el aumento del pH. Adaptado de Mutschmann y Stimmelmayer (2002).

A continuación, se muestran un esquema de una instalación de preparación de lechada del cal y una planta de tratamiento con Ca(OH)₂ y CO₂.



Figura 54. A la izquierda, el esquema de una instalación de preparación de lechada de cal. A la derecha, planta de tratamiento con Ca(OH)₂ y CO₂.

En España en las aguas remineralizadas la dureza tiene un valor de 52.58 mg/L de CaCO₃, lo que indica que se trata de un agua ligeramente dura [17]. A continuación, se va a proceder a calcular la cantidad de Ca(OH)₂ a dosificar al proceso.

$$[Ca]_{remineralizada} = [Ca]_{potable} - [Ca]_{permeado} = 21 - 0 = 21 \text{ mg/L} \quad (15)$$

$$Dureza (CaCO_3) = \left(\frac{[Ca]_{potable}}{PM_{Ca}} + \frac{[Mg]_{potable}}{PM_{Mg}} \right) \cdot PM_{CaCO_3} \quad (16)$$

Por estequiometría se sabe que por cada mol de Ca²⁺, un mol de Ca(OH)₂.

$$[Ca(OH)_2] = \frac{[Ca]_{remineralizada} \cdot PM_{Ca(OH)_2}}{PM_{Ca^{2+}}} = \frac{21 \cdot 10^{-3} \text{ g/L} \cdot 74.093 \text{ g/mol}}{40.0769 \text{ g/mol}} \quad (17)$$

$$[Ca(OH)_2] = 38.82 \text{ mg/L}$$

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

A continuación, se muestra el resultado final del agua producto para cada uno de los casos simulados con el software *IMSDesign*.

- Membrana CPA5 MAX

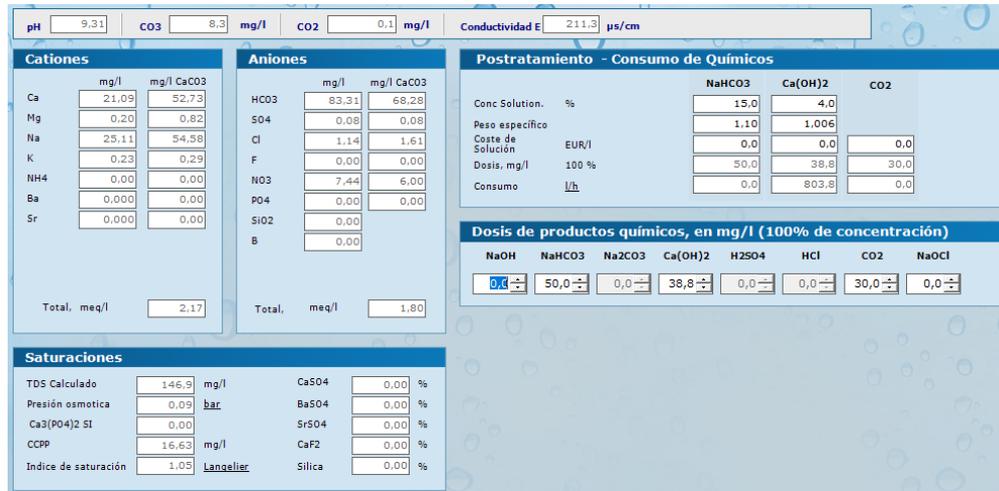


Figura 55. Resultado remineralización membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.

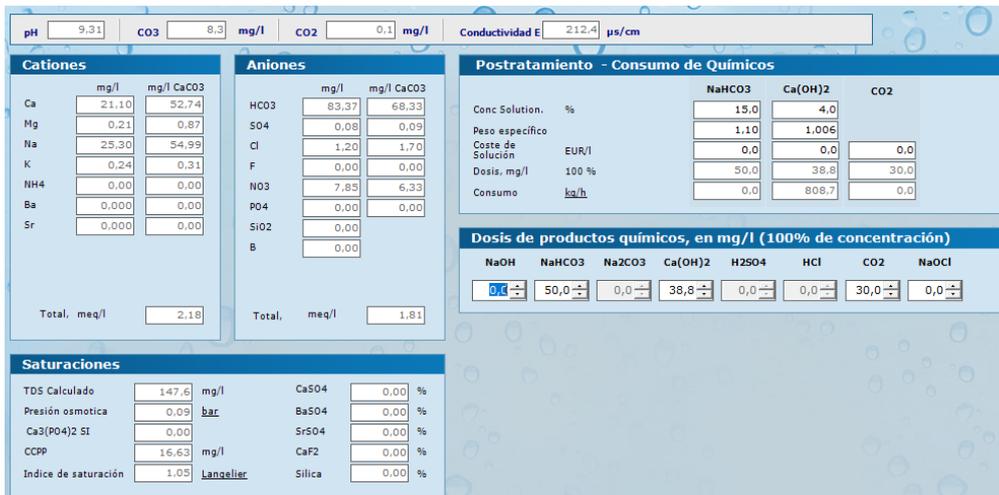


Figura 56. Resultado remineralización membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.

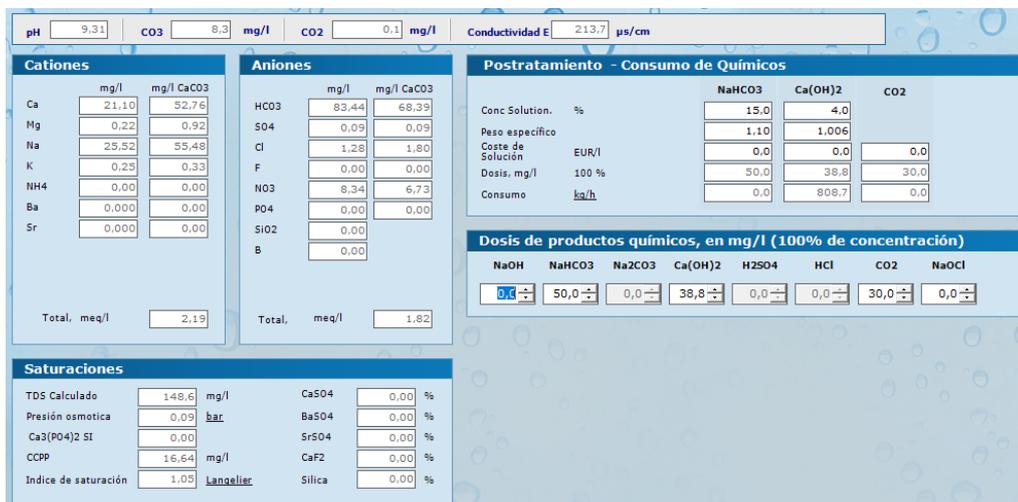


Figura 57. Resultado remineralización membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

- Membrana CPA6 MAX

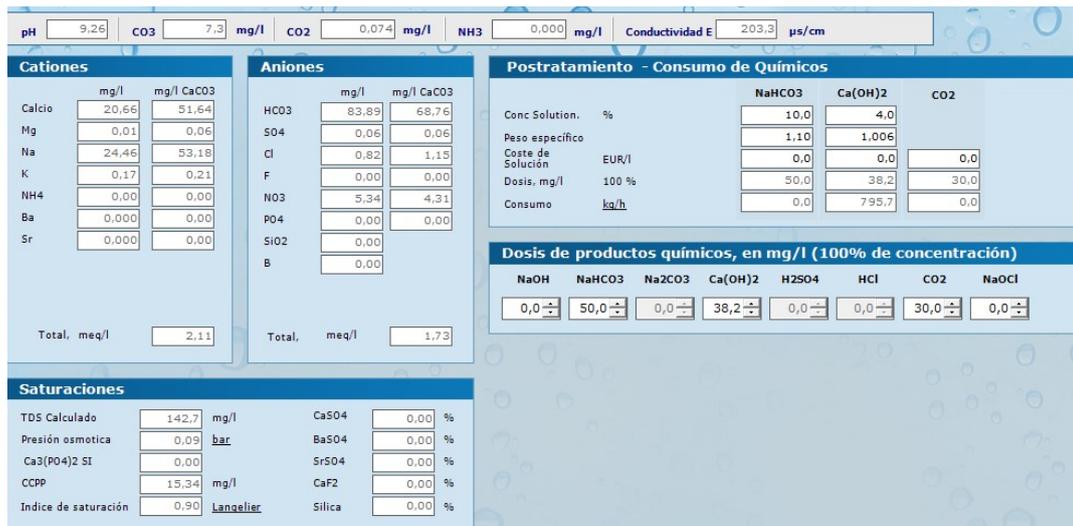


Figura 58. Resultado remineralización membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.

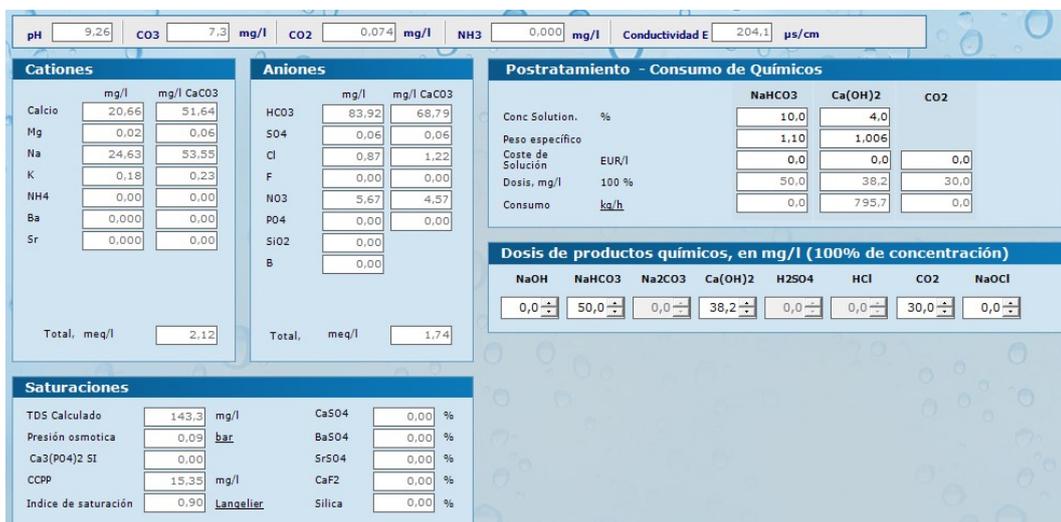


Figura 59. Resultado remineralización membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.

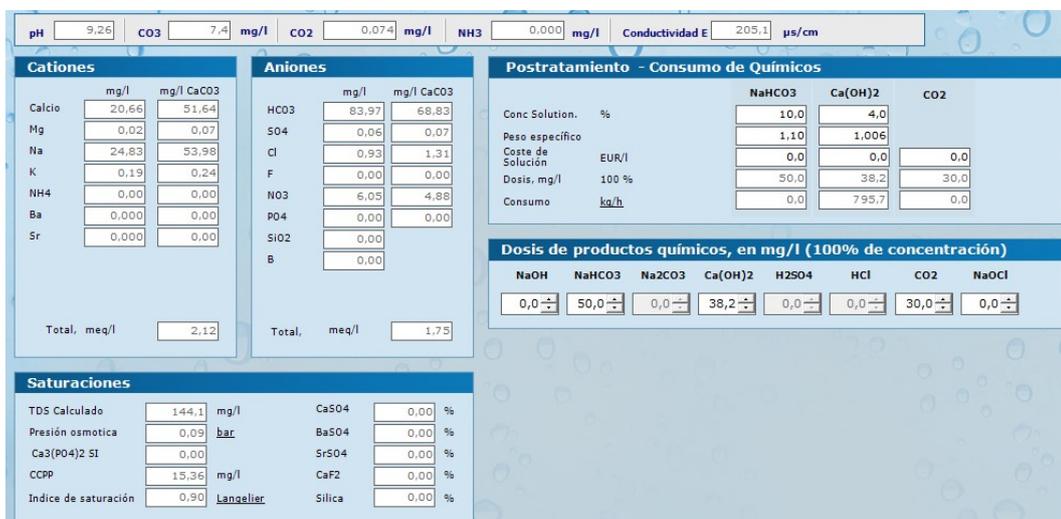


Figura 60. Resultado remineralización membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Tras el proceso de remineralización en cada uno de los casos estudiados se observa comparando con la Tabla 23 que los únicos datos que no se ajustan exactamente son los valores de pH y el coeficiente de Langelier (LSI). Sin embargo, los valores obtenidos tras la remineralización se encuentran dentro de los rangos admitidos por la legislación vigente, por tanto, se puede afirmar que el agua producto obtenida de la potabilizadora de agua es apta para el consumo humano. Los valores admitidos por la legislación vigente se encuentran detalladamente en el apartado **Marco legislativo**.

2. MARCO LEGISLATIVO

Ante la necesidad de recursos hídricos provocado por la escasez y la desertificación ocasionado, principalmente, por el cambio climático nace la necesidad de potabilizar el agua y la legislación de aplicación es el **Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano**, el cual define como el agua para consumo humano como:

- *“Todas aquellas aguas, ya sean en su estado original, ya sea después del tratamiento, utilizadas para beber, cocinar, preparar alimentos, higiene personal y para otros usos domésticos, sea cual fuere su origen e independientemente de que se suministren al consumidor, a través de redes de distribución públicas o privadas, de cisternas, de depósitos públicos o privados”.*
- *“Todas aquellas aguas utilizadas en la industria alimentaria para fines de fabricación, tratamiento, conservación o comercialización de productos o sustancias destinadas al consumo humano, así como a las utilizadas en la limpieza de las superficies, objetos y materiales que puedan estar en contacto con los alimentos”.*
- *“Todas aquellas aguas suministradas para consumo humano como parte de una actividad comercial o pública, con independencia del volumen medio diario suministrado”.*

Mostrándose a continuación, tanto en la Tabla 25 como en la Tabla 26, los parámetros químicos y los parámetros indicadores para el agua destinada a consumo humano:

Tabla 25. Parámetros químicos del agua para consumo humano (RD 140/2003).

Parámetro	Valor paramétrico
Antimonio (µg/l)	5.0
Arsénico (µg/l)	10.0
Benceno (µg/l)	1.0
Benzo(α)pireno (µg/l)	0.010
Boro (mg/l)	1.0
Bromato (µg/l)	10
Cadmio (µg/l)	5.0
Cianuro (µg/l)	50
Cobre (mg/l)	2.0
Cromo (µg/l)	50
1,2-Dicloroetano (µg/l)	3.0
Fluoruro (mg/l)	1.5
Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (HPA) (µg/l)	0.10
Mercurio (µg/l)	1.0
Microcistina (µg/l)	1
Níquel (µg/l)	20
Nitrato (mg/l)	50
Total plaguicidas (µg/l)	0.50
Plaguicida individual (µg/l)	0.10
Plomo (µg/l)	10
Selenio (µg/l)	10
Trihalometanos (THMs) (µg/l)	100
Tricloroetano + Tetracloroetano (µg/l)	10

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Tabla 26. Parámetros indicadores del agua para consumo humano (RD 140/2003).

Parámetro	Valor paramétrico
Aluminio ($\mu\text{g/l}$)	200
Amonio (mg/l)	0.5
Carbono orgánico total (mg/l)	Sin cambios anómalos
Cloro combinado residual (mg/l)	2.0
Cloro libre residual (mg/l)	1.0
Cloruro (mg/l)	250
Color (mg/l)	15
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ a 20°C)	2500
Hierro ($\mu\text{g/l}$)	200
Manganeso ($\mu\text{g/l}$)	50
Olor (índice de dilución)	3 a 25°C
Oxidabilidad ($\text{mg O}_2/\text{l}$)	5.0
pH	6.5 – 9.5
Sabor (índice de dilución)	3 a 25°C
Sodio (mg/l)	200
Sulfato (mg/l)	250

Por tanto, y atendiendo al RD 140/2003, los valores límite del agua tratada se recogen en la Tabla 27:

Tabla 27. Valores límite de la composición del agua producto (RD 140/2003).

Parámetro	Valor paramétrico
Cloruros (mg/l)	250
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ a 20°C)	2500
Nitratos (mg/l)	50
Nitritos (mg/l)	0.10
Plaguicida individual ($\mu\text{g/l}$)	0.10
Total plaguicidas ($\mu\text{g/l}$)	0.50
pH	6.5 – 9.5
Sodio (mg/l)	200
Sulfatos (mg/l)	250
TDS (ppm)	500

3. ESTUDIO ECONÓMICO

Tras un estudio económico comparativo de los ocho escenarios de simulación se ha decidido apostar por la opción más viable económicamente la cual es una planta potabilizadora de agua que trabaja con una conversión del 50% con las membranas de ósmosis inversa *CPA5 MAX* de *HYDRANAUTICS*. El estudio económico comparativo se encuentra en el **Documento 2. Presupuesto** de la memoria.

Los costes del proyecto de la potabilizadora de agua se han dividido en el coste de capital o inversión total donde se incluye el coste en la unidad de ósmosis inversa, el coste anual de operación y mantenimiento y, finalmente, el coste del agua potabilizada.

El coste en la unidad de ósmosis inversa se encuentra desglosado en la siguiente tabla.

Tabla 28. Coste en la unidad de ósmosis inversa.

REF MEMBRANA	CPA5 MAX
Coste de cada Elemento (€/elemento)	595 €
	262 395 €
	524 790 €
REF. TUBO DE PRESION	Codeline 8 1200PSI Max
Coste de tubo de presión (€/TP)	1 651 €
Coste TP por bastidor	104 012 €
Coste total TP	208 024 €
REF. BOMBA Y MOTOR	
Coste Bomba	45 901 €
Coste Motor	14 126 €
Coste por BAST	60 026 €
Coste total BM	120 053 €
GRUPO RESERVA	
Coste B+M	60 088 €
COSTE UNIDAD OI BASTIDOR	426 495 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI	913 077 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI INSTALADO	2 374 001 €

Siendo el coste total anual de reemplazo de membranas y filtros el siguiente.

Tabla 29. Coste total anual de reemplazos.

Tasa de reemplazo (%/año)	0 €
Coste anual de reemplazo membranas	104 958 €
Coste anual de reemplazo filtros (15% de membranas)	15 744 €
Coste total anual reemplazo	120 702 €

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

En la siguiente tabla se muestra el coste del capital o inversión total de la planta potabilizadora de agua.

Tabla 30. Inversión total de la planta potabilizadora de agua.

Costes de capital directos (Construcción)

	€	%
Preparación del terreno, accesos, parking, etc.	52 367.66 €	0.75%
Captación de agua	279 294.19 €	4.00%
Pretratamiento	488 764.83 €	7.00%
Equipos para el Sistema de OI	2 374 000.58 €	34.00%
Post-tratamiento	104 735.32 €	1.50%
Gestión de Concentrados	153 611.80 €	2.20%
Gestión de residuos	83 788.26 €	1.20%
Sistemas Eléctricos e Instrumentación	153 611.80 €	2.20%
Instalaciones y equipos auxiliares	111 717.67 €	1.60%
Edificios	279 294.19 €	4.00%
Puesta en marcha y pruebas de aceptación	104 735.32 €	1.50%
Subtotal de costes directos (construcción)	4 185 921.61 €	60.0%

Costes de capital indirectos (Construcción)

Costes de Ingeniería del proyecto

Ingeniería Preliminar	69 823.55 €	1.00%
Ensayos piloto	87 279.43 €	1.25%
Diseño de detalle	384 029.51 €	5.50%
Gestión y supervisión de la construcción	209 470.64 €	3.00%
Subtotal-servicios de ingeniería.	750 603.13 €	10.75%

Desarrollo del Proyecto

Administración, contratación y gestión	174 558.87 €	2.50%
Permisos ambientales	331 661.85 €	4.75%
Servicios Legales	122 191.21 €	1.75%
Subtotal Desarrollo del proyecto.	628.411,92 €	9.00%

Costes financieros del proyecto

Intereses durante la construcción	90.770,61 €	1.30%
Fondo de Reserva para el servicio de la deuda	418 941.28 €	6.00%
Otros costes financieros	279 294.19 €	4.00%
Subtotal-financiación del proyecto	789 006.08 €	11.30%
Contingencias	628 411.92 €	9.00%
Subtotal costes indirectos del capital	2 796 433.04 €	40.05%
Costes totales de capital	6 982 354.65 €	100.0%

El coste de inversión total de la planta potabilizadora de agua asciende **seis millones novecientos ochenta y dos mil trescientos cincuenta y cuatro euros con sesenta y cinco céntimos**.

Adicionalmente, se ha calculado los costes anuales de operación y mantenimiento de la planta.

Tabla 31. Costes anuales de Operación y Mantenimiento.

	€	€/m ³	% del Total
Costes Variables			
Energía	623 244.55 €	0.09 €	50.00%
Productos Químicos	78 310.13 €	0.01 €	6.00%
Reemplazamiento de membranas y filtros de cartucho	120 701.70 €	0.02 €	7.00%
Gestión de las corrientes residuales	52 206.75 €	0.01 €	4.00%
Subtotal costes variables	874 463.14 €	0.12 €	67.00%
Costes Fijos			
Termino de potencia	65 258.44 €	0.01 €	5.00%
Personal	130 516.89 €	0.02 €	10.00%
Mantenimiento	51 221.51 €	0.01 €	5.00%
Vigilancia ambiental	26 103.38 €	0.00 €	2.00%
Costes indirectos	143 568.57 €	0.02 €	11.00%
Subtotal costes fijos	351 410.35 €	0.06 €	33.00%
Total costes O&M	1 305 168.86 €	0.18 €	100.0%
Amortización de la inversión	608 753.50 €	0.08 €	

Y, finalmente, el coste del agua potabilizada calculado en base a los costes totales de producción de la planta potabilizadora de agua.

Tabla 32. Costes del agua potabilizada (€/m³).

Total costes producción	0.26 €
Beneficio industrial (10%)	0.03 €
IMPUESTOS (10%)	0.03 €
Total coste del agua potabilizada	0.316 €

Finalmente, la planta potabilizadora de agua con un coste de inversión total de **6982354.65€**; un coste de operación y mantenimiento de **1305168.86 €** y un coste de agua potabilizada de **0.316 €/m³** ha resultado ser la opción más viable económicamente con respecto a los seis escenarios simulados y ocho casos de estudio económico realizados.

4. CONCLUSIONES

La planta potabilizadora de agua ubicada en la comarca El Maresme, concretamente en la localidad de Mataró, diseñada para abastecer a los 126988 habitantes de la localidad con un caudal de permeado de 20000 m³/ día, trabajando con una conversión del 50%, siendo el caudal de alimentación de la planta potabilizadora de agua de 40000 m³/día se ha diseñado con el fin de aprovechar los pocos recursos hídricos de la zona. Concretamente, para el aprovechamiento del agua del acuífero del Bajo Maresme el cual sufre una contaminación por nitratos ocasionada por la actividad agroalimentaria de la zona.

Tras haber realizado seis escenarios de simulación donde se ha variado la conversión y se han probado dos membranas diferentes se ha llegado a la conclusión de que la opción más viable económicamente es aquella donde se trabaja con una conversión del 50% y con la membrana CPA5 MAX de HYDRANAUTICS.

El agua producto de la planta potabilizadora de agua tiene las siguientes características:

Tabla 33. Características del agua producto final potabilizada.

pH	9.31
Cloruros (mg/l)	1.28
Conductividad (µS/ cm)	213.7
Nitratos (mg/l)	8.34
Sodio (mg/l)	25.52
TDS (ppm)	148.6

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

Y, finalmente, tanto los costes de inversión total como los costes de operación y mantenimiento, así como los costes del agua potabilizada, siendo estos respectivamente **6982354.65 €**; **1305168.86 €** y **0.316 €/m³** se pueden considerar admisibles y aceptables para los habitantes de la localidad de Mataró. Es decir, se podría afirmar que se trata de un proyecto económicamente viable para la localidad.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Grupo de Procesos y Sistemas de Ingeniería Ambiental, Universidad Autónoma de Madrid, *La contaminación de las aguas subterráneas por nitratos*. Recuperado de: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2006/07/12/35033>
- [2] Instituto Geológico y Minero de España, *La problemática de los nitratos y las aguas subterráneas*. Recuperado de: http://aguas.igme.es/igme/publica/libro102/pdf/lib102/in_02.pdf
- [3] Ministerio para la Transición ecológica y el Reto Demográfico, *Estado de los nitratos y pesticidas en España*. Recuperado de: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/proteccion-nitratos-pesticidas/estado-nitratos-pesticidas/default.aspx>
- [4] Antonio E. Palomares, Instituto de Tecnología Química (UPV- CSIC), *Contaminación del agua por nitratos y técnicas para su tratamiento*. Recuperado de: <https://www.esferadelagua.es/agua-y-tecnologia/contaminacion-del-agua-por-nitratos-y-tecnicas-para-su-tratamiento>
- [5] Marc Martínez Parra, José Manuel Murillo Díaz, Instituto Geológico y Minero de España. *Evolución de la contaminación Marina en los Acuíferos Costeros del Baix Maresme*. Recuperado de: <https://docplayer.es/72574929-Evolucion-de-la-contaminacion-marina-en-los-acuiferos-costeros-del-baix-maresme-barcelona.html>
- [6] y [15] Instituto Tecnológico GeoMinero de España, *Acuífero del Maresme*. Recuperado de: http://info.igme.es/SidPDF/038000/819/38819_0001.pdf
- [7] y [8] Francisco Maraver Eyzaguirre, *Estudio de las Aguas Minero-Medicinales de los Establecimientos Balnearios del Maresme: "Caldes d'Estrac" y "Titus"*. Recuperado de: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjQNGkrOXxAhXHDGMBHYWnD1oQFjAGegQIFhAD&url=https%3A%2F%2Fwww.raco.cat%2Findex.php%2FRevistaRAMC%2Farticle%2Fdownload%2F71777%2F91551&usq=AOvVaw0_maNii_H1pfvgE-DBd9d2
- [9] Xavigivax, *Municipios del Maresme*. Recuperado de: <https://bestmaresme.com/blog/el-mapa-del-maresme-muestra-una-comarca-privilegiada/>
- [10] Generalitat de Catalunya Agència Catalana de Turisme, *Maresme*. Recuperado de: <https://www.catalunya.com/maresme-2-2-21?language=es>
- [11] Aigües de Mataró, *Depuració*. <https://www.aiguesmataro.com/ca/depuracio>
- [12] Marcel Mulder, *Basic principles of membrane technology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrech, 2003.
- [13] Aigües de Mataró, *Red de abastecimiento de agua potable*. <https://www.aiguesmataro.com/es/red-de-abastecimiento-de-agua-potable>
- [14] Pérez de la Cruz, F. J. *Abastecimiento de aguas* por la Universidad Politécnica de Cartagena. Recuperado de: https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6012/mod_resource/content/1/Tema_03_CAPT_A_GUAS_SUB.pdf
- [15] Segura Acosta, L., de la Nuez Pestana, I. *Estudio del comportamiento de un sistema de recuperación de energía en una planta de ósmosis inversa en condiciones de funcionamiento de régimen variable, funcionamiento en el empleo de un sistema PX*. Recuperado de: https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/6636/2/0231633_00031_0001.pdf
- [16] Hydranautics. *Foulants and Cleaning Procedures for composite polyamide RO/NF Membrane Elements*. Recuperado de: <https://membranes.com/wp-content/uploads/Documents/TSB/TSB107.pdf>

[17] Hernández-Suarez, M. *Guía para la remineralización de las aguas desaladas*.

[18] Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambiente i Habitatge. *Programa de gestió de residus industrials (PROGRIC)*. Recuperado de: http://residus.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/planificacio/progric_resum.pdf

DISEÑO DE UNA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA UBICADA EN LA COMARCA EL MARESME

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

AUTOR: VICTORIA MACIÁ AIX

DIRECTORES: JAIME LORA GARCÍA Y VICENT FOMBUENA BORRÁS

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SEGURIDAD INDUSTRIAL Y MEDIO AMBIENTE

VALENCIA, SEPTIEMBRE 2021

DOCUMENTO 2. PRESUPUESTO

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1.	INTRODUCCIÓN	85
2.	COSTE DE CAPITAL O INVERSIÓN TOTAL	85
3.	COSTES ANUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	101
4.	COSTE DEL AGUA POTABILIZADA.....	105
5.	RESUMEN PRESUPUESTO	107
6.	CONCLUSIÓN PRESUPUESTO	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.....	85
Tabla 2. Coste de reemplazo de la membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.....	85
Tabla 3. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.....	86
Tabla 4. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.....	87
Tabla 5. Coste de reemplazo de la membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.....	87
Tabla 6. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.....	88
Tabla 7. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.....	89
Tabla 8. Coste de reemplazo de la membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.....	89
Tabla 9. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.....	90
Tabla 10. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.	91
Tabla 11. Coste de reemplazo de la membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.	91
Tabla 12. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.	92
Tabla 13. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.....	93
Tabla 14. Coste de reemplazo de la membrana CPA6 MAX con conversión del 40%....	93
Tabla 15. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.....	94
Tabla 16. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.....	95
Tabla 17. Coste de reemplazo de la membrana CPA6 MAX con conversión del 45%....	95
Tabla 18. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.....	96
Tabla 19. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.....	97
Tabla 20. Coste de reemplazo de la membrana CPA6 MAX con conversión del 50%....	97
Tabla 21. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.....	98
Tabla 22. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.	99
Tabla 23. Coste de reemplazo de la membrana CPA6 MAX con conversión del 50 con recuperador de energía.	99
Tabla 24. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.	100
Tabla 25. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.	101
Tabla 26. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.	102

Tabla 27. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.	102
Tabla 28. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.....	103
Tabla 29. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.	103
Tabla 30. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.	104
Tabla 31. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.	104
Tabla 32. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.....	105
Tabla 33. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.	105
Tabla 34. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.	106
Tabla 35. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.	106
Tabla 35. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.....	106
Tabla 36. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.	106
Tabla 37. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.	107
Tabla 38. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.	107
Tabla 38. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.....	107
Tabla 39. Resumen presupuesto con la membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.	107
Tabla 40. Resumen presupuesto con la membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.	108
Tabla 41. Resumen presupuesto con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.	108
Tabla 41. Resumen presupuesto con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.	108
Tabla 42. Resumen presupuesto con la membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.	108
Tabla 43. Resumen presupuesto con la membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.	108
Tabla 44. Resumen presupuesto con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.	108
Tabla 44. Resumen presupuesto con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.	109

1. INTRODUCCIÓN

A continuación, en el presente documento se va a hacer una comparativa de los seis escenarios simulados con sus respectivos costes de capital o inversión total, costes anuales de operación y mantenimiento; y costes del agua desalada para cada uno de los casos con el fin de escoger la solución más viable económicamente. La solución escogida será la que aparecerá en el **Documento 1** de la memoria.

2. COSTE DE CAPITAL O INVERSIÓN TOTAL

En el coste de capital o inversión total se incluye el coste de inversión en la unidad de ósmosis inversa y a continuación se muestra las seis opciones posibles. Por otro lado, para la opción más viable económicamente de cada membrana se va a realizar el mismo estudio económico, pero incorporando el recuperador de energía con el fin de averiguar si fuera viable su aplicación.

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.**

Tabla 1. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.

REF MEMBRANA	CPA5 MAX
Coste de cada Elemento (€/elemento)	595 €
	262 395 €
	524 790 €
REF. TUBO DE PRESION	Codeline 8 1200PSI Max
Coste de tubo de presión (€/TP)	1 651 €
Coste TP por bastidor	104 012 €
Coste total TP	208 024 €
REF. BOMBA Y MOTOR	
Coste Bomba	45 901 €
Coste Motor	17 420 €
Coste por BAST	63.320 €
Coste total BM	126 640 €
GRUPO RESERVA	
Coste B+M	63 320 €
COSTE UNIDAD OI BASTIDOR	429 727 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI	922 774 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI INSTALADO	2 399 212 €

Tabla 2. Coste de reemplazo de la membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.

Tasa de reemplazo (%/año)	0 €
Coste anual de reemplazo membranas	104 958 €
Coste anual de reemplazo filtros (15%de membranas)	15 744 €
Coste total anual reemplazo	120 702 €

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Tabla 3. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.

Costes de capital directos (Construcción)

	€	%
Preparación del terreno, accesos, parking, etc.	52 923.80 €	0.75%
Captación de agua	282 260.27 €	4.00%
Pretratamiento	493 955.47 €	7.00%
Equipos para el Sistema de OI	2 399 212.29 €	34.00%
Post-tratamiento	105 847.60 €	1.50%
Gestión de Concentrados	155 243.15 €	2.20%
Gestión de residuos	84 678.08 €	1.20%
Sistemas Eléctricos e Instrumentación	155 243.15 €	2.20%
Instalaciones y equipos auxiliares	112 904.11 €	1.60%
Edificios	282 260.27 €	4.00%
Puesta en marcha y pruebas de aceptación	105 847.60 €	1.50%
Subtotal de costes directos (construcción)	4 230 375.78 €	60.0%

Costes de capital indirectos (Construcción)

Costes de Ingeniería del proyecto

Ingeniería Preliminar	70 565.07 €	1.00%
Ensayos piloto	88 206.33 €	1.25%
Diseño de detalle	388 107.87 €	5.50%
Gestión y supervisión de la construcción	211 695.20 €	3.00%
Subtotal-servicios de ingeniería.	758 574.47 €	10.75%

Desarrollo del Proyecto

Administración, contratación y gestión	176 412.67 €	2.50%
Permisos ambientales	335 184.07 €	4.75%
Servicios Legales	123 488.87 €	1.75%
Subtotal Desarrollo del proyecto.	635 085.61 €	9.00%

Costes financieros del proyecto

Intereses durante la construcción	91 734.59 €	1.30%
Fondo de Reserva para el servicio de la deuda	423 390.40 €	6.00%
Otros costes financieros	282 260.27 €	4.00%
Subtotal-financiación del proyecto	797 385.26 €	11.30%
Contingencias	635 085.61 €	9.00%
Subtotal costes indirectos del capital	2 826 130.94 €	40.05%
Costes totales de capital	7 056 506.73 €	100.0%

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.**

Tabla 4. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.

REF MEMBRANA	CPA5 MAX	
Coste de cada Elemento (€/elemento)		595 €
		262 395 €
		524 790 €
REF. TUBO DE PRESION	Codeline 8 1200PSI Max	
Coste de tubo de presión (€/TP)		1 651 €
Coste TP por bastidor		104 012 €
Coste total TP		208 024 €
REF. BOMBA Y MOTOR		
Coste Bomba		45 901 €
Coste Motor		15 621 €
Coste por BAST		61 521 €
Coste total BM		123 043 €
GRUPO RESERVA		
Coste B+M		61 521 €
COSTE UNIDAD OI BASTIDOR		427 928 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI		917 378 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI INSTALADO		2 385 183 €

Tabla 5. Coste de reemplazo de la membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.

Tasa de reemplazo (%/año)	0 €
Coste anual de reemplazo membranas	104 958 €
Coste anual de reemplazo filtros (15%de membranas)	15 744 €
Coste total anual reemplazo	120 702 €

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Tabla 6. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.

Costes de capital directos (Construcción)

	€	%
Preparación del terreno, accesos, parking, etc.	52 614.33 €	0.75%
Captación de agua	280 609.77 €	4,00%
Pretratamiento	491 067.10 €	7.00%
Equipos para el Sistema de OI	2 385 183.04 €	34.00%
Post-tratamiento	105 228.66 €	1.50%
Gestión de Concentrados	154 335.37 €	2.20%
Gestión de residuos	84 182.93 €	1.20%
Sistemas Eléctricos e Instrumentación	154 335.37 €	2.20%
Instalaciones y equipos auxiliares	112 243.91 €	1.60%
Edificios	280 609.77 €	4.00%
Puesta en marcha y pruebas de aceptación	105 228.66 €	1.50%
Subtotal de costes directos (construcción)	4 205 638.92 €	60.0%

Costes de capital indirectos (Construcción)

Costes de Ingeniería del proyecto

Ingeniería Preliminar	70 152.44 €	1.00%
Ensayos piloto	87 690.55 €	1.25%
Diseño de detalle	385 838.43 €	5.50%
Gestión y supervisión de la construcción	210 457.33 €	3.00%
Subtotal-servicios de ingeniería.	754 138.76 €	10.75%

Desarrollo del Proyecto

Administración, contratación y gestión	175 381.11 €	2.50%
Permisos ambientales	333 224.10 €	4.75%
Servicios Legales	122 766.77 €	1.75%
Subtotal Desarrollo del proyecto.	631 371.98 €	9.00%

Costes financieros del proyecto

Intereses durante la construcción	91 198,18 €	1.30%
Fondo de Reserva para el servicio de la deuda	420 914,65 €	6.00%
Otros costes financieros	280 609.77 €	4.00%
Subtotal-financiación del proyecto	792 722.60 €	11.30%
Contingencias	631 371.98 €	9.00%
Subtotal costes indirectos del capital	2 809 605.32 €	40.05%
Costes totales de capital	7 015 244,24 €	100.0%

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.**

Tabla 7. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.

REF MEMBRANA	CPA5 MAX	
Coste de cada Elemento (€/elemento)		595 €
		262 395 €
		524 790 €
REF. TUBO DE PRESION	Codeline 8 1200PSI Max	
Coste de tubo de presión (€/TP)		1 651 €
Coste TP por bastidor		104 012 €
Coste total TP		208 024 €
REF. BOMBA Y MOTOR		
Coste Bomba		45 901 €
Coste Motor		14 126 €
Coste por BAST		60 026 €
Coste total BM		120 053 €
GRUPO RESERVA		
Coste B+M		60 088 €
COSTE UNIDAD OI BASTIDOR		426 495 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI		913 077 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI INSTALADO		2 374 001 €

Tabla 8. Coste de reemplazo de la membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.

Tasa de reemplazo (%/año)	0 €
Coste anual de reemplazo membranas	104 958 €
Coste anual de reemplazo filtros (15%de membranas)	15 744 €
Coste total anual reemplazo	120 702 €

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Tabla 9. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.

Costes de capital directos (Construcción)

	€	%
Preparación del terreno, accesos, parking, etc.	52 367.66 €	0.75%
Captación de agua	279 294.19 €	4.00%
Pretratamiento	488 764.83 €	7.00%
Equipos para el Sistema de OI	2 374 000.58 €	34.00%
Post-tratamiento	104 735.32 €	1.50%
Gestión de Concentrados	153 611.80 €	2.20%
Gestión de residuos	83 788.26 €	1.20%
Sistemas Eléctricos e Instrumentación	153 611.80 €	2.20%
Instalaciones y equipos auxiliares	111 717.67 €	1.60%
Edificios	279 294.19 €	4.00%
Puesta en marcha y pruebas de aceptación	104 735.32 €	1.50%
Subtotal de costes directos (construcción)	4 185 921.61 €	60.0%

Costes de capital indirectos (Construcción)

Costes de Ingeniería del proyecto

Ingeniería Preliminar	69 823.55 €	1.00%
Ensayos piloto	87 279.43 €	1.25%
Diseño de detalle	384 029.51 €	5.50%
Gestión y supervisión de la construcción	209 470.64 €	3.00%
Subtotal-servicios de ingeniería.	750 603.13 €	10.75%

Desarrollo del Proyecto

Administración, contratación y gestión	174 558.87 €	2.50%
Permisos ambientales	331 661.85 €	4.75%
Servicios Legales	122 191.21 €	1.75%
Subtotal Desarrollo del proyecto.	628 411.92 €	9.00%

Costes financieros del proyecto

Intereses durante la construcción	90 770.61 €	1.30%
Fondo de Reserva para el servicio de la deuda	418 941.28 €	6.00%
Otros costes financieros	279 294.19 €	4.00%
Subtotal-financiación del proyecto	789 006.08 €	11.30%
Contingencias	628 411.92 €	9.00%
Subtotal costes indirectos del capital	2 796 433.04 €	40.05%
Costes totales de capital	6 982 354.65 €	100.0%

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.**

Tabla 10. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.

REF MEMBRANA	CPA5 MAX
Coste de cada Elemento (€/elemento)	595 €
	262 395 €
	524 790 €
REF. TUBO DE PRESION	Codeline 8 1200PSI Max
Coste de tubo de presión (€/TP)	1 651 €
Coste TP por bastidor	104 012 €
Coste total TP	208 024 €
REF. BOMBA Y MOTOR	
Coste Bomba	45 901 €
Coste Motor	10 509 €
Coste por BAST	56 409 €
Coste total BM	112 818 €
REF. RECUPERADOR ENERGIA	ERI PX-300
Coste Recuperador Energia	191 873 €
Coste Bomba Booster + Motor	24 022 €
Coste por BAST	215 895 €
Coste total ERD	431 790 €
GRUPO RESERVA	
Coste B+M+ERD	248 282 €
COSTE UNIDAD OI BASTIDOR	638 711 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI	1 525 704 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI INSTALADO	3 966 830 €

Tabla 11. Coste de reemplazo de la membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.

Tasa de reemplazo (%/año)	0 €
Coste anual de reemplazo membranas	104 958 €
Coste anual de reemplazo filtros (15%de membranas)	15 744 €
Coste total anual reemplazo	120 702 €

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Tabla 12. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.

Costes de capital directos (Construcción)

	€	%
Preparación del terreno, accesos, parking, etc.	87 503.61 €	0.75%
Captación de agua	466 685.90 €	4.00%
Pretratamiento	816 700.33 €	7.00%
Equipos para el Sistema de OI	3 966 830.18 €	34.00%
Post-tratamiento	175 007.21 €	1.50%
Gestión de Concentrados	256 677.25 €	2.20%
Gestión de residuos	140 005.77 €	1.20%
Sistemas Eléctricos e Instrumentación	256 677.25 €	2.20%
Instalaciones y equipos auxiliares	186 674.36 €	1.60%
Edificios	466 685.90 €	4.00%
Puesta en marcha y pruebas de aceptación	175 007.21 €	1.50%
Subtotal de costes directos (construcción)	6 994 454.97 €	60.0%

Costes de capital indirectos (Construcción)

Costes de Ingeniería del proyecto

Ingeniería Preliminar	116 671.48 €	1.00%
Ensayos piloto	145 839.34 €	1.25%
Diseño de detalle	641 693.12 €	5.50%
Gestión y supervisión de la construcción	350 014.43 €	3.00%
Subtotal-servicios de ingeniería.	1 254 218.36 €	10.75%

Desarrollo del Proyecto

Administración, contratación y gestión	291 678.69 €	2.50%
Permisos ambientales	554 189.51 €	4.75%
Servicios Legales	204 175.08 €	1.75%
Subtotal Desarrollo del proyecto.	1 050 043.28 €	9.00%

Costes financieros del proyecto

Intereses durante la construcción	151 672.92 €	1.30%
Fondo de Reserva para el servicio de la deuda	700 028.85 €	6.00%
Otros costes financieros	466 685.90 €	4.00%
Subtotal-financiación del proyecto	1 318 387.68 €	11.30%
Contingencias	1 050 043.28 €	9.00%
Subtotal costes indirectos del capital	4 672 692.61 €	40.05%
Costes totales de capital	11 667 147.58 €	100.0%

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.**

Tabla 13. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.

REF MEMBRANA	CPA6 MAX	
Coste de cada Elemento (€/elemento)		541 €
		238 590 €
		477 180 €
REF. TUBO DE PRESION	Codeline 8 1200PSI Max	
Coste de tubo de presión (€/TP)		1 651 €
Coste TP por bastidor		104 012 €
Coste total TP		208 024 €
REF. BOMBA Y MOTOR		
Coste Bomba		45 901 €
Coste Motor		20 616 €
Coste por BAST		66 516 €
Coste total BM		133 033 €
GRUPO RESERVA		
Coste B+M		66 516 €
COSTE UNIDAD OI BASTIDOR		409 118 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI		884 752 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI INSTALADO		2 300 356 €

Tabla 14. Coste de reemplazo de la membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.

Tasa de reemplazo (%/año)	0 €
Coste anual de reemplazo membranas	95 436 €
Coste anual de reemplazo filtros (15% de membranas)	14 315 €
Coste total anual reemplazo	109 751 €

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Tabla 15. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.

Costes de capital directos (Construcción)		
	€	%
Preparación del terreno, accesos, parking, etc.	50 743.14 €	0.75%
Captación de agua	270 630.06 €	4.00%
Pretratamiento	473 602.60 €	7.00%
Equipos para el Sistema de OI	2 300 355.50 €	34.00%
Post-tratamiento	101 486.27 €	1.50%
Gestión de Concentrados	148 846.53 €	2.20%
Gestión de residuos	81 189.02 €	1.20%
Sistemas Eléctricos e Instrumentación	148 846.53 €	2.20%
Instalaciones y equipos auxiliares	108 252.02 €	1.60%
Edificios	270 630.06 €	4.00%
Puesta en marcha y pruebas de aceptación	101 486.27 €	1.50%
Subtotal de costes directos (construcción)	4 056 068.01 €	60.0%
Costes de capital indirectos (Construcción)		
Costes de Ingeniería del proyecto		
Ingeniería Preliminar	67 657.51 €	1.00%
Ensayos piloto	84 571.89 €	1.25%
Diseño de detalle	372 116.33 €	5.50%
Gestión y supervisión de la construcción	202 972.54 €	3.00%
Subtotal-servicios de ingeniería.	727 318.28 €	10.75%
Desarrollo del Proyecto		
Administración, contratación y gestión	169 143.79 €	2.50%
Permisos ambientales	321 373.20 €	4.75%
Servicios Legales	118 400.65 €	1.75%
Subtotal Desarrollo del proyecto.	608 917.63 €	9.00%
Costes financieros del proyecto		
Intereses durante la construcción	87 954.77 €	1.30%
Fondo de Reserva para el servicio de la deuda	405 945.09 €	6.00%
Otros costes financieros	270 630.06 €	4.00%
Subtotal-financiación del proyecto	764 529.92 €	11.30%
Contingencias	608 917.63 €	9.00%
Subtotal costes indirectos del capital	2 709 683.47 €	40.05%
Costes totales de capital	6 765 751.48 €	100.0%

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.**

Tabla 16. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.

REF MEMBRANA	CPA6 MAX	
Coste de cada Elemento (€/elemento)		541 €
		238 590 €
		477 180 €
REF. TUBO DE PRESION	Codeline 8 1200PSI Max	
Coste de tubo de presión (€/TP)		1 651 €
Coste TP por bastidor		104 012 €
Coste total TP		208 024 €
REF. BOMBA Y MOTOR		
Coste Bomba		45 901 €
Coste Motor		18 573 €
Coste por BAST		64 473 €
Coste total BM		128 947 €
GRUPO RESERVA		
Coste B+M		64 473 €
COSTE UNIDAD OI BASTIDOR		407 075 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI		878 623 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI INSTALADO		2 284 421 €

Tabla 17. Coste de reemplazo de la membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.

Tasa de reemplazo (%/año)	0 €
Coste anual de reemplazo membranas	95 436 €
Coste anual de reemplazo filtros (15%de membranas)	14 315 €
Coste total anual reemplazo	109 751 €

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Tabla 18. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.

Costes de capital directos (Construcción)

	€	%
Preparación del terreno, accesos, parking, etc.	50 391.64 €	0.75%
Captación de agua	268 755.42 €	4.00%
Pretratamiento	470 321.99 €	7.00%
Equipos para el Sistema de OI	2 284 421.07 €	34.00%
Post-tratamiento	100 783.28 €	1.50%
Gestión de Concentrados	147 815.48 €	2.20%
Gestión de residuos	80 626.63 €	1.20%
Sistemas Eléctricos e Instrumentación	147 815.48 €	2.20%
Instalaciones y equipos auxiliares	107 502.17 €	1.60%
Edificios	268 755.42 €	4.00%
Puesta en marcha y pruebas de aceptación	100 783.28 €	1.50%
Subtotal de costes directos (construcción)	4 027 971.86 €	60.0%

Costes de capital indirectos (Construcción)

Costes de Ingeniería del proyecto

Ingeniería Preliminar	67 188.86 €	1.00%
Ensayos piloto	83 986.07 €	1.25%
Diseño de detalle	369 538.70 €	5.50%
Gestión y supervisión de la construcción	201 566.57 €	3.00%
Subtotal-servicios de ingeniería.	722 280.19 €	10.75%

Desarrollo del Proyecto

Administración, contratación y gestión	167 972.14 €	2.50%
Permisos ambientales	319 147.06 €	4.75%
Servicios Legales	117 580.50 €	1.75%
Subtotal Desarrollo del proyecto.	604 699.70 €	9.00%

Costes financieros del proyecto

Intereses durante la construcción	87.345.51 €	1.30%
Fondo de Reserva para el servicio de la deuda	403.133.13 €	6.00%
Otros costes financieros	268 755.42 €	4.00%
Subtotal-financiación del proyecto	759 234.06 €	11.30%
Contingencias	604 699.70 €	9.00%
Subtotal costes indirectos del capital	2 690 913.65 €	40.05%
Costes totales de capital	6 718 885.51 €	100.0%

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.**

Tabla 19. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.

REF MEMBRANA	CPA6 MAX	
Coste de cada Elemento (€/elemento)		541 €
		238 590 €
		477 180 €
REF. TUBO DE PRESION	Codeline 8 1200PSI Max	
Coste de tubo de presión (€/TP)		1 651 €
Coste TP por bastidor		104 012 €
Coste total TP		208 024 €
REF. BOMBA Y MOTOR		
Coste Bomba		45 901 €
Coste Motor		16 905 €
Coste por BAST		62 805 €
Coste total BM		125 610 €
GRUPO RESERVA		
Coste B+M		62 805 €
COSTE UNIDAD OI BASTIDOR		405 407 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI		873 619 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI INSTALADO		2 271 408 €

Tabla 20. Coste de reemplazo de la membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.

Tasa de reemplazo (%/año)	0 €
Coste anual de reemplazo membranas	95 436 €
Coste anual de reemplazo filtros (15%de membranas)	14 315 €
Coste total anual reemplazo	109 751 €

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Tabla 21. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.

Costes de capital directos (Construcción)

	€	%
Preparación del terreno, accesos, parking, etc.	50 104.59 €	0.75%
Captación de agua	267 224.49 €	4.00%
Pretratamiento	467 642.86 €	7.00%
Equipos para el Sistema de OI	2 271 408.18 €	34.00%
Post-tratamiento	100 209.18 €	1.50%
Gestión de Concentrados	146 973.47 €	2.20%
Gestión de residuos	80 167.35 €	1.20%
Sistemas Eléctricos e Instrumentación	146 973.47 €	2.20%
Instalaciones y equipos auxiliares	106 889.80 €	1.60%
Edificios	267 224.49 €	4.00%
Puesta en marcha y pruebas de aceptación	100 209.18 €	1.50%
Subtotal de costes directos (construcción)	4 005 027.08 €	60.0%

Costes de capital indirectos (Construcción)

Costes de Ingeniería del proyecto

Ingeniería Preliminar	66 806.12 €	1.00%
Ensayos piloto	83 507.65 €	1.25%
Diseño de detalle	367 433.68 €	5.50%
Gestión y supervisión de la construcción	200 418.37 €	3.00%
Subtotal-servicios de ingeniería.	718 165.82 €	10.75%

Desarrollo del Proyecto

Administración, contratación y gestión	167 015.31 €	2.50%
Permisos ambientales	317 329.08 €	4.75%
Servicios Legales	116 910.72 €	1.75%
Subtotal Desarrollo del proyecto.	601 255.11 €	9.00%

Costes financieros del proyecto

Intereses durante la construcción	86.847,96 €	1.30%
Fondo de Reserva para el servicio de la deuda	400.836,74 €	6.00%
Otros costes financieros	267 224.49 €	4.00%
Subtotal-financiación del proyecto	754 909.19 €	11.30%
Contingencias	601 255.11 €	9.00%
Subtotal costes indirectos del capital	2 675 585.23 €	40.05%
Costes totales de capital	6 680 612.31 €	100.0%

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.**

Tabla 22. Coste de unidad de ósmosis inversa con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.

REF MEMBRANA	CPA6 MAX	
Coste de cada Elemento (€/elemento)		541 €
		238 590 €
		477 180 €
REF. TUBO DE PRESION	Codeline 8 1200PSI Max	
Coste de tubo de presión (€/TP)		1 651 €
Coste TP por bastidor		104 012 €
Coste total TP		208 024 €
REF. BOMBA Y MOTOR		
Coste Bomba		45 901 €
Coste Motor		12 096 €
Coste por BAST		57 997 €
Coste total BM		115 994 €
REF. RECUPERADOR ENERGIA	ERI PX-300	
Coste Recuperador Energía		191 873 €
Coste Bomba Booster + Motor		24 022 €
Coste por BAST		215 895 €
Coste total ERD		431 790 €
GRUPO RESERVA		
Coste B+M+ERD		249 870 €
COSTE UNIDAD OI BASTIDOR		616 493 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI		1 482 857 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI INSTALADO		3 855 428 €

Tabla 23. Coste de reemplazo de la membrana CPA6 MAX con conversión del 50 con recuperador de energía.

Tasa de reemplazo (%/año)	0 €
Coste anual de reemplazo membranas	95 436 €
Coste anual de reemplazo filtros (15%de membranas)	14 315 €
Coste total anual reemplazo	109 751 €

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

Tabla 24. Coste de inversión total de la potabilizadora con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.

Costes de capital directos (Construcción)

	€	%
Preparación del terreno, accesos, parking, etc.	85 046.21 €	0.75%
Captación de agua	453 579.80 €	4.00%
Pretratamiento	793 764.65 €	7.00%
Equipos para el Sistema de OI	3 855 428.32 €	34.00%
Post-tratamiento	170 092.43 €	1.50%
Gestión de Concentrados	249 468.89 €	2.20%
Gestión de residuos	136 073.94 €	1.20%
Sistemas Eléctricos e Instrumentación	249 468.89 €	2.20%
Instalaciones y equipos auxiliares	181 431.92 €	1.60%
Edificios	453 579.80 €	4.00%
Puesta en marcha y pruebas de aceptación	170 092.43 €	1.50%
Subtotal de costes directos (construcción)	6 798 027.28 €	60.0%

Costes de capital indirectos (Construcción)

Costes de Ingeniería del proyecto

Ingeniería Preliminar	113 394.95 €	1.00%
Ensayos piloto	141 743.69 €	1.25%
Diseño de detalle	623 672.23 €	5.50%
Gestión y supervisión de la construcción	340 184.85 €	3.00%
Subtotal-servicios de ingeniería.	1 218 995.72 €	10.75%

Desarrollo del Proyecto

Administración, contratación y gestión	283 487.38 €	2.50%
Permisos ambientales	538 626.01 €	4.75%
Servicios Legales	198 441.16 €	1.75%
Subtotal Desarrollo del proyecto.	1 020 554.55 €	9.00%

Costes financieros del proyecto

Intereses durante la construcción	147 413.44 €	1.30%
Fondo de Reserva para el servicio de la deuda	680 369.70 €	6.00%
Otros costes financieros	453 579.80 €	4.00%
Subtotal-financiación del proyecto	1 281 362.94 €	11.30%
Contingencias	1 020 554.55 €	9.00%
Subtotal costes indirectos del capital	4 541 467.77 €	40.05%
Costes totales de capital	11 339 495.05 €	100.0%

3. COSTES ANUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

En los costes anuales de operación y mantenimiento se han calculado en base a los costes variables y fijos de la potabilizadora de agua desglosados donde el coste de la energía supone el 50% del total de los costes.

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.**

Tabla 25. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.

	€	€/m ³	% del Total
Costes Variables			
Energía	824 600.48 €	0.11 €	50.00%
Productos Químicos	99 505.49 €	0.01 €	6.00%
Reemplazamiento de membranas y filtros de cartucho	120 701.70 €	0.02 €	7.00%
Gestión de las corrientes residuales	66 337.00 €	0.01 €	4.00%
Subtotal costes variables	1 111 144.67 €	0.15 €	67.00%
Costes Fijos			
Termino de potencia	82 921.24 €	0.01 €	5.00%
Personal	165 842.49 €	0.02 €	10.00%
Mantenimiento	51 550.89 €	0.01 €	5.00%
Vigilancia ambiental	33 168.50 €	0.00 €	2.00%
Costes indirectos	182 426.74 €	0.03 €	11.00%
Subtotal costes fijos	432 988.61 €	0.07 €	33.00%
Total costes O&M	1 658 424.88 €	0.23 €	100.0%
Amortización de la inversión	615 218.41 €	0.09 €	

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.**

Tabla 26. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.

	€	€/m ³	% del Total
Costes Variables			
Energía	719 128.33 €	0.10 €	50.00%
Productos Químicos	88 403.16 €	0.01 €	6.00%
Reemplazamiento de membranas y filtros de cartucho	120 701.70 €	0.02 €	7.00%
Gestión de las corrientes residuales	58 935.44 €	0.01 €	4.00%
Subtotal costes variables	987 168.63 €	0.14 €	67.00%
Costes Fijos			
Termino de potencia	73 669.30 €	0.01 €	5.00%
Personal	147 338.60 €	0.02 €	10.00%
Mantenimiento	51 371.02 €	0.01 €	5.00%
Vigilancia ambiental	29 467.72 €	0.00 €	2.00%
Costes indirectos	162 072.46 €	0.02 €	11.00%
Subtotal costes fijos	390 249.80 €	0.06 €	33.00%
Total costes O&M	1 473 386.02 €	0.20 €	100.0%
Amortización de la inversión	611 620.96 €	0.08 €	

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.**

Tabla 27. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.

	€	€/m ³	% del Total
Costes Variables			
Energía	623 244.55 €	0.09 €	50.00%
Productos Químicos	78 310.13 €	0.01 €	6.00%
Reemplazamiento de membranas y filtros de cartucho	120 701.70 €	0.02 €	7.00%
Gestión de las corrientes residuales	52 206.75 €	0.01 €	4.00%
Subtotal costes variables	874 463.14 €	0.12 €	67.00%
Costes Fijos			
Termino de potencia	65 258.44 €	0.01 €	5.00%
Personal	130 516.89 €	0.02 €	10.00%
Mantenimiento	51 221.51 €	0.01 €	5.00%
Vigilancia ambiental	26 103.38 €	0.00 €	2.00%
Costes indirectos	143 568.57 €	0.02 €	11.00%
Subtotal costes fijos	351 410.35 €	0.06 €	33.00%
Total costes O&M	1 305 168.86 €	0.18 €	100.0%
Amortización de la inversión	608 753,50 €	0.08 €	

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.**

Tabla 28. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.

	€	€/m ³	% del Total
Costes Variables			
Energía	412 300.24 €	0.06 €	50.00%
Productos Químicos	56 105.47 €	0.01 €	6.00%
Reemplazamiento de membranas y filtros de cartucho	120 701.70 €	0.02 €	7.00%
Gestión de las corrientes residuales	37 403.65 €	0.01 €	4.00%
Subtotal costes variables	626 511.05 €	0.09 €	67.00%
Costes Fijos			
Termino de potencia	46 754.56 €	0.01 €	5.00%
Personal	93 509.11 €	0.01 €	10.00%
Mantenimiento	50 859.75 €	0.01 €	5.00%
Vigilancia ambiental	18 701.82 €	0.00 €	2.00%
Costes indirectos	102 860.02 €	0.01 €	11.00%
Subtotal costes fijos	265 930.71 €	0.04 €	33.00%
Total costes O&M	935 091.13 €	0.13 €	100.0%
Amortización de la inversión	1 017 195.09 €	0.14 €	

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.**

Tabla 29. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.

	€	€/m ³	% del Total
Costes Variables			
Energía	1 045 133.17 €	0.15 €	50.00%
Productos Químicos	121 566.79 €	0.02 €	6.00%
Reemplazamiento de membranas y filtros de cartucho	109 751.32 €	0.02 €	7.00%
Gestión de las corrientes residuales	81 044.53 €	0.01 €	4.00%
Subtotal costes variables	1 357 495.80 €	0.19 €	67.00%
Costes Fijos			
Termino de potencia	101 305.66 €	0.01 €	5.00%
Personal	202 611.31 €	0.03 €	10.00%
Mantenimiento	29 493.45 €	0.00 €	5.00%
Vigilancia ambiental	40 522.26 €	0.01 €	2.00%
Costes indirectos	222 872.45 €	0.03 €	11.00%
Subtotal costes fijos	495 499.47 €	0.08 €	33.00%
Total costes O&M	2 026 113.14 €	0.27 €	100.0%
Amortización de la inversión	589 869.05 €	0.08 €	

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.**

Tabla 30. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.

	€	€/m ³	% del Total
Costes Variables			
Energía	910 895.88 €	0.13 €	50.00%
Productos Químicos	107 436.55 €	0.01 €	6.00%
Reemplazamiento de membranas y filtros de cartucho	109 751.32 €	0.02 €	7.00%
Gestión de las corrientes residuales	71 624.36 €	0.01 €	4.00%
Subtotal costes variables	1 199 708.11 €	0.17 €	67.00%

Costes Fijos

Termino de potencia	89 530.46 €	0.01 €	5.00%
Personal	179 060.91 €	0.02 €	10.00%
Mantenimiento	29 289.15 €	0.00 €	5.00%
Vigilancia ambiental	35 812.18 €	0.00 €	2.00%
Costes indirectos	196 967.00 €	0.03 €	11.00%
Subtotal costes fijos	441 129.25 €	0.07 €	33.00%
Total costes O&M	1 790 609.12 €	0.24 €	100.0%

Amortización de la inversión	585 783.06 €	0.08 €	
-------------------------------------	---------------------	---------------	--

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.**

Tabla 31. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.

	€	€/m ³	% del Total
Costes Variables			
Energía	795 835.35 €	0.11 €	50.00%
Productos Químicos	95 324.91 €	0.01 €	6.00%
Reemplazamiento de membranas y filtros de cartucho	109 751.32 €	0.02 €	7.00%
Gestión de las corrientes residuales	63 549.94 €	0.01 €	4.00%
Subtotal costes variables	1 064 461.52 €	0.15 €	67.00%

Costes Fijos

Termino de potencia	79 437.43 €	0.01 €	5.00%
Personal	158 874.85 €	0.02 €	10.00%
Mantenimiento	29 122.31 €	0.00 €	5.00%
Vigilancia ambiental	31 774.97 €	0.00 €	2.00%
Costes indirectos	174 762.34 €	0.02 €	11.00%
Subtotal costes fijos	394 534.48 €	0.07 €	33.00%
Total costes O&M	1 588 748.54 €	0.21 €	100.0%

Amortización de la inversión	582 446.22 €	0.08 €	
-------------------------------------	---------------------	---------------	--

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.**

Tabla 32. Costes anuales de Operación y Mantenimiento para la membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.

	€	€/m ³	% del Total
Costes Variables			
Energía	508 184.02 €	0.07 €	50.00%
Productos Químicos	65 045.82 €	0.01 €	6.00%
Reemplazamiento de membranas y filtros de cartucho	109 751.32 €	0.02 €	7.00%
Gestión de las corrientes residuales	43 363.88 €	0.01 €	4.00%
Subtotal costes variables	726 345.04 €	0.10 €	67.00%

Costes Fijos			
Termino de potencia	54 204.85 €	0.01 €	5.00%
Personal	108 409.71 €	0.02 €	10.00%
Mantenimiento	49 431.44 €	0.01 €	5.00%
Vigilancia ambiental	21 681.94 €	0.00 €	2.00%
Costes indirectos	119 250.68 €	0.02 €	11.00%
Subtotal costes fijos	298 773.77 €	0.05 €	33.00%
Total costes O&M	1 084 097.08 €	0.15 €	100.0%

Amortización de la inversión	988 628.85 €	0.14 €	
-------------------------------------	---------------------	---------------	--

4. COSTE DEL AGUA POTABILIZADA

El coste del agua potabilizada se calcula en base los costes totales de producción de la planta potabilizadora de agua.

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.**

Tabla 33. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.

Costes del agua potabilizada €/m³

Total costes producción	0.31 €
Beneficio industrial (10%)	0.03 €
IMPUESTOS (10%)	0.03 €
Total coste del agua potabilizada	0.373 €

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.**

Tabla 34. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.

Costes del agua potabilizada €/m³

Total costes producción	0.28 €
Beneficio industrial (10%)	0.03 €
IMPUESTOS (10%)	0.03 €
Total coste del agua potabilizada	0.343 €

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.**

Tabla 35. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.

Costes del agua potabilizada €/m³

Total costes producción	0.26 €
Beneficio industrial (10%)	0.03 €
IMPUESTOS (10%)	0.03 €
Total coste del agua potabilizada	0.316 €

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.**

Tabla 36. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.

Costes del agua potabilizada €/m³

Total costes producción	0.27 €
Beneficio industrial (10%)	0.03 €
IMPUESTOS (10%)	0.03 €
Total coste del agua potabilizada	0.329 €

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.**

Tabla 37. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.

Costes del agua potabilizada €/m³

Total costes producción	0.35 €
Beneficio industrial (10%)	0.04 €
IMPUESTOS (10%)	0.04 €
Total coste del agua potabilizada	0.428 €

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.**

Tabla 38. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.

Costes del agua potabilizada €/m³

Total costes producción	0.32 €
Beneficio industrial (10%)	0.03 €
IMPUESTOS (10%)	0.04 €
Total coste del agua potabilizada	0.389 €

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.**

Tabla 39. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.

Costes del agua potabilizada €/m³

Total costes producción	0.29 €
Beneficio industrial (10%)	0.03 €
IMPUESTOS (10%)	0.03 €
Total coste del agua potabilizada	0.356 €

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.**

Tabla 40. Coste del agua potabilizada con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.

Costes del agua potabilizada €/m³

Total costes producción	0.29 €
Beneficio industrial (10%)	0.03 €
IMPUESTOS (10%)	0.03 €
Total coste del agua potabilizada	0.348 €

5. RESUMEN PRESUPUESTO

A continuación, se va a mostrar un resumen de forma más simplificada del coste total de inversión, del coste de operación y mantenimiento de la planta potabilizadora de agua (O&M) y del coste del agua desalada para los seis posibles casos estudiados.

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.**

Tabla 41. Resumen presupuesto con la membrana CPA5 MAX con conversión del 40%.

COSTE O INVERSIÓN TOTALES	7 056 506.73 €
COSTES ANUALES DE O&M	1 658 424.88€
COSTE DEL AGUA POTABILIZADA	0.373 €/m³

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.**

Tabla 42. Resumen presupuesto con la membrana CPA5 MAX con conversión del 45%.

COSTE O INVERSIÓN TOTALES	7 015 244.24 €
COSTES ANUALES DE O&M	1 473 386.02 €
COSTE DEL AGUA POTABILIZADA	0.343 €/m³

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.**

Tabla 43. Resumen presupuesto con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50%.

COSTE O INVERSIÓN TOTALES	6 982 354.65 €
COSTES ANUALES DE O&M	1 305 168.86 €
COSTE DEL AGUA POTABILIZADA	0.316 €/m³

- **Membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.**

Tabla 44. Resumen presupuesto con la membrana CPA5 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.

COSTE O INVERSIÓN TOTALES	11 667 147.58 €
COSTES ANUALES DE O&M	935 091.13 €
COSTE DEL AGUA POTABILIZADA	0.329 €/m³

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.**

Tabla 45. Resumen presupuesto con la membrana CPA6 MAX con conversión del 40%.

COSTE O INVERSIÓN TOTALES	6 765 751.48 €
COSTES ANUALES DE O&M	2 026 113.14€
COSTE DEL AGUA POTABILIZADA	0.428 €/m³

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.**

Tabla 46. Resumen presupuesto con la membrana CPA6 MAX con conversión del 45%.

COSTE O INVERSIÓN TOTALES	6 718 885.51 €
COSTES ANUALES DE O&M	1 790 609.12 €
COSTE DEL AGUA POTABILIZADA	0.389 €/m³

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.**

Tabla 47. Resumen presupuesto con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50%.

COSTE O INVERSIÓN TOTALES	6 680 612.31 €
COSTES ANUALES DE O&M	1 588 748.54 €
COSTE DEL AGUA POTABILIZADA	0.356 €/m³

- **Membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.**

Tabla 48. Resumen presupuesto con la membrana CPA6 MAX con conversión del 50% con recuperador de energía.

COSTE O INVERSIÓN TOTALES	11 339 495.05 €
COSTES ANUALES DE O&M	1 084 097.08 €
COSTE DEL AGUA POTABILIZADA	0.348 €/m³

6. CONCLUSIÓN PRESUPUESTO

Los escenarios planteados con recuperador de energía no son rentables económicamente porque se trata de agua poco salobre, por tanto, la energía a suministrar es mucho menor y por ello no es viable realizar la inversión de este dispositivo cuando energéticamente hablando no es necesario.

Tras observar el estudio económico para cada uno de los ocho escenarios planteados se puede afirmar de forma evidente que la opción más viable económicamente es la planta potabilizadora de agua que trabaja con una conversión del 50% y con las membranas de ósmosis inversa CPA5 MAX donde se obtiene un coste de agua desalada de 0.316 €/m³.

DISEÑO DE UNA POTABILIZADORA DE AGUA UBICADA EN LA COMARCA EL MARESME

TRABAJO FIN DE MÁSTER

AUTOR: VICTORIA MACIÁ AIX

DIRECTORES: JAIME LORA GARCÍA Y VICENT FOMBUENA BORRÁS

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SEGURIDAD INDUSTRIAL Y MEDIO AMBIENTE

VALENCIA, SEPTIEMBRE 2021

DOCUMENTO 3. ANEXO

ÍNDICE DEL ANEXO

1.	UBICACIÓN DE LA PARCELA	114
2.	FICHAS TÉCNICAS DE LAS MEMBRANAS	115
•	MEMBRANA CPA5 MAX	115
•	MEMBRANA CPA6 MAX	116
3.	DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA POTABILIZADORA DE AGUA.....	117

Diseño de una Planta Potabilizadora de Agua ubicada en la comarca El Maresme

1. UBICACIÓN DE LA PARCELA



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE HACIENDA

SECRETARÍA DE ESTADO DE HACIENDA
DIRECCIÓN GENERAL DEL CATASTRO

CONSULTA DESCRIPTIVA Y GRÁFICA DE DATOS CATASTRALES DE BIEN INMUEBLE

Referencia catastral: 08120A025000050000Z1

DATOS DESCRIPTIVOS DEL INMUEBLE

Localización:
CM CONTRABANDISTES DELS 60 Polígono 25 Parcela 5
EL PERICO. 08304 MATARO [BARCELONA]

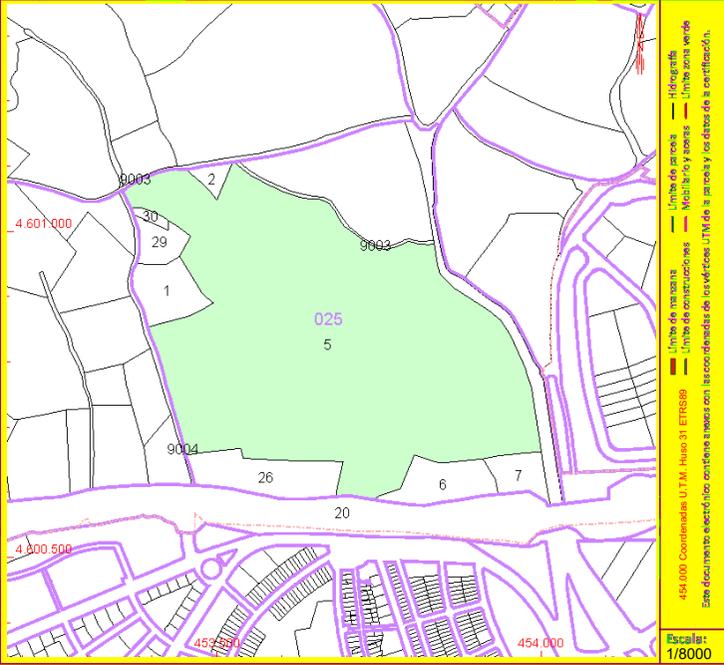
Clase: RÚSTICO
Uso principal: Agrario
Superficie construida:
Año construcción:

Cultivo

Subparcela	Cultivo/a aprovechamiento	Medida Productiva	Superficie m ²
a	C- Labor o Labradío secoano	02	10.395
b	C- Labor o Labradío secoano	03	9.486
c	V- Viña secoano	03	2.582
d	E- Pastos	02	873
e	MT Matorral	01	51.427
f	V- Viña secoano	03	17.058
g	MM Pinar maderable	02	2.252
h	I- Improductivo	00	457
i	I- Improductivo	00	1.842
j	E- Pastos	01	15.620
k	I- Improductivo	00	35
l	I- Improductivo	00	1.026
m	V- Viña secoano	03	6.487
n	MI Mimbreras o cañaverales	01	1.294
p	C- Labor o Labradío secoano	03	41.171
q	I- Improductivo	00	537
r	I- Improductivo	00	509
s	C- Labor o Labradío secoano	03	30.200
t	I- Improductivo	00	2.307
u	I- Improductivo	00	1.036
v	I- Improductivo	00	83

PARCELA

Superficie gráfica: 196.283 m²
Participación del inmueble: 100,00 %
Tipo:



Este documento electrónico contiene la imagen con las coordenadas de las parcelas UTM de la parcela y sus datos de la certificación.

454.000 Coordenadas U.T.M. Huso 31 ETRS89
Este documento electrónico contiene la imagen con las coordenadas de las parcelas UTM de la parcela y sus datos de la certificación.

Escala: 1/8000

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

Jueves , 22 de Julio de 2021

2. FICHAS TÉCNICAS DE LAS MEMBRANAS

- MEMBRANA CPA5 MAX

Nitto

HYDRANAUTICS
Nitro Group Company

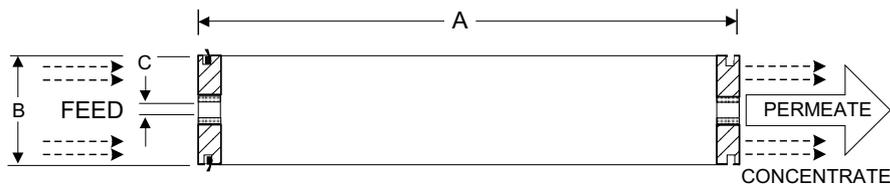
Membrane Element		CPA5 MAX
Performance:	Permeate Flow:	12,000 gpd (45.5 m ³ /d)
	Salt Rejection:	99.7 % (99.6% minimum)
Type	Configuration:	Spiral Wound
	Membrane Polymer:	Composite Polyamide
	Nominal Membrane Area:	440 ft ² (40.9 m ²)
Application Data*	Maximum Applied Pressure:	600 psig (4.14 MPa)
	Maximum Chlorine Concentration:	< 0.1 PPM
	Maximum Operating Temperature:	113 °F (45 °C)
	pH Range, Continuous (Cleaning):	2-11 (1-13)*
	Maximum Feedwater Turbidity:	1.0 NTU
	Maximum Feedwater SDI (15 mins):	5.0
	Maximum Feed Flow:	75 GPM (17.0 m ³ /h)
	Minimum Ratio of Concentrate to Permeate Flow for any Element:	5:1
Maximum Pressure Drop for Each Element:	15 psi	

* The limitations shown here are for general use. For specific projects, operating at more conservative values may ensure the best performance and longest life of the membrane. See Hydranautics Technical Bulletins for more detail on operation limits, cleaning pH, and cleaning temperatures.

Test Conditions

The stated performance is initial (data taken after 30 minutes of operation), based on the following conditions:

1,500 ppm NaCl
225 psi (1.55 MPa) Applied Pressure
77 °F (25 °C) Operating Temperature
15% Permeate Recovery
6.5 - 7.0 pH Range



A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)	Weight, lbs. (kg)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)	36 (16.4)

Notice: Permeate flow for individual elements may vary + or - 15 percent. Element weight may vary. All membrane elements are supplied with a brine seal, interconnector, and o-rings. Elements are enclosed in a sealed polyethylene bag containing less than 1.0% sodium meta-bisulfite solution, and then packaged in a cardboard box.

Hydranautics believes the information and data contained herein to be accurate and useful. The information and data are offered in good faith, but without guarantee, as conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydranautics assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydranautics' products for the user's specific end uses. 3/06/15

LENNTECH

info@lennotech.com Tel. +31-152-610-900

www.lennotech.com Fax. +31-152-616-289

• MEMBRANA CPA6 MAX



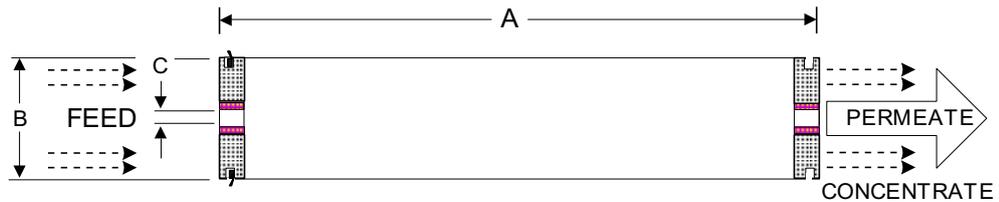
Membrane Element		CPA6 MAX
Performance:	Permeate Flow:	8,800 gpd (33.3 m ³ /d)
	Salt Rejection:	99.75 % (99.6% minimum)
Type	Configuration:	Spiral Wound
	Membrane Polymer:	Composite Polyamide
	Nominal Membrane Area:	440 ft ² (40.9 m ²)
Application Data*	Maximum Applied Pressure:	600 psig (4.14 MPa)
	Maximum Chlorine Concentration:	< 0.1 PPM
	Maximum Operating Temperature:	113 °F (45 °C)
	pH Range, Continuous (Cleaning):	2-11 (1-13)*
	Maximum Feedwater Turbidity:	1.0 NTU
	Maximum Feedwater SDI (15 mins):	5.0
	Maximum Feed Flow:	75 GPM (17.0 m ³ /h)
	Minimum Ratio of Concentrate to Permeate Flow for any Element:	5:1
Maximum Pressure Drop for Each Element:	15 psi	

* The limitations shown here are for general use. For specific projects, operating at more conservative values may ensure the best performance and longest life of the membrane. See Hydranautics Technical Bulletins for more detail on operation limits, cleaning pH, and cleaning temperatures.

Test Conditions

The stated performance is initial (data taken after 30 minutes of operation), based on the following conditions:

- 1,500 ppm NaCl
- 225 psi (1.55 MPa) Applied Pressure
- 77 °F (25 °C) Operating Temperature
- 15% Permeate Recovery
- 6.5 - 7.0 pH Range



A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)	Weight, lbs. (kg)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)	36 (16.4)

Notice: Permeate flow for individual elements may vary + or - 15 percent. Element weight may vary. All membrane elements are supplied with a brine seal, interconnector, and o-rings. Elements are enclosed in a sealed polyethylene bag containing less than 1.0% sodium meta-bisulfite solution, and then packaged in a cardboard box.

Hydranautics believes the information and data contained herein to be accurate and useful. The information and data are offered in good faith, but without guarantee, as conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydranautics assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydranautics' products for the user's specific end uses. 9/10/15

Hydranautics Corporate: 401 Jones Road, Oceanside, CA 92058
 1-800-CPA-PURE Phone: 760-901-2500 Fax: 760-901-2578 info@Hydranautics.com

3. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA POTABILIZADORA DE AGUA

