



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Química y Nuclear

Diseño de una planta desaladora mediante ósmosis inversa con una capacidad de producción de 5000 m³/día ubicada en la provincia de Alicante.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Seguridad Industrial y Medio Ambiente

AUTOR/A: Sas, Razvan Sorin

Tutor/a: Lora García, Jaime

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

RESUMEN

El agua es un recurso muy importante para la vida en nuestro planeta, puesto que hace posible la vida de las plantas y animales. El ser humano solamente tiene acceso directo a menos del 1% de la cantidad total de agua del planeta, lo cual genera un problema de distribución porque existen zonas con mucha agua disponible y otras que prácticamente no poseen agua. Esto ocasiona que exista estrés hídrico en las zonas que requieren agua pero que no son capaces de obtenerla.

El cambio climático y el aumento de población han dado lugar a que las aguas obtenidas de forma convencional no sean suficientes para abastecer a todas las actividades humanas que se desarrollan hoy en día. Para poder frente a este tipo de problemas, se desarrollaron las tecnologías de desalación, capaces de obtener agua dulce a partir de agua de mar.

En este trabajo final de máster se diseña una planta desaladora que funciona mediante un sistema de membranas con la tecnología de ósmosis inversa. Esta planta va a abastecer a tres poblaciones de la costa alicantina, zona con un elevado estrés hídrico y muy turística en la temporada de verano.

Además, se realiza un análisis de sensibilidad al sistema de membranas con ayuda del simulador comercial WAVE. En este análisis de sensibilidad se escogen 3 membranas y se ponen a prueba en el sistema de ósmosis inversa para poder ver su funcionamiento y poder compararlas entre sí.

Palabras Clave: Desalación, Ósmosis inversa, Simulación, Análisis de sensibilidad.

RESUM

L'aigua és un recurs molt important per a la vida al nostre planeta, ja que fa possible la vida de les plantes i animals. L'ésser humà només té accés directe a menys de l'1% de la quantitat total d'aigua del planeta, cosa que genera un problema de distribució perquè hi ha zones amb molta aigua disponible i d'altres que pràcticament no tenen aigua. Això fa que hi hagi estrès hídric a les zones que requereixen aigua però que no són capaces d'obtenir-la.

El canvi climàtic i l'augment de població han fet que les aigües obtingudes de forma convencional no siguin suficients per abastir totes les activitats humanes que es desenvolupen avui dia. Per poder fer front a aquest tipus de problemes, es van desenvolupar les tecnologies de dessalació, capaces d'obtenir aigua dolça a partir d'aigua de mar.

En aquest treball final de màster es dissenya una planta desaladora que funciona mitjançant un sistema de membranes amb tecnologia d'osmosi inversa. Aquesta planta proveirà tres poblacions de la costa alacantina, zona amb un elevat estrès hídric i molt turística la temporada d'estiu.

A més, es fa una anàlisi de sensibilitat al sistema de membranes amb ajuda del simulador comercial WAVE. En aquesta anàlisi de sensibilitat s'escullen 3 membranes i es posen a prova al sistema d'osmosi inversa per poder veure'n el funcionament i poder comparar-les entre si.

Paraules clau: Dessalació, Osmosi inversa, Simulació, Anàlisi de sensibilitat.

ABSTRACT

Water is a very important resource for life on our planet, since it makes life possible for plants and animals. Human beings only have direct access to less than 1% of the total amount of water on the planet, which creates a distribution problem because there are areas with a lot of available water and others that have practically no water. This causes water stress to exist in areas that require water but are unable to obtain it.

Climate change and the increase in population have meant that the water obtained conventionally is not enough to supply all the human activities that take place today. In order to deal with this type of problem, desalination technologies were developed, capable of obtaining fresh water from seawater.

In this final master's project, a desalination plant is designed that works through a membrane system with reverse osmosis technology. This plant will supply three towns on the Alicante coast, an area with high water stress and very touristy in the summer season.

In addition, a sensitivity analysis to the membrane system is carried out with the help of the WAVE commercial simulator. In this sensitivity analysis, 3 membranes are chosen and tested in the reverse osmosis system in order to see how they work and to compare them with each other.

Keywords: Desalination, Reverse osmosis, Simulation, Sensitivity analysis.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	
Índice general	
Índice de figuras	
Índice de tablas	
Memoria	
1-Introducción.....	1
1.1-El problema del agua	1
1.2-Técnicas de desalación	6
1.2.1-Desalación por compresión de vapor.....	8
1.2.2-Desalación multi-efecto	9
1.2.3-Desalación multi-etapa.....	10
1.2.4-Congelación	11
1.2.5-Electrodialisis.....	11
1.2.6-Ósmosis inversa.....	12
1.3-Comparativa entre técnicas de desalación.....	15
1.4-Planteamiento del problema y ubicación de la planta	16
2-Objetivo	19
2.1-Objetivo del trabajo fin de máster.....	19
2.2-Objetivos específicos	19
3-Proceso de desalación	20
3.1-Captación	20
3.2-Pretratamiento	23
3.3-Sistema de membranas	24
3.4-Remineralización del agua producto	29
3.5-Suministro de agua	29
3.6-Gestión de la salmuera	29

4-Requisitos de diseño	32
5-Diseño	33
5.1-Cálculos preliminares.....	33
5.2-Pozo de captación.....	35
5.3-Pretratamiento	36
5.4-Sistema de membranas	44
5.5-Remineralización	50
6-Simulación.....	52
7-Resultados.....	57
7.1-Membrana SW30HRLE400.....	57
7.1.1-Serie 1	57
7.1.2-Serie 2	58
7.1.3-Serie 3	59
7.2-Membrana SW30XHR400	60
7.2.1-Serie 1	60
7.2.2-Serie 2	60
7.2.3-Serie 3	61
7.3-Membrana SW30XLE400	62
7.3.1-Serie 1	62
7.3.2-Serie 2	63
7.3.3-Serie 3	63
8-Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	65
9-Conclusión.....	66
Referencias	
Presupuesto	
Diagrama de flujo	
Anexos	

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Evolución de la población mundial.
- Figura 2. Evolución del consumo de agua dulce mundial.
- Figura 3. Estrés hídrico en el mundo.
- Figura 4. Estrés hídrico en España.
- Figura 5. Capacidad acumulada de agua desalada en el mundo.
- Figura 6. Desalación por compresión de vapor.
- Figura 7. Desalación multi-efecto.
- Figura 8. Desalación multi-etapa.
- Figura 9. Desalación mediante electrodiálisis.
- Figura 10. Difusión entre dos disoluciones con distinta concentración
- Figura 11. Difusión entre dos disoluciones separadas por una membrana.
- Figura 12. Fenómeno de ósmosis inversa.
- Figura 13. Ubicación de las localidades.
- Figura 14. Torre de toma de agua de mar.
- Figura 15. Toma cerrada.
- Figura 16. Toma cerrada mediante uso de tuberías.
- Figura 17. Sistema de Ósmosis Inversa.
- Figura 18. Agrupación de membranas en serie.
- Figura 19. Agrupación de membranas en paralelo.
- Figura 20. Agrupación serie-paralelo.
- Figura 21. Sistema de membranas con múltiples etapas.
- Figura 22. Sistema de membranas con múltiples pasos.
- Figura 23. Zona de los pozos playeros.
- Figura 24. Diagrama de Moody.
- Figura 25. Pestaña inicial de WAVE.
- Figura 26. Pestaña inicial configurada.
- Figura 27. Pestaña de agua de alimentación configurada.
- Figura 28. Pestaña de proceso configurada.
- Figura 29. Resultados serie 1-Membrana 1.
- Figura 30. Resultados serie 2-Membrana 1.
- Figura 31. Resultados serie 3-Membrana 1.

Figura 32. Resultados serie 1-Membrana 2.

Figura 33. Resultados serie 2-Membrana 2.

Figura 34. Resultados serie 3-Membrana 2.

Figura 35. Resultados serie 1-Membrana 3.

Figura 36. Resultados serie 2-Membrana 3.

Figura 37. Resultados serie 3-Membrana 3.

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1. Reservas de agua del planeta.
- Tabla 2. Parámetros de comparación entre tecnologías.
- Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de la toma abierta.
- Tabla 4. Ventajas e inconvenientes de la toma cerrada.
- Tabla 5. Habitantes de las localidades.
- Tabla 6. Turistas de Torrevieja en verano.
- Tabla 7. Parámetros de cálculo iniciales.
- Tabla 8. Características del anti incrustante.
- Tabla 9. Características del hipoclorito sódico.
- Tabla 10. Características del ácido sulfúrico.
- Tabla 11. Características del bisulfito sódico.
- Tabla 12. Características del filtro de cartucho.
- Tabla 13. Información sobre tuberías.
- Tabla 14. Características de la membrana.
- Tabla 15. Composición del agua de mar.
- Tabla 16. Concentraciones en el rechazo.
- Tabla 17. Concentraciones en el permeado.
- Tabla 18. Concentraciones límite.
- Tabla 19. Parámetros óptimos del contactor de calcita.
- Tabla 20. Características de la sosa.

MEMORIA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1-EL PROBLEMA DEL AGUA

El agua es la sustancia más distribuida en nuestro planeta puesto que es un recurso natural de suma importancia para la vida tanto animal como vegetal. En la naturaleza puede encontrarse en estado sólido en forma de hielo y nieve en las zonas más frías del planeta, en estado líquido en forma de océanos, mares, ríos, lagos y aguas subterráneas y en estado gaseoso en forma de vapor de agua en la atmósfera. Poder cuantificar las reservas de agua de nuestro planeta es una tarea complicada puesto que el agua se encuentra constantemente cambiando de fase y siguiendo el ciclo natural del agua. [1]

Por lo que respecta a las reservas de agua de nuestro planeta, en la Tabla 1 se muestran los volúmenes de agua que existen de cada tipo:

Tabla 1. Reservas de agua del planeta. [Adaptado de: [2]]

Forma	Volumen (km ³)	Porcentaje
Océanos y mares	1.338*10 ⁹	96.54
Agua dulce subterránea	10.53*10 ⁶	0.76
Agua salada subterránea	12.853*10 ⁶	0.93
Humedad del suelo	16.5*10 ³	0.0012
Glaciares	24.064*10 ⁶	1.74
Hielo perpetuo	3*10 ⁵	0.022
Agua dulce lagos	9.1*10 ⁴	0.0066
Agua salada lagos	8.54*10 ⁴	0.0062
Ciénagas	11.47*10 ³	0.00083
Ríos	2.12*10 ³	0.00015
Agua biológica	1.12*10 ³	0.00008
Agua atmosférica	12.9*10 ³	0.0009
Total	1.386*10 ⁹	100

Diseño de una planta desaladora mediante ósmosis inversa con una capacidad de producción de 5000 m³/día ubicada en la provincia de Alicante.

Por lo que se puede ver en la Tabla 1, el agua dulce en el planeta asciende a un total de 35.029*10⁶ km³ que es la suma del agua dulce subterránea, la humedad del suelo, los glaciares, el hielo perpetuo, los lagos de agua dulce, las ciénagas, los ríos, el agua biológica y el agua atmosférica. Esta cantidad de agua dulce representa alrededor del 2,5% del volumen total del agua que hay en el planeta y el 97,5% restante se encuentra en forma de agua salada, con lo cual no está disponible para su consumo o uso. Del agua dulce total que existe en el planeta, solamente se puede acceder a usar la que se encuentra en forma de agua dulce subterránea, lagos de agua dulce y ríos, con lo cual del total de agua dulce que existe en el planeta, solo es accesible alrededor del 30%, lo que representa un volumen de 10.623*10⁶ km³. Teniendo en cuenta estos datos, el ser humano solamente tiene acceso directo al 0.77% aproximadamente del agua total del planeta.

El problema que se tiene ya no radica en que solamente haya acceso a una cantidad mínima de agua con respecto a la cantidad total de agua que existe en el planeta, sino que, además, la población mundial cada vez aumenta más. Si la población aumenta cada vez más, pero los recursos hídricos son los mismos y deben dividirse entre toda la humanidad, pues al final se producirá escasez del recurso porque a cada individuo a medida que pasa el tiempo le pertenece una menor cantidad de agua. En la Figura 1 se muestra la evolución de la población mundial a lo largo de la mitad del siglo XX y lo que va de siglo XXI:

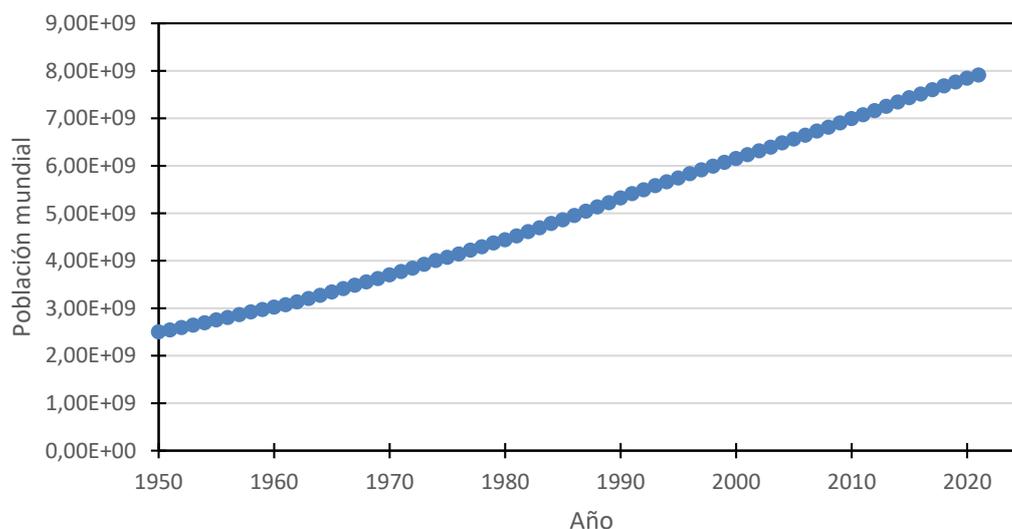


Figura 1. Evolución de la población mundial. [Adaptado de: [3]]

En la Figura 1 se puede ver que la población mundial no ha parado de crecer desde mediados del siglo pasado. En el año 1950, la población mundial era de aproximadamente 2.500 millones de habitantes y en 1960 la población creció hasta los 3.000 millones de habitantes. En el transcurso de esos 10 años se produjo un incremento de la población de 500 millones de habitantes. En 1970 la población alcanzó los 3.700 millones de habitantes, incrementándose la población en 700 millones de habitantes con respecto a 1960, 200 millones más que en el lapso de 10 años anterior. En el año 1980 la población mundial se situaba en los 4.440 millones de habitantes, habiendo un incremento de 740 millones de habitantes en un lapso de 10 años. En

el año 1990 la población mundial se situaba en los 5.320 millones de habitantes, produciéndose un incremento de 880 millones de habitantes con respecto al año 1980. En el año 2000 la población mundial alcanzó los 6.150 millones de habitantes, habiendo un incremento de 830 millones de habitantes en tan solo una década. Por lo que respecta al año 2010, la población mundial alcanzó los 6.990 millones de habitantes, produciéndose otro incremento de más de 800 millones de habitantes en tan solo 10 años. En el año 2020 la población mundial alcanzó los 7.840 millones de habitantes, produciéndose otro incremento de más de 800 millones de habitantes en un lapso de 10 años.

Es lógico pensar que, a medida que la población mundial aumenta, el consumo de agua dulce se incrementa. En la Figura 2 se muestra el consumo mundial de agua dulce:

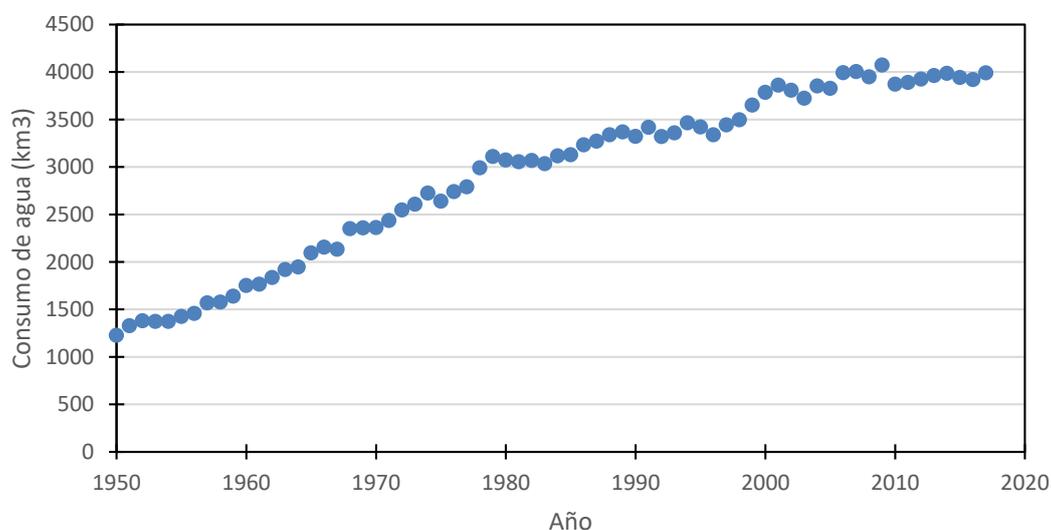


Figura 2. Evolución del consumo de agua dulce mundial. [Adaptado de: [4]]

En la Figura 2 se puede ver que, en el año 1950, el consumo de agua se situaba alrededor de 1.225 km³ y una década más tarde, en 1960, el consumo se situaba en 1.750 km³, con lo cual, en tan solo 10 años, el consumo de agua creció casi un 43%. En 1970 el consumo se situaba alrededor de 2.360 km³, con lo cual, el consumo había aumentado en 610 km³ con respecto a 1960. En el año 1980 el consumo se situaba cerca de los 3.000 km³, con lo cual, el consumo creció en 640 km³ con respecto a 1970. Por lo que respecta al año 1990, el consumo de agua se situó en 3.320 km³, con lo cual el consumo con respecto a 1980 se incrementó en 320 km³. En el año 2000 el consumo de agua se situaba en los 3.800 km³, con lo cual el consumo creció en 480 km³ con respecto al año 1990. Para terminar, en el año 2010, el consumo de agua se situó en los 3.870 km³. En estos últimos 10 años el consumo creció, pero ya no experimentó subidas tan elevadas como en las décadas pasadas.

Diseño de una planta desaladora mediante ósmosis inversa con una capacidad de producción de 5000 m³/día ubicada en la provincia de Alicante.

Por lo que respecta a los usos del agua, destacan 3 usos principales: municipal, industrial y agricultura. El uso de agua municipal se debe principalmente a las actividades domésticas, así como por ejemplo limpiar la ropa, beber agua, la limpieza del hogar, ducharse y cocinar. El uso de agua en la industria se destina principalmente a generación de vapor, limpieza de equipos, dilución de compuestos y refrigeración de equipos e instalaciones. El uso de agua en la agricultura es el más importante de todos porque cada año, alrededor del 70% del consumo de agua total se destina a la agricultura de regadío en su mayoría. [1]

Con la población mundial y el consumo de agua dulce en crecimiento, también se suma el problema del cambio climático. El cambio climático está generando que zonas que ya de por sí tienen problemas con el abastecimiento de agua, sufran todavía más a causa de las sequías. Por otro lado, existen zonas del planeta donde cada vez hay más inundaciones como consecuencia del cambio climático. Así se acaba generando una gran diferencia entre zonas geográficas, teniendo algunas de ellas muchos problemas para conseguir agua y otras con problemas de inundaciones o sin problemas aparentes con el abastecimiento de agua. [5]

Para poder saber si una zona tiene problemas con el abastecimiento de agua, se utiliza un indicador llamado estrés hídrico. El estrés hídrico se produce cuando una determinada zona tiene dificultades para satisfacer sus necesidades de agua puesto que el agua que se demanda es mayor a la que esa zona posee de forma natural, produciéndose así estrés hídrico. [6]

En la Figura 3 se puede ver el estrés hídrico que existe en el planeta:

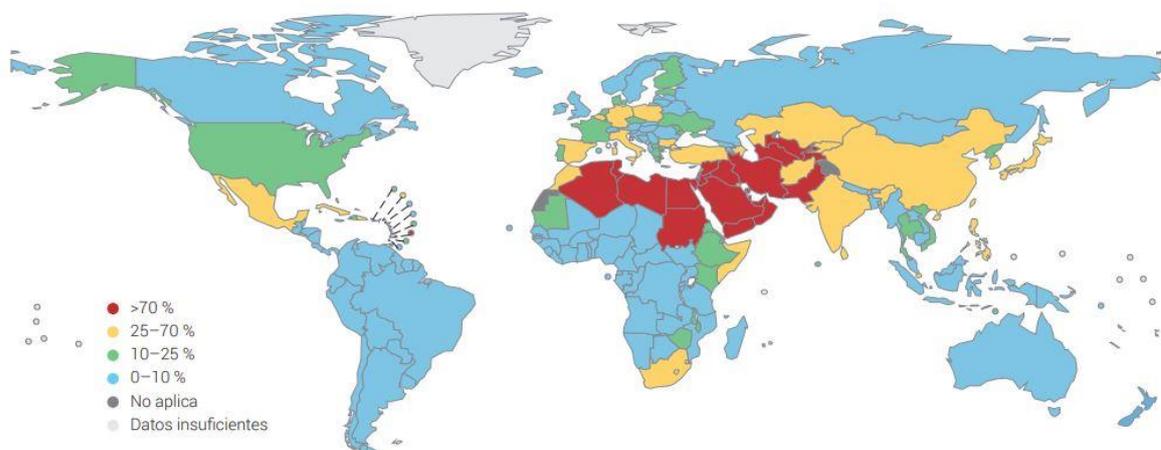


Figura 3. Estrés hídrico en el mundo. [Tomada de: [5]]

En la Figura 3 se puede ver que las zonas que más estrés hídrico presentan son: México y las islas del Caribe dentro del continente americano; dentro de Asia, los países que más estrés hídrico presentan son China e India; dentro de África, los países que mayor estrés hídrico presentan se encuentran en el norte del continente y Sudáfrica en el sur; toda la zona de Oriente Medio presenta un elevado estrés hídrico y para terminar, en Europa los países que están junto al mar Mediterráneo y que mayor estrés hídrico presentan son España e Italia. La situación que también puede darse es que exista un estrés hídrico bajo en una zona en la que prácticamente no hay

agua. Esto puede ocurrir porque la demanda de agua por parte de la población que allí reside sea tan pequeña que, aunque haya pocos recursos hídricos, la zona no presenta estrés hídrico. Este es el caso de algunos países de África Central, que se encuentran en una zona muy seca y árida en la que prácticamente no llueve nada.

La situación en España se puede ver en la Figura 4, en la que se muestra el coeficiente de explotación de las distintas cuencas de los ríos presentes en la península Ibérica.

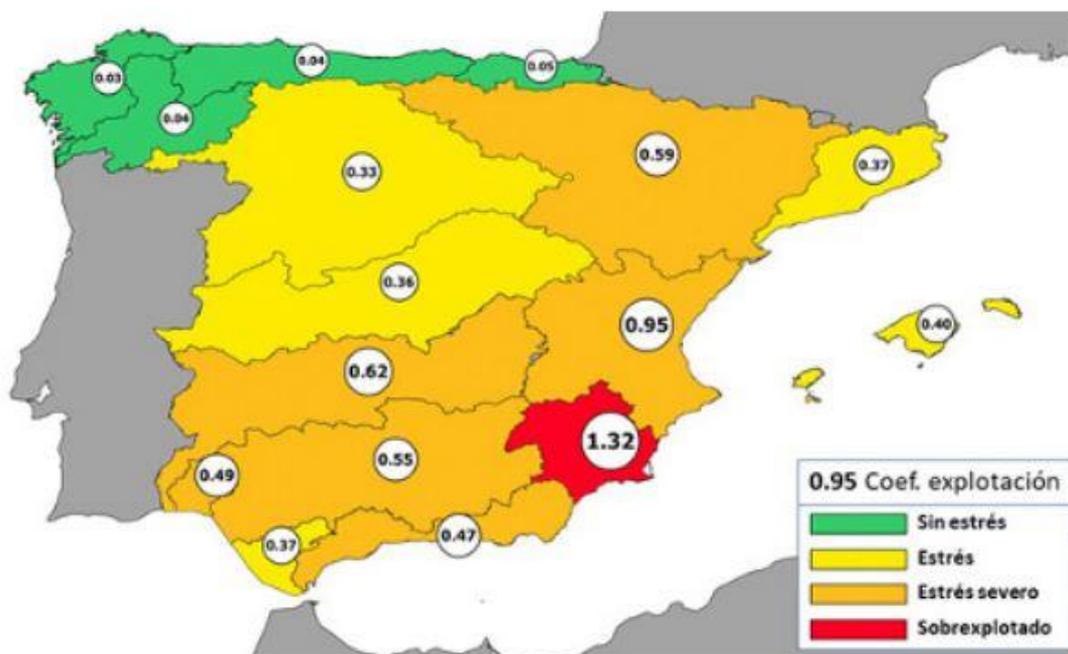


Figura 4. Estrés hídrico en España. [Tomada de: [7]]

Por lo que se puede ver en la Figura 4, casi todas las zonas de España presentan cierto estrés hídrico, siendo la zona norte la que menos estrés hídrico posee y la zona del litoral mediterráneo, especialmente la provincia de Alicante dentro de la Comunidad Valenciana es la que más sufre de estrés hídrico. Esta diferencia entre zonas se debe principalmente a que España posee zonas con mucho contraste geográfico y climático, siendo la zona norte más húmeda mientras que la zona central y sur son más semiáridas. [7]

Ante la situación de precariedad que presenta España en lo referente a la cantidad de recursos hídricos que posee, se hace necesaria la utilización de fuentes de agua no convencionales, como por ejemplo, las desaladoras. Esta tecnología ha ido madurando cada vez más a lo largo de los años como consecuencia de la gran necesidad que se tiene de obtener agua dulce en zonas con un elevado estrés hídrico para abastecer a la población.

1.2-TÉCNICAS DE DESALACIÓN

Las técnicas de desalación se postulan para hacer frente a los problemas de escasez de agua, tanto en el mundo como en España. Durante el último siglo se han ido desarrollando numerosas tecnologías para obtener agua dulce a partir del agua de mar utilizando técnicas de desalación. [8]

La desalación del agua de mar lleva observándose desde los tiempos de la Grecia antigua, cuando Aristóteles se dio cuenta de que el vapor de agua condensado a partir de agua de mar producía agua dulce. Pasó mucho tiempo hasta que las técnicas de desalación se empezaron a desarrollar, ya que no fue hasta después de la Segunda Guerra Mundial cuando empezó a invertirse dinero y recursos en investigar estas tecnologías. [15]

En los años 60, concretamente en Estados Unidos con John F. Kennedy como presidente, se destinaron muchos recursos y se produjeron grandes inversiones en el desarrollo de las tecnologías de desalación. Desde entonces, las diversas tecnologías de desalación se han ido usando cada vez más y más, en las zonas con problemas de escasez de agua. [15]

En la Figura 5 se pueden ver los metros cúbicos de agua desalada obtenidos en el mundo desde los años 70:

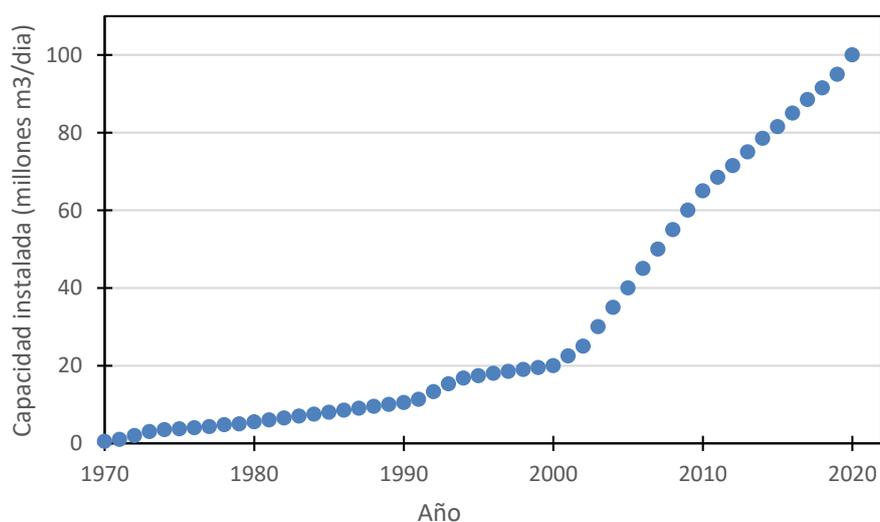


Figura 5. Capacidad acumulada de agua desalada en el mundo. [Adaptado de: [16]]

Como se puede observar en la Figura 5, la capacidad instalada de las plantas desaladoras no ha parado de crecer desde la década de los 70. En 1970 la capacidad instalada rondaba el millón de m³/día y 10 años más tarde ya alcanzaba los 5 millones de m³/día. El crecimiento hasta los 20 millones de m³/día fue lento (año 2000) pero a partir de ese año, la capacidad instalada empezó a crecer mucho. En el año 2010 la capacidad instalada era de unos 65 millones de m³/día, triplicando la capacidad que había en el año 2000. En el período de 1970-2000 la capacidad instalada creció en 20 millones de m³/día, pero en el lapso 2000-2010 la capacidad instalada subió en 45 millones de m³/día, más que doblando la subida del lapso 1970-2000 en tan solo 10

años. En el lapso 2010-2020 la capacidad instalada subió otros 35 millones de m³/día alcanzando los 100 millones de m³/día en el año 2020.

Por lo que respecta a la situación de España, la primera planta de desalación de aguas que se construyó en España fue en la isla de Lanzarote en el año 1964, con una capacidad de producción de 2000 m³/día. Esta planta funcionaba mediante la desalación por evaporación, con lo cual, su coste energético era muy elevado. [49]

Debido al éxito que tuvo la planta de Lanzarote, en los años 70 se impulsó desde la administración la construcción de otras 3 plantas, una en Ceuta, otra en Fuerteventura y la última en Gran Canaria. Las de Ceuta y Fuerteventura eran capaces de suministrar 4000 m³/día mientras que la de Gran Canaria suministrada 20000 m³/día. Estas plantas siguieron trabajando satisfactoriamente y ayudando a solucionar los problemas de suministro de agua causados en gran medida por el turismo de la zona. [49]

Al producirse la crisis del petróleo, el coste del combustible se disparó y con él el coste del agua producida. A pesar de que las plantas mejoraron su eficiencia energética, llegando a consumir solamente la mitad que cuando fueron construidas, no se veía más futuro en las plantas desaladoras por evaporación debido a su elevado coste energético, así que se impulsó la tecnología de la ósmosis inversa. [49]

Durante la década de los 80 y 90 comienza la era de la ósmosis inversa. En ese momento se empezaron a construir plantas desaladoras que funcionan con esta tecnología en diversas zonas de España, entre las cuales se encuentran: Ibiza, Mallorca y Denia. Todas ellas poseían problemas con el suministro de agua, ya fuera para el suministro a la población o para los cultivos. Entre los años 1995 y 2000 se llegaron a construir en España alrededor de 200 plantas desaladoras con capacidades de producción comprendidas entre los 500 y 10000 m³/día. [49]

A partir de los años 2000 se impulsaron desde el gobierno diversas iniciativas para la construcción de plantas desaladoras para hacer frente a la escasez de agua que se produce debido a las sequías entre los años 2004 y 2008. El gobierno invirtió una gran cantidad de dinero en llevar a cabo la construcción de diversas plantas, entre las cuales se encuentran la de Torre Vieja, la de Menorca y Barcelona. Actualmente, la capacidad de producción que posee España es de 3 millones de m³/día y es gracias al programa AGUA, un plan desarrollado entre los años 2004 y 2011 que incluía la construcción de múltiples plantas desaladoras a lo largo de todo el territorio español. [49]

Por lo que respecta a las perspectivas de futuro, la desalación de aguas se muestra como una opción viable para la obtención de agua en las zonas donde los recursos hídricos son más bien escasos, especialmente en el litoral mediterráneo, donde además se prevé un fuerte aumento de población y urbanístico. Por lo que respecta a la tecnología de ósmosis inversa, los dos inconvenientes principales que posee son: el coste energético y el vertido de salmuera al medio natural. El primer inconveniente siempre acompañará a esta tecnología a pesar de las grandes mejoras realizadas en este campo llegando a un coste energético cercano a los 3 kWh/m³. El segundo inconveniente es medioambiental, ya que las salmueras poseen unas concentraciones muy elevadas de sal. Sin embargo, si se realiza un plan de seguimiento en la zona del vertido y éste se realiza de forma controlada, no existen problemas para la fauna y flora marinas. [49]

El proceso de desalación consiste en la separación del agua de mar mediante la utilización de energía térmica, eléctrica o mecánica para obtener dos corrientes como productos. Una de esas corrientes es el agua con una baja concentración de sales (agua desalada) a la que se la denomina permeado y la otra corriente es el agua con una concentración de sales muy elevada a la que se la denomina rechazo. [8]

Las tecnologías de desalación son diversas y para poder establecer una clasificación, se dividen en dos grupos: procesos en los que el agua cambia de estado y procesos en los que el agua no cambia de estado. [8]

Los procesos en los que el agua cambia de estado son los siguientes:

- Desalación por compresión de vapor.
- Desalación multi-etapa.
- Desalación multi-efecto.
- Congelación.

Los procesos de desalación en los cuales el agua no cambia de estado son los siguientes:

- Electrodialisis.
- Ósmosis inversa.

Todas estas técnicas de desalación se describen en los siguientes sub-apartados.

1.2.1-DESALACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

Esta técnica de desalación consiste en generar vapor de agua a partir del agua de mar y hacerlo pasar por un compresor para incrementar su entalpía con el fin de poder usarlo para seguir evaporando agua de mar. En la Figura 6 se muestra un esquema del proceso.

Para empezar, se introduce al sistema el agua de mar, que sigue su recorrido hasta llegar a los rociadores, que la rocían dentro de la cámara de evaporación justo encima del tubo de circulación de vapor. Para que el agua de mar rociada se evapore se requiere que haya un aporte inicial de vapor vivo dentro del tubo de circulación de vapor. Este vapor vivo condensará a lo largo del tubo puesto que habrá cedido parte de su calor al agua de mar rociada encima del tubo haciendo que ésta se evapore. [9]

Una vez se ha evaporado parte del agua de mar, este vapor asciende y va al sistema de compresión de vapor. El vapor del agua de mar se comprime en un compresor y se lleva por el circuito del vapor que pasa por dentro de la cámara de evaporación para seguir evaporando agua de mar para obtener más vapor y salmuera. La salmuera, por otro lado, una parte de ella se recircula de nuevo al sistema de evaporación y otra parte se saca del sistema. [9]

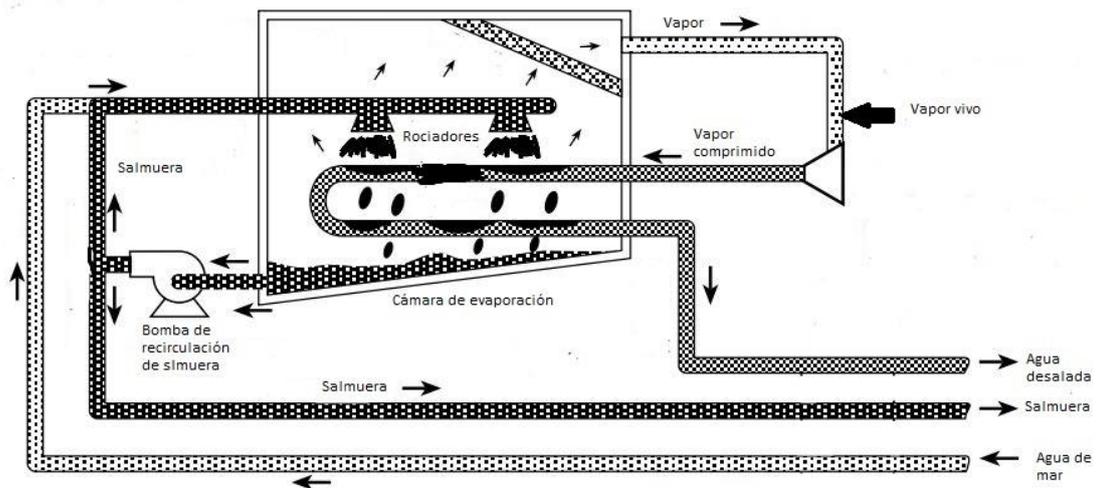


Figura 6. Desalación por compresión de vapor. [Tomada de: [9]]

1.2.2-DESALACIÓN MULTI-EFECTO

La desalación multi-efecto consiste en formar vapor de agua calentando el agua de mar para así usarlo en el evaporador (efecto) siguiente para seguir evaporando más agua de mar, pero a una temperatura y presión más bajas que en el primer efecto. Al usar vapor de agua del efecto anterior para calentar el agua de mar del siguiente efecto, se obtiene más vapor de agua a partir del agua de mar y se condensa el vapor de agua entrante del efecto anterior. [10]

En la Figura 7 puede verse un esquema del proceso:

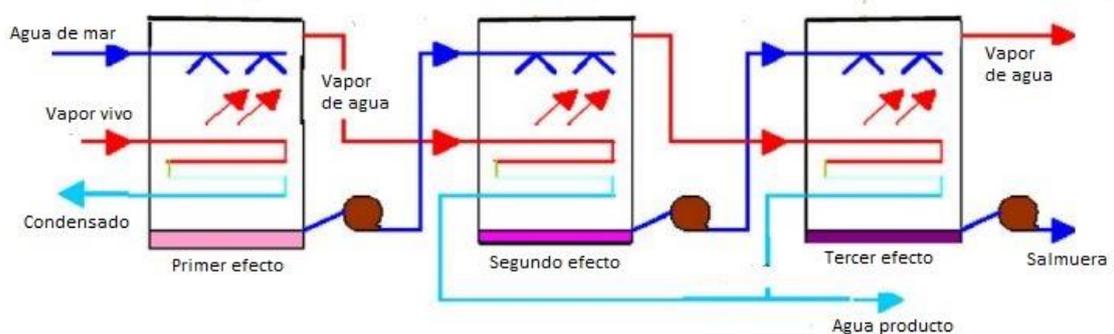


Figura 7. Desalación multi-efecto. [Tomada de: [11]]

En la Figura 7 se puede ver el funcionamiento de esta tecnología de desalación. En el primer efecto se introduce agua de mar, que se rocía por encima de una tubería de vapor vivo para así evaporar parte el agua de mar y condensar el vapor vivo. El vapor procedente del agua de mar se lleva al segundo efecto, donde el agua de mar se rocía sobre la tubería que contiene el vapor

del agua de mar generado en el efecto anterior. Al hacer esto, el vapor del agua de mar del efecto anterior condensa y el agua de mar rociada se evapora, formando así más vapor de agua que se usará en el tercer efecto para evaporar más agua de mar. Este proceso suele llevarse a cabo usando entre 4 y 21 efectos, encontrándose casi siempre el número óptimo entre los 10 y los 18 efectos. Al final del proceso se van a generar tres corrientes: la primera de ellas es el vapor de agua procedente de la evaporación del agua de mar del último efecto, que se usa para precalentar el agua de mar entrante al primer efecto, la segunda es la salmuera, que es agua de mar que no ha llegado a evaporarse durante las múltiples cámaras de evaporación y se ha ido acumulando en el fondo de la cámara y finalmente, la corriente de agua producto. [10]

1.2.3-DESALACIÓN MULTI-ETAPA

La desalación multi-etapa consiste, al igual que el método multi-efecto, en condensar el vapor de agua procedente del agua de mar para obtener la corriente de agua dulce producto. Solo que, en este caso, el proceso es un poco diferente al anterior. [12]

En la Figura 8 se muestra un esquema del proceso:

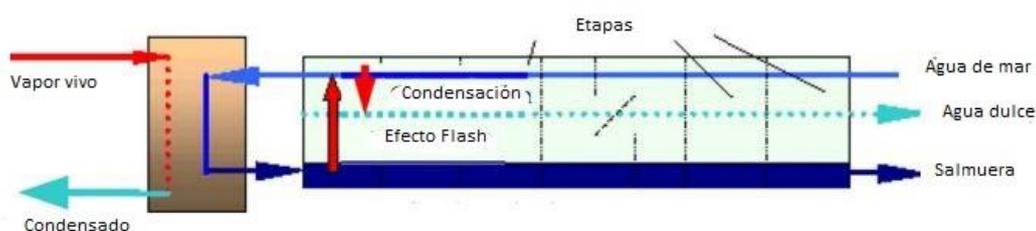


Figura 8. Desalación multi-etapa. [Tomada de: [11]]

En la Figura 8 se puede observar el funcionamiento de este método de desalación. Es parecido al método multi-efecto pero en este caso, solo se suministra vapor en la primera etapa y no en todas ellas tal y como ocurre en el método multi-efecto. [12]

En este método se suministra agua de mar, que primero pasa por todas las etapas del proceso antes de introducirse en un intercambiador de calor junto con vapor vivo. Del intercambiador de calor sale el condensado y agua de mar muy caliente que llega a la primera etapa, que se encuentra a una presión a la cual el agua de mar caliente se empieza a evaporar. Este vapor formado en la primera etapa condensa cuando toca el tubo de circulación de agua de mar que llega hasta la entrada del intercambiador de calor. [12]

El agua de mar que no consigue evaporarse en la primera etapa se enfría un poco y se traslada a la segunda etapa, que se encuentra a una presión menor que la primera etapa. El agua de mar que llega a la segunda etapa comienza a evaporarse, puesto que, a presiones menores el agua de mar hierve a una temperatura menor. Si se mantuviera la misma presión que en la primera etapa, el agua de mar no se evaporaría puesto que la temperatura de ebullición no habría descendido lo suficiente como para encontrarse por debajo de la temperatura del agua de mar

en ese momento. El vapor de agua formado asciende y toca el tubo por el cual circula el agua de mar y condensa. [12]

Toda el agua condensada se va recogiendo a lo largo de las etapas del proceso mediante una bandeja de condensación. Al final del proceso se obtienen tres corrientes producto: la primera de ellas es el vapor vivo que ha condensado como consecuencia de ceder su calor al agua de mar entrante al proceso, la segunda es el agua dulce producto y la tercera es la salmuera que ha ido acumulándose en el fondo de cada una de las etapas. Este método de desalación suele utilizar entre 20 y 40 etapas para su funcionamiento. [12]

1.2.4-CONGELACIÓN

Este método de desalación se basa en congelar el agua puesto con la formación de los cristales de hielo, las sales no cristalizan junto con el agua, con lo cual, se produce la separación entre el agua y la sal. Después de la formación de los cristales de hielo, éstos cristales se limpian con agua para eliminar posibles restos de sal que puedan haberse quedado adheridos en la superficie de los cristales de hielo. Finalmente, los cristales de hielo se funden para obtener el agua dulce. [10]

A pesar de que este método pueda llegar a tener un menor consumo de energía y muy pocos problemas de precipitación, el mayor inconveniente que posee es la manipulación y transporte de los cristales de hielo una vez formados. Esta técnica de desalación solo se utiliza a pequeña escala. [10]

1.2.5-ELECTRODIÁLISIS

La electrodiálisis es un método de desalación de aguas que se basa en eliminar iones de una corriente de agua salada utilizando membranas de intercambio iónico, un ánodo y un cátodo. [13]

En la Figura 9 se muestra con más detalle el funcionamiento de este método de desalación:

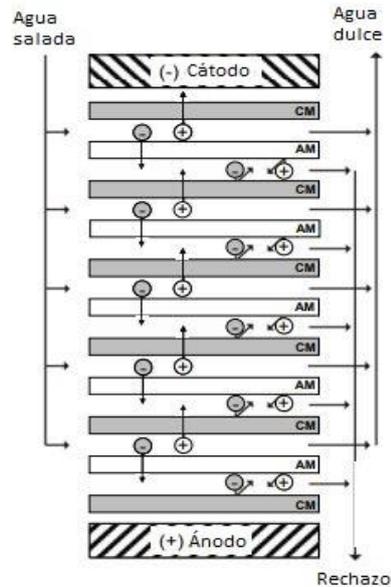


Figura 9. Desalación mediante electrodiálisis. [Tomada de: [13]]

Como se puede observar en la Figura 9, el agua salobre se introduce por un lado del compartimento de las membranas. A continuación, se aplica una diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo. Posteriormente, al haber establecido una diferencia de potencial, los iones positivos se moverán hacia el polo negativo y atravesarán una membrana de intercambio catiónico (solo deja pasar cationes) mientras que los aniones se moverán hacia el polo positivo y atravesarán una membrana de intercambio aniónico (solo deja pasar aniones). Los iones, tanto positivos como negativos, al haber atravesado su correspondiente membrana, ya no se encuentran en su gran mayoría en la corriente de agua de entrada, con lo cual la corriente de agua de salida será agua dulce. Además, se generará una corriente de agua con un contenido muy elevado de iones denominada rechazo. [13]

1.2.6-ÓSMOSIS INVERSA

Para poder entender el fenómeno de la ósmosis inversa, primero se debe entender el fenómeno de difusión que existe entre dos disoluciones que poseen concentraciones distintas de sal. [8]

En la Figura 10 se muestra el funcionamiento de la difusión en un sistema con dos disoluciones con concentraciones distintas de sal:

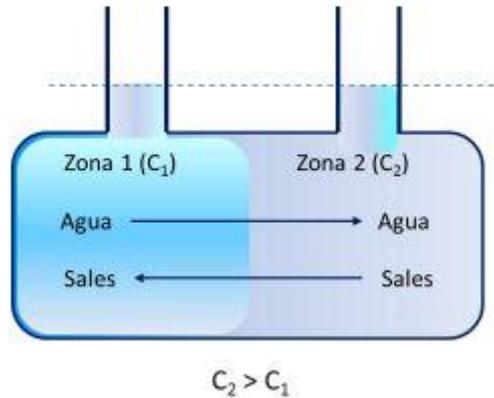


Figura 10. Difusión entre dos disoluciones con distinta concentración. [Tomada de: [8]]

En la Figura 10 se puede observar que existe un único compartimento que contiene dos disoluciones, una más concentrada (disolución 2) ubicada en la zona 2 y otra más diluida (disolución 1) ubicada en la zona 1. Al poner ambas disoluciones en contacto, puesto que no existe una barrera física que impida el paso tanto de agua como de sales, las dos disoluciones se mezclan. [8]

Al mezclarse ambas disoluciones, se produce un efecto de difusión tanto de agua como de sales. Parte del agua de la zona 1 difundirá hacia la zona 2 para intentar bajar la concentración de sales en la zona 2, y a su vez, parte de las sales de la zona 2 difundirán hasta la zona 1 para aumentar la concentración de sales de dicha zona. Estos procesos de difusión se llevarán a cabo hasta que la concentración de la mezcla total dentro del compartimento sea la misma. [8]

El paso siguiente es introducir una membrana semipermeable para dividir el compartimento en dos partes. En la Figura 11 se puede ver el funcionamiento de la difusión cuando existe una membrana que separa ambas disoluciones:

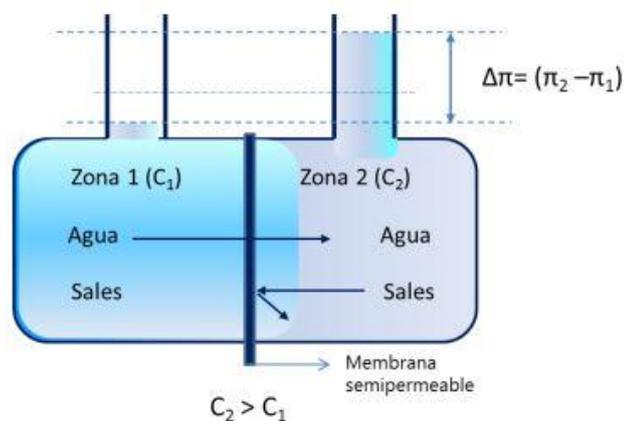


Figura 11. Difusión entre dos disoluciones separadas por una membrana. [Tomada de: [8]]

Diseño de una planta desaladora mediante ósmosis inversa con una capacidad de producción de 5000 m³/día ubicada en la provincia de Alicante.

En la Figura 11 se puede observar que existen dos compartimentos separados por una membrana semipermeable, la zona 1 que contiene la disolución con menor concentración de sales y la zona 2, que contiene la disolución con una concentración de sales mayor a la disolución 1. Como se ha explicado anteriormente, se producirá un proceso de difusión tanto por parte del agua de la zona 1 como de las sales de la zona 2 pero en este caso, las sales de la zona 2 no pueden pasar al compartimento 1 porque existe una barrera física que impide su paso, pero sí que permite el paso del agua. Teniendo esto en cuenta, para que ambas disoluciones iguallen su concentración es preciso que parte del agua de la zona 1 atraviese la membrana semipermeable que separa ambas zonas y baje la concentración de sales de la zona 2. [8]

Al darse este proceso, el nivel de líquido de la zona 2 aumentará mientras que el nivel de líquido de la zona 1 disminuirá puesto que parte del agua ha difundido a través de la membrana de una zona a otra. Si en la zona 1 hubiera agua pura sin sales, la diferencia de alturas en el nivel de líquido entre ambos compartimentos se denomina presión osmótica de la disolución 2 mientras que, si en el compartimento 1 hubiera agua con sal, la diferencia de alturas sería la diferencia de presiones osmóticas entre ambas disoluciones. A este fenómeno se le denomina ósmosis. [8]

El siguiente paso es invertir el proceso anterior, es decir, en vez de hacer que parte del agua del compartimento 1 pase al compartimento 2 para disminuir la concentración en esa zona, lo que se pretende es aplicar una presión mayor a la diferencia de presiones osmóticas en el compartimento 2 para que parte del agua de la zona 2 vaya hasta la zona 1 atravesando la membrana semipermeable. [8]

En la Figura 12 se muestra el funcionamiento del fenómeno de la ósmosis inversa:

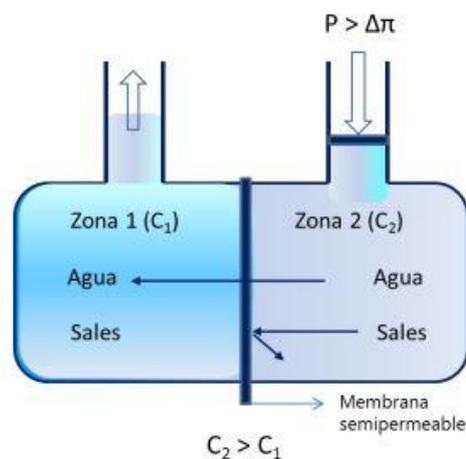


Figura 12. Fenómeno de ósmosis inversa. [Tomada de: [8]]

En la Figura 12 se puede ver que al aplicar una presión mayor a la diferencia de presiones osmóticas en el compartimento 2, parte del agua de la zona 2 se traslada a la zona 1. En el compartimento 1 tendríamos el permeado con una concentración baja de sales y en la zona 2 se quedaría el rechazo con una elevada concentración de sales. [8]

1.3-COMPARATIVA ENTRE TÉCNICAS DE DESALACIÓN

Anteriormente se han explicado las principales técnicas de desalación de aguas. A continuación, se realiza una comparación entre ellas para escoger una para el diseño de la planta. Los parámetros que más relevancia tienen a la hora de comparar técnicas de desalación son:

- Coste energético. Se evalúan tanto la energía eléctrica como la térmica puesto que hay procesos que requieren de ambos tipos de energía para operar. Sin embargo, el coste energético será mayor o menor dependiendo de qué tecnología se utilice para la producción de esa energía. [14]
- Coste de producción de agua. Evalúa lo que cuesta de producir un metro cúbico de agua dulce. [14]
- Tendencia de crecimiento de la técnica de desalación y maduración. La maduración de cada tecnología dependerá del tiempo que lleve utilizándose. [14]
- Impacto medioambiental. Se miden las emisiones de dióxido de carbono por metro cúbico de agua producida. [14]
- Conversión del proceso. Se refiere a qué porcentaje de la corriente de entrada de agua pasa a ser finalmente parte de la corriente de permeado. [14]

En la Tabla 2 se muestran los parámetros a analizar para cada tecnología de desalación:

Tabla 2. Parámetros de comparación entre tecnologías. [Adaptado de: [14]]

	Coste energético (KWh/m ³)	Coste del agua (\$/m ³)	Maduración	Emisiones de CO ₂ (Kg CO ₂ /m ³)	Conversión (%)
Multi-efecto	28	1	Alta	7	15-50
Multi-etapa	44-47	0.9-1.5	Alta	9.4	15-50
Compresión de vapor	7.5-13	Parecido a Multi-efecto	Media	Bajo (Menor que multi-efecto)	50 aproximado
Ósmosis inversa	4-8	0.99	Alta	1.75	30-50
Electrodialisis	3-7 (agua salobre)	0.6	Media-Alta	Bajo (Parecido a la ósmosis)	85-94 (agua salobre)

Como se puede observar en la Tabla 2, desde el punto de vista del coste energético las tecnologías que más requieren energía son multi-efecto y multi-etapa. En un lugar intermedio se encuentra la compresión de vapor con un coste entre 7.5 y 13 KWh/m³. Las tecnologías que menos energía

requieren son la ósmosis inversa y la electrodiálisis situándose ambas entre 3 y 8 kWh/m³. La electrodiálisis, sin embargo, se usa para agua salobre, no para agua salada. Desde la perspectiva del coste del agua, todas las tecnologías se encuentran dentro del mismo rango.

Con respecto a la maduración de la tecnología, los procesos multi-efecto y multi-etapa son bastante utilizados puesto que son tecnologías muy afianzadas en el mercado porque llevan mucho tiempo en él desde que se desarrollaron en el siglo pasado. La compresión de vapor no es muy utilizada y si se usa, suele ir acompañada de la tecnología multi-efecto. La ósmosis inversa es una tecnología muy utilizada puesto que más del 50% del agua obtenida mediante técnicas de desalación se consigue con esta tecnología. Por último, la electrodiálisis se utiliza muy poco para agua de mar ya que su uso está destinado enormemente a la desalación de aguas salobres aunque, sí que es una tecnología que ha alcanzado cierta madurez. [14]

Des del punto de vista de las emisiones de dióxido de carbono, las tecnologías que más emisiones generan son las térmicas y las que menos emisiones generan son las tecnologías que utilizan membranas. Esto tiene sentido puesto que son las térmicas las que tienen también mayores consumos energéticos. Sí es cierto que una tecnología puede requerir mucha energía para funcionar, pero si esa energía proviene de una fuente renovable no se estarían generando emisiones. En este caso, se ha tenido en cuenta que la energía requerida por cada proceso es abastecida mediante una central de gas natural con cogeneración. [14]

Finalmente, des del punto de vista de la conversión, para aguas de mar todas las tecnologías térmicas y la ósmosis inversa alcanzan una conversión máxima del 50% pero sí es cierto que las térmicas poseen un límite inferior mucho más bajo que la ósmosis inversa. La electrodiálisis, por otro lado, posee una conversión muy alta pero es para aguas salobres.

Habiendo analizado cada uno de los parámetros anteriores, la ósmosis inversa es la tecnología escogida para la planta que se va a diseñar en este trabajo fin de master. Se ha visto que la ósmosis inversa es una técnica madura y por lo tanto fiable para la desalación de agua de mar. Además, posee un consumo de energía y unas emisiones de dióxido de carbono bajas si se la compara con las tecnologías térmicas.

1.4-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y UBICACIÓN DE LA PLANTA

La planta se va a ubicar en la provincia de Alicante, concretamente entre tres localidades: San Fulgencio, La Marina y Guardamar del Segura. Estas tres localidades se encuentran en la cuenca hidrográfica del río Segura, que tal como se pudo ver en la Figura 4, los recursos hídricos de la zona están siendo sobreexplotados llegando a generar estrés hídrico en la zona.

Estas localidades, en el pasado se dedicaban mayoritariamente a la agricultura de regadío, pero hoy en día la actividad que destaca por encima de las demás es el turismo. En esta zona se construyeron muchas viviendas residenciales principalmente destinadas a los turistas extranjeros para que pasen el verano en la costa alicantina y el resto del año vuelvan a su país de origen. Es por eso que en la temporada de verano el consumo de agua se dispara en la zona y la cuenca hidrográfica junto con los acuíferos no son suficientes para abastecer a la población. [18], [19] y [20]

En la Figura 13 puede verse en qué zona concreta están situados estos municipios ya que se resaltan mediante un punto rojo:



Figura 13. Ubicación de las localidades. [Tomada de: [17]]

La característica principal de la urbanización de la costa alicantina es que la mayoría de viviendas son de baja densidad que poseen, a su vez, jardines y piscinas. Este tipo de urbanizaciones poseen un elevado consumo de agua si se lo compara con la forma tradicional de urbanización. Este tipo de urbanizaciones de baja densidad poseen un elevado consumo de agua puesto que prácticamente la mitad del consumo se destina al llenado de la piscina o al regado del jardín. [17]

Toda la costa alicantina se ha visto transformada territorialmente a lo largo del tiempo, predominando actualmente las viviendas de baja densidad con un alto atractivo turístico debido al buen clima durante todo el año y la presencia del mar y la playa. En cuanto al suministro de agua, para poder satisfacer las necesidades de la agricultura y las actividades de ocio y turísticas se ha recurrido a la explotación de los acuíferos de la zona o a los trasvases entre cuencas hidrográficas. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos de mantener el suministro con las medidas anteriores, la demanda de agua sigue creciendo y ya no es suficiente la utilización de los acuíferos o los ríos, sino que se requieren de fuentes no convencionales como por ejemplo las plantas desaladoras para hacer frente a la demanda creciente. [17]

No bastando con la demanda creciente de agua por parte de la población y la agricultura, también se producen sequías como consecuencia de las bajas precipitaciones de la zona. El cambio climático ha generado una incertidumbre a largo plazo en esta zona del litoral mediterráneo debido a que puede provocar una bajada drástica de precipitaciones y reducción del nivel de los ríos, con lo cual el problema con el suministro de agua se acentuaría todavía más a medida que pasa el tiempo. [17]

El cambio climático también ha provocado que el periodo de precipitaciones sea muy irregular, con lo cual puede aumentar la probabilidad de que se produzcan eventos climáticos extremos como la sequía o las lluvias de intensidad muy elevada en poco tiempo. [17]

Diseño de una planta desaladora mediante ósmosis inversa con una capacidad de producción de 5000 m³/día ubicada en la provincia de Alicante.

Es por todos estos problemas por los que se propone el diseño de una planta desaladora en este trabajo fin de master. Con esta planta desaladora se aseguraría el suministro de agua cuando la población de la zona alcanzara su pico álgido en la temporada de verano. Durante el resto del año se seguiría utilizando para suministrar a la población, solo que no trabajaría con toda la capacidad instalada. Además, reduciría la explotación sobre los acuíferos de la zona ya que no se requeriría extraer tanta agua de ellos.

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS

2.1-OBJETIVO PRINCIPAL DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

El objetivo principal de este trabajo fin de master es diseñar una planta de desalación de aguas para abastecer a tres poblaciones del litoral alicantino durante todo el año y sobretodo, en la temporada de verano, que es cuando llegan turistas. Además, se realizará un análisis de sensibilidad al sistema de membranas comparando 3 membranas entre sí para ver cuál es más apta bajo una condición que se establecerá más adelante. Para simular el funcionamiento del sistema de membranas se usará el simulador comercial WAVE propiedad de la empresa DuPont.

2.2-OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos de este trabajo fin de máster para alcanzar el objetivo principal, son:

- Adquirir conocimientos sobre la problemática del agua, tanto en el mundo como en España.
- Identificar las tecnologías de desalación de aguas, así como los pros y contras de cada una de ellas.
- Adquirir conocimientos sobre software de simulación de procesos de membranas y su utilización para el diseño de dichos procesos.
- Conocer las implicaciones medioambientales que posee una planta de desalación de aguas.
- Identificar en qué puntos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se ve implicada una planta de desalación de aguas.
- Realizar un diseño completo de una planta desaladora que funciona con la tecnología de ósmosis inversa.

CAPÍTULO 3. PROCESO DE DESALACIÓN

El proceso de desalación de agua de mar mediante la ósmosis inversa consta de 5 etapas. Estas 5 etapas son: captación de agua de mar, pretratamiento del agua de mar, sistema de membranas para aplicar la ósmosis inversa, remineralización y suministro del agua dulce y gestión de la salmuera. Estas etapas se describen en los siguientes subapartados.

3.1-CAPTACIÓN

La etapa de captación puede realizarse de dos maneras distintas. La primera de ellas es la captación de agua de mar mediante toma abierta, mientras que la segunda forma es la captación mediante toma cerrada. [21]

La toma abierta capta agua directamente del mar utilizando una o varias torres de toma ubicadas sobre el fondo del mar. Esta agua tomada se lleva a una estación de bombeo mediante tuberías ubicadas en el fondo marino. Una vez el agua llega a la estación de bombeo, mediante bombas se impulsa el caudal requerido en la planta. En la Figura 14 se muestra una torre de toma:

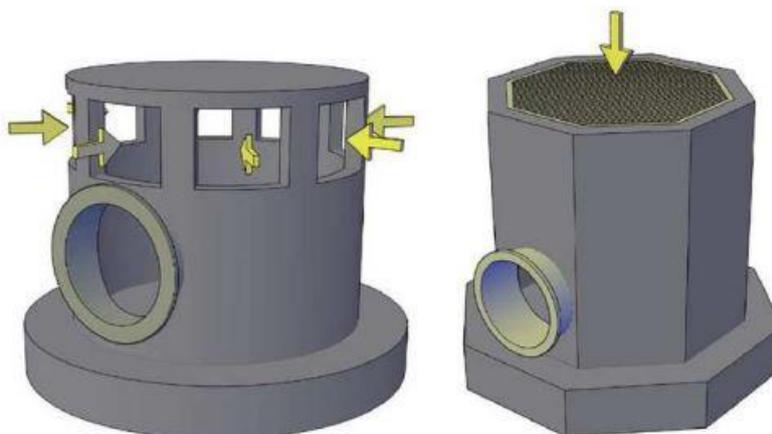


Figura 14. Torre de toma de agua de mar. [Tomada de: [21]]

Estas torres de toma son unos cajones de hormigón que poseen una cantidad variable de ventanas con rejillas de acero inoxidable o plástico para evitar que entren al sistema peces o sólidos grandes. Las ventanas suelen ubicarse en los laterales de la torre o en la parte de arriba, aunque, siempre es preferible ubicarlas en la zona lateral para evitar de mejor manera la succión de microorganismos. Utilizar este tipo de toma requiere de la realización de obras submarinas en la zona elegida, con lo cual, los costes de capital aumentan. [21]

Por otro lado, existe la toma cerrada. Esta forma de tomar el agua de mar consiste en excavar un pozo cerca del mar y hacer llegar el agua de mar al pozo valiéndose de la permeabilidad del terreno o mediante tuberías que van por debajo del fondo marino y captan el agua de mar a través del terreno permeable. [21] y [22]

En las Figuras 15 y 16 pueden verse las dos maneras de tomar agua mediante toma cerrada:

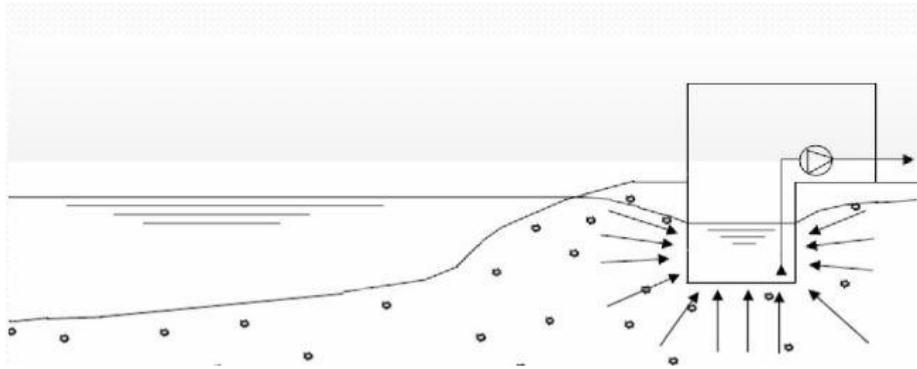


Figura 15. Toma cerrada. [Tomada de: [22]]

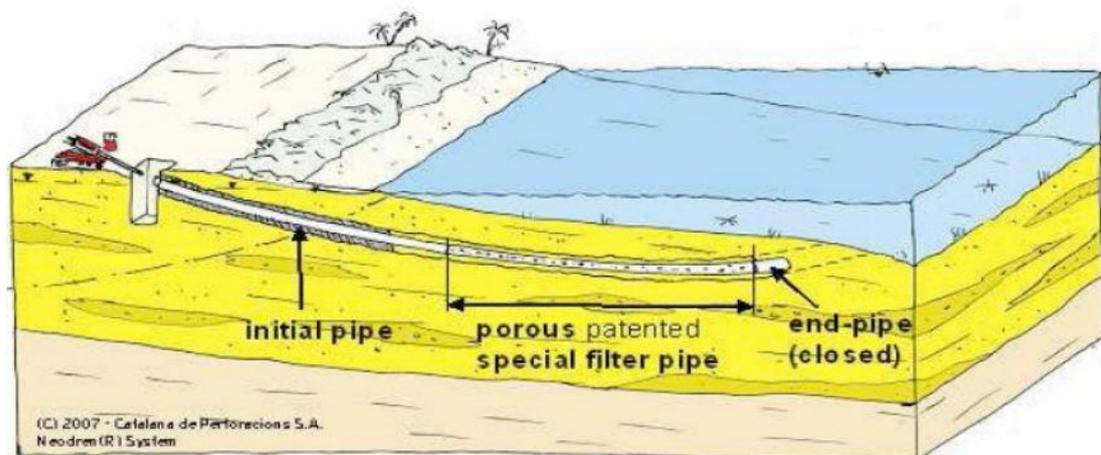


Figura 16. Toma cerrada mediante uso de tuberías. [Tomada de: [22]]

Como se puede ver en las Figuras 15 y 16, ambas formas de toma cerrada funcionan utilizando la permeabilidad del terreno. En la Figura 15, el agua de mar se obtiene por la cercanía del pozo excavado al mar. Mientras que en la Figura 16, el agua de mar atraviesa el terreno para llegar a un tramo de tubería final (end-pipe), luego el agua se dirige por un tramo de tubería que puede actuar como una especie de filtro especial (porous patented special filter pipe) para llegar finalmente al tramo de tubería inicial, que es el que se encuentra más cerca de la cántara.

A continuación, se muestran las ventajas e inconvenientes de la toma abierta y la toma cerrada en las Tablas 3 y 4:

Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de la toma abierta. [Adaptado de: [21]]

Ventajas	Inconvenientes
Acceso ilimitado al agua de mar	Alta actividad biológica y presencia de materia orgánica
Poco mantenimiento de la torre sumergida	Temperatura y composición química variables
-	Mayor exposición a la contaminación
-	Requiere obras submarinas

Tabla 4. Ventajas e inconvenientes de la toma cerrada. [Adaptado de: [21]]

Ventajas	Inconvenientes
Agua de mar limpia porque el suelo actúa como filtro	Dependencia de la permeabilidad del terreno
Actividad biológica prácticamente nula	Posible contaminación con plaguicidas
Temperatura y composición química estable	-
No afecta al fondo marino	-

En el caso de este trabajo fin de máster, se va a elegir la toma cerrada para la captación de agua. En la toma cerrada no se perturba de ningún modo el fondo marino, con lo cual, no llega a afectar a las praderas de Posidonia oceánica. Estas praderas pueden encontrarse solo en el mar Mediterráneo a unas profundidades que oscilan entre los 5 y los 30 metros, aunque hay zonas en las que puede llegar a vivir a los 40 metros. Esta planta es muy exigente con sus requerimientos ecológicos porque no tolera grandes variaciones de salinidad y es muy sensible a la eutrofización. La presencia de esta planta en los fondos marinos es indicativo de que las aguas de allí están limpias, exentas de contaminación y son ricas en oxígeno. [23]

Para poder asegurar el suministro de agua mediante la toma cerrada se debe tener en consideración la permeabilidad del suelo de la zona. Si el agua de mar permea con facilidad a través del terreno no se tendrán problemas de suministro de agua mientras que si al agua de mar le cuesta permear a través del suelo puede llegar a producirse una insuficiencia en suministro de agua de mar para la planta.

Para ello, se han buscado las playas más cercanas a los terrenos donde se pretende instalar la planta. Las playas más cercanas poseen unas arenas de dimensiones medias, con un diámetro de 0.21 y 0.22 mm. [24] Teniendo en cuenta el tamaño de la arena y que poseen un color dorado, la permeabilidad del agua de mar en este suelo es rápida, encontrándose entre 10⁻² y 10⁻⁵ metros/segundo. [25]

3.2-PRETRATAMIENTO

Después de captar el agua de mar, se le realiza un pretratamiento tanto físico como químico con el objetivo de eliminar la mayor parte de las impurezas presentes en el agua. Al realizar el pretratamiento se garantiza que el agua se encuentra en condiciones óptimas para poder introducirla en el sistema de membranas. Suele ser primordial tener un buen pretratamiento para evitar el ensuciamiento, las incrustaciones y la destrucción de las membranas de la siguiente etapa. [21]

Esta etapa del proceso puede ser más o menos compleja en función de la calidad del agua de mar que se tenga. Generalmente, en esta etapa se suele buscar la eliminación de sólidos en suspensión, toda actividad biológica, materia orgánica, óxidos metálicos y sales minerales que puedan quedar incrustadas en las membranas. [21]

Entre las técnicas de tratamiento más usadas se encuentran:

- Regulación del pH. Se realiza mediante la adición de un ácido o una base. [21]
- Desinfección. Mediante la adición de hipoclorito sódico o cloro se consigue matar a los microorganismos patógenos que pueda contener el agua de mar. Se requiere la utilización de un reductor de cloro puesto que el cloro ataca a las membranas. [8]
- Dosificación de anti incrustantes. Se añade un compuesto que evita la precipitación temprana de sales tales como sulfato cálcico, sulfato de estroncio, sulfato de bario y algunos óxidos metálicos. [21]
- Coagulación-floculación. Se suele utilizar para eliminar partículas en suspensión que pueden obstruir el sistema de membranas si no se eliminan. Se suele añadir una sal de hierro o aluminio para separar las partículas coloidales y un polímero sintético para agrupar el material en suspensión y hacer que vaya al fondo de un decantador. [21]
- Flotación. Se suele utilizar para eliminar sólidos con capacidad de quedarse flotando en la superficie del agua. Para conseguir esto, se inyectan burbujas de aire desde la parte baja del tanque de flotación y por arrastre de las burbujas de aire, los sólidos van a la superficie. Una vez en la superficie, se recogen y se eliminan de la corriente de agua. [21]
- Filtración. Este proceso se utiliza para retener sólidos en suspensión. Existen dos tipos de filtros: en primer lugar, se encuentra el filtro de arena de desbaste, que se utiliza para eliminar partículas de un tamaño superior a 5 µm y los filtros de cartucho, que retienen partículas con un tamaño entre 1 y 5 µm. Si el agua a tratar tuviera una elevada concentración de materia orgánica, se puede reducir mediante la utilización de un filtro de carbón activo. [21]

- Tratamiento con membranas. Si el agua de entrada tuviera unos niveles de contaminación elevados, se requeriría de un sistema de membranas de micro o ultra filtración para reducir la concentración de contaminantes en la corriente de agua. [21]

En el caso de este trabajo fin de máster, se realiza una regulación de pH, una dosificación de anti incrustante, una desinfección y se añade también una filtración mediante filtros de arena y cartucho. Se han elegido estas técnicas para el pretratamiento puesto que el agua de mar que llega a esta etapa posee una concentración de sólidos en suspensión baja y una actividad biológica muy baja gracias a la acción filtrante del terreno.

3.3-SISTEMA DE MEMBRANAS

El agua de mar tratada llega a esta etapa y se encuentra con un sistema de membranas de ósmosis inversa. En la Figura 17 se puede ver un esquema básico del funcionamiento de esta etapa:

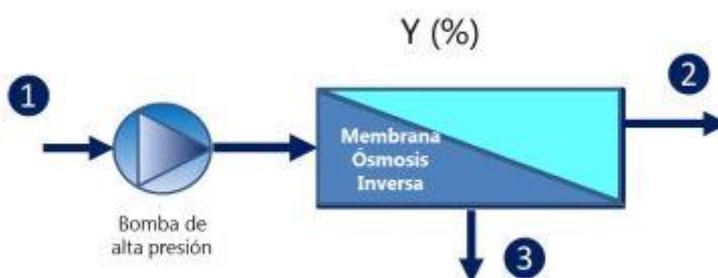


Figura 17. Sistema de Ósmosis Inversa. [Tomada de: [8]]

A continuación, se explican las distintas corrientes que aparecen en la Figura 17:

1. Es el agua de entrada al sistema de membranas. Esta agua de mar ha pasado previamente por la etapa de pretratamiento, así que se encuentra en condiciones perfectas para ser introducida a las membranas de ósmosis inversa. Se usa una bomba de alta presión para aumentar la presión por encima de la presión osmótica del agua de mar para que así pueda darse el fenómeno de la ósmosis inversa. [8]
2. Es la corriente de permeado. Es una de las dos salidas que posee un sistema de ósmosis inversa. Por este lado el agua sale a una presión baja después de haber atravesado la membrana. [8]
3. Es la corriente de rechazo. Esta corriente posee una elevada concentración de sales como resultado del proceso de ósmosis inversa. [8]

Las membranas de ósmosis inversa pueden clasificarse de varias maneras, sin embargo, las más comunes son: según la composición química de la membrana y según la configuración de la membrana. [8]

Por lo que respecta a la clasificación según la composición química de la membrana de ósmosis inversa, se encuentran las siguientes opciones:

- Membranas orgánicas. Las membranas de este tipo se fabrican con distintos tipos de polímeros. Los polímeros más utilizados para la fabricación de membranas orgánicas son: acetato de celulosa, poliamidas aromáticas, polisulfona, poliacrilonitrilo y otros. [8]
- Membranas inorgánicas. Los materiales utilizados en el desarrollo de membranas inorgánicas suelen ser vidrios, cerámicas y carbonos. [8]

Por lo que respecta a la clasificación según la configuración de la membrana. Se encuentran las siguientes opciones:

- Plato-marco.
- Tubular
- Fibra hueca.
- Arrollamiento en espiral.

Las membranas plato-marco y tubulares fueron las primeras membranas utilizadas y consistían en membranas con forma de lámina plana y tubos huecos por los cuales se hacía pasar el agua de mar a presión. Por otro lado, se encuentran las membranas de fibras huecas, que poseen un aspecto parecido al cabello humano. Este tipo de membranas se componen de una capa activa muy densa en la parte exterior y una capa soporte porosa en la parte interior. Por último, se encuentran las membranas con arrollamiento en espiral. Este tipo de membranas son las más utilizadas hoy en día. [8]

Las membranas pueden agruparse de dos formas distintas. La primera de ellas es en serie y la segunda es en paralelo. Las membranas nunca trabajan por separado, sino en agrupaciones. En la Figura 18 se muestra la agrupación en serie:

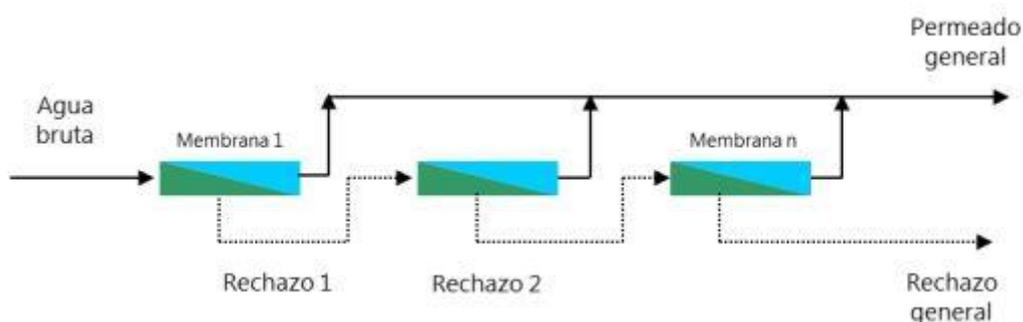


Figura 18. Agrupación de membranas en serie. [Tomada de: [8]]

Por lo que se puede ver en la Figura 18, en la agrupación en serie el rechazo de la primera membrana se introduce como alimentación en la segunda membrana y así sucesivamente. Con esta configuración se consigue aumentar la conversión de un sistema de membranas puesto que a partir de la misma cantidad de agua bruta se está obteniendo mayor cantidad de permeado

haciendo pasar el rechazo de la primera membrana por una membrana en serie con la primera. [8]

Por otro lado, se encuentra la agrupación en paralelo. Cuando las membranas se agrupan de esta manera el permeado de cada una de ellas se recoge en un tubo común a todas ellas. El rechazo, por otro lado, también se recoge en un tubo común a todas las membranas. Esta configuración se utiliza para aumentar la capacidad de producción del sistema de membranas. [8] En la Figura 19 se puede ver la agrupación en paralelo:

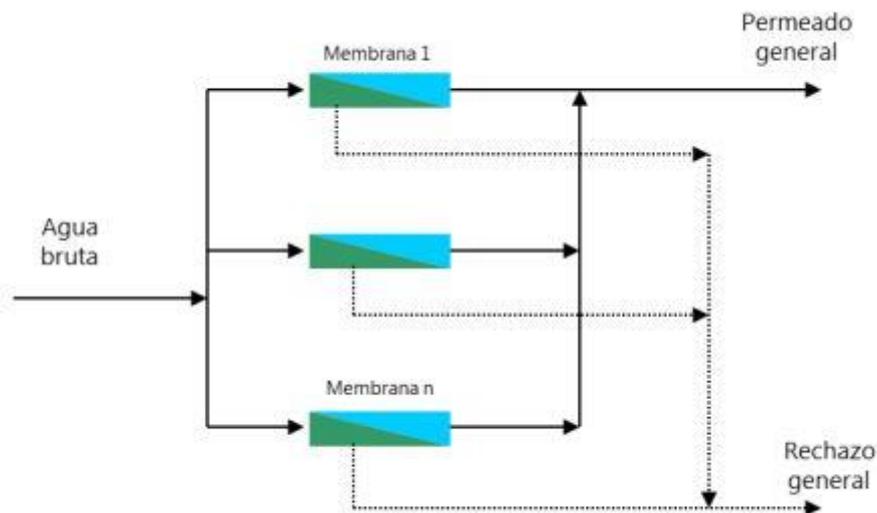


Figura 19. Agrupación de membranas en paralelo. [Tomada de: [8]]

Des del punto de vista industrial, en una planta desaladora se requiere aumentar la producción de permeado y a su vez la conversión del sistema de membranas. Para ello se utiliza la agrupación mixta serie-paralelo. Se sitúan entre 6 y 8 membranas en serie dentro de un tubo de presión, que a su vez se encuentran en paralelo con los demás tubos de presión. [8] En la Figura 20 se muestra el funcionamiento de la agrupación serie-paralelo:

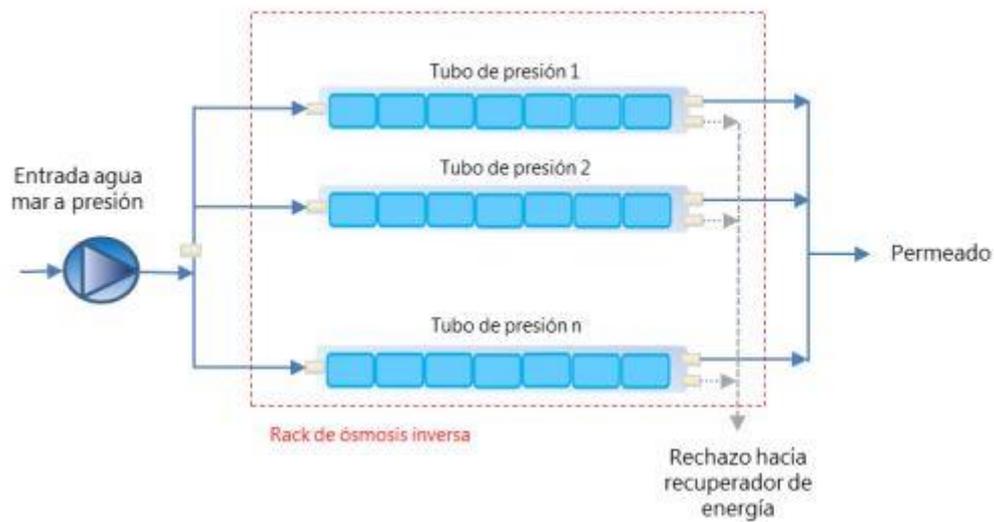


Figura 20. Agrupación serie-paralelo. [Tomada de: [8]]

En la Figura 20 se observa que la agrupación de tubos en paralelo se denomina rack. Además, el permeado se junta en un tubo común a todos los tubos de presión mientras que el rechazo de todos los tubos se lleva a un sistema de recuperación de energía puesto que el rechazo aún posee una presión elevada y que puede ser aprovechada mediante un intercambiador de presión. [8]

Existen dos conceptos muy utilizados a la hora de diseñar una planta desaladora por ósmosis inversa: etapa y paso. En la Figura 21 se muestra el funcionamiento de un sistema con múltiples etapas:

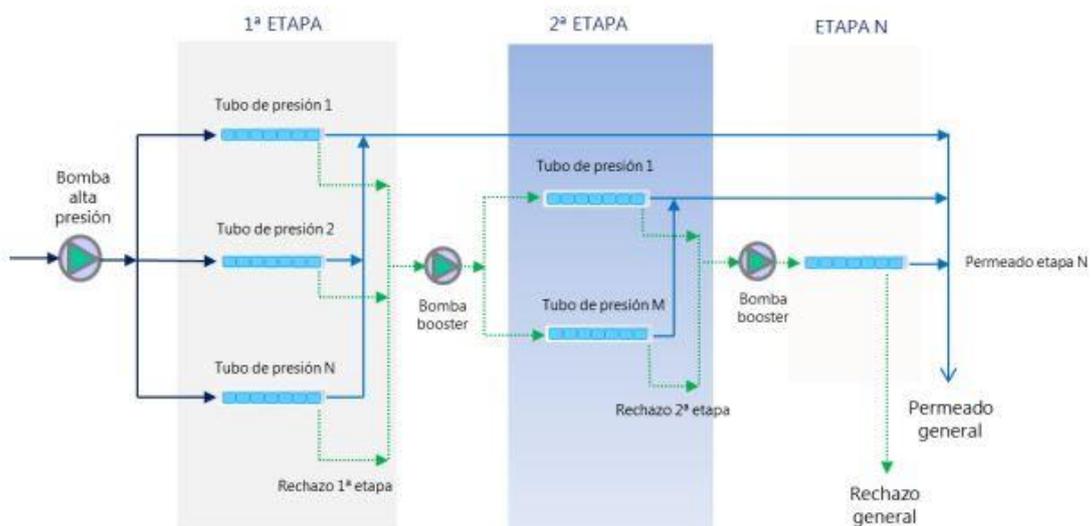


Figura 21. Sistema de membranas con múltiples etapas. [Tomada de: [8]]

Tal como se puede ver en la Figura 21, cuando un sistema tiene más de una etapa lo que se hace es recoger el rechazo de la primera etapa y mediante una bomba booster aumentarle la presión para poder hacer pasar esa corriente de rechazo por la siguiente etapa del sistema de membranas y así sucesivamente. Se requiere una bomba booster puesto que la salinidad del rechazo es muy elevada y por tanto su presión osmótica debe vencerse para poder introducirla en la siguiente etapa. El poner más de una etapa en un sistema de membranas se hace para conseguir que el sistema tenga una conversión mayor puesto que con la misma cantidad de agua de mar entrante se consigue una cantidad mayor de permeado. [8]

En la Figura 22 se muestra el funcionamiento de un sistema de membranas con múltiples pasos:

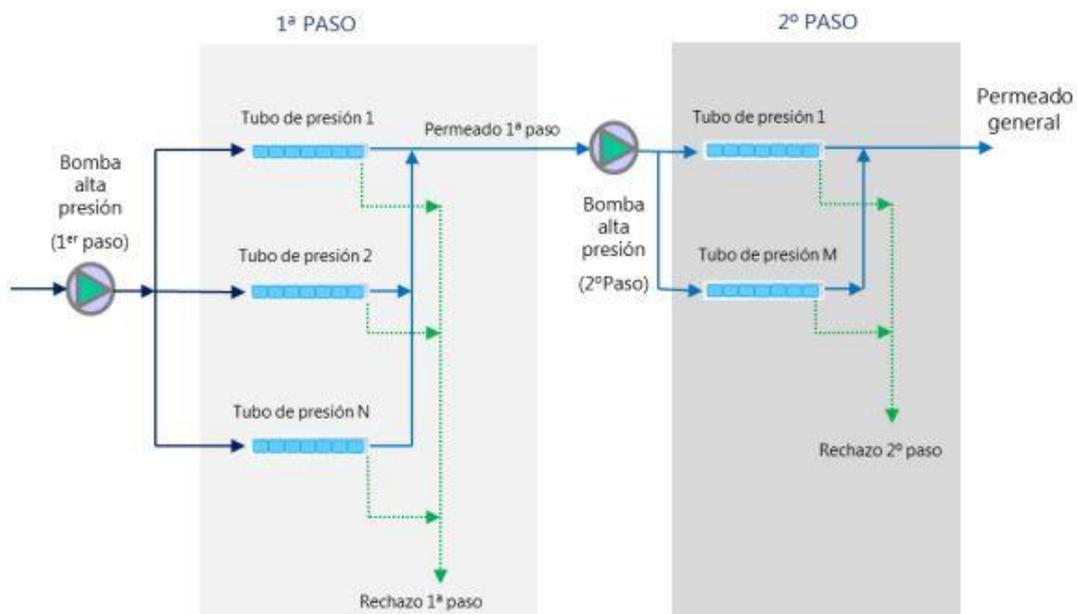


Figura 22. Sistema de membranas con múltiples pasos. [Tomada de: [8]]

Por lo que se puede ver en la Figura 22, cuando existen múltiples pasos lo que se hace es introducir en el segundo paso el permeado que sale del primer paso y así sucesivamente. El permeado al estar a una presión muy baja se debe utilizar otra bomba para aumentar la presión del permeado y así poder introducirlo en el segundo paso. Cuando un sistema posee más de un paso lo que se pretende es conseguir una corriente de permeado con una menor concentración de sales y como consecuencia, de mayor calidad. Sí es cierto que en los procesos de las desaladoras de agua de mar es raro encontrar más de un paso porque la concentración de sales del permeado del primer paso ya contiene una baja concentración de sales. El rechazo del primer paso posee una concentración de sales muy elevada, mientras que los demás rechazos poseen concentraciones bajas de sales. El rechazo del primer paso se lleva a un recuperador de energía y después al proceso de gestión de salmuera mientras que el rechazo de los demás pasos se lleva directamente a la etapa de gestión de salmueras. [8]

3.4-REMINEALIZACIÓN DEL AGUA PRODUCTO

El agua dulce producida en el sistema de membranas todavía no puede ser consumida por el ser humano puesto que es un agua con una baja salinidad. Además de ser poco saludable y un poco corrosiva. Para que el agua pueda ser consumida por el hombre se le deben añadir sales minerales tales como calcio y magnesio en forma de iones Ca⁺² y Mg⁺². [26]

Existen distintas formas de remineralizar el agua procedente de un sistema de membranas. En primer lugar, se encuentran los procesos en los cuales se adicionan compuestos químicos directamente al agua procedente del sistema de membranas. Los compuestos que suelen adicionarse contienen calcio y magnesio, como por ejemplo el hidróxido de calcio, el cloruro de calcio, el cloruro de magnesio y el sulfato de magnesio. En segundo lugar, se encuentran los procesos en los cuales el agua de salida del sistema de membranas se mezcla con una pequeña porción de agua salada o con aguas ricas en calcio y magnesio. Por último, se encuentran los procesos en los cuales se añade calcio y magnesio mediante la adición de un mineral, siendo el más común la calcita (carbonato cálcico). [27]

En el caso de este trabajo fin de máster, se ha elegido realizar la remineralización del agua mediante la adición de calcita. Esta remineralización con calcita se lleva a cabo en un tanque vertical que posee un lecho de calcita por el cual se hace pasar el agua procedente del sistema de membranas habiéndole bajado previamente el pH para que el proceso sea más efectivo. [27]

Entre las principales ventajas de esta técnica de remineralización se encuentran:

- No agrega turbidez al agua producto. [27]
- No se agregan iones no deseados como por ejemplo el cloruro, el sulfato o el sodio. [27]
- No existe riesgo de sobredosificación de iones al agua. [27]
- Es fácil de operar. [27]

3.5-SUMINISTRO DE AGUA

El agua dulce que procede de la etapa de remineralización se lleva a una balsa de almacenamiento de agua producto. En esta balsa se suele añadir un ácido o una base para regular el pH final de la corriente de agua que se va a suministrar a la población. En el caso de este trabajo fin de máster, se va a tener que añadir sosa para aumentar el pH del agua producto para evitar problemas de corrosión en las tuberías. Por lo que respecta al volumen de la balsa de almacenamiento de agua producto, ésta tendrá un volumen equivalente al 10% de la producción diaria de la planta. [50]

3.6-GESTIÓN DE LA SALMUERA

A la hora de gestionar la salmuera generada en el sistema de membranas, existen distintas soluciones:

- Descarga de salmuera en masas de agua. [28]
- Concentración de salmuera. [28]
- Valorización de salmuera. [28]

La primera solución es la descarga de la salmuera del sistema de membranas directamente al mar. Esta solución es la más utilizada en la mayoría de los casos. Previamente a decantarse por esta solución para gestionar la salmuera se deben realizar estudios ambientales de la zona de vertido, así como estudios del fondo marino y la fauna y flora para poder determinar qué zona de vertido es la más óptima y la que menos impacto genere en el medio ambiente. [28]

También existe la opción de inyectar la salmuera en un acuífero profundo. Esta técnica es muy utilizada en Estados Unidos, donde utilizan antiguos pozos de petróleo agotados para inyectar la salmuera. En España, esta técnica no sería viable puesto que, en la mayoría de los casos, si se inyecta agua en un pozo profundo, dentro de un tiempo la salmuera contaminaría otras fuentes de agua dulce debido a la baja impermeabilidad del terreno y el aislamiento del pozo profundo. [28]

La segunda solución es la concentración de la salmuera. Para concentrar aún más la salmuera procedente del sistema de membranas se proponen tres técnicas:

- Aumentar la conversión del sistema de membranas. A medida que se aumenta la conversión del sistema de membranas, cada vez se produce más cantidad de permeado a partir de la misma cantidad de agua de mar, con lo cual, el agua de mar que es rechazada como salmuera saldría del sistema más concentrada en sales. En esta técnica debe tenerse especial cuidado con la precipitación de sales en el circuito de la salmuera, puesto que la concentración de ciertas sales puede llegar a ser tan elevada que supere su límite de solubilidad y acaben precipitando en el circuito de la salmuera, haciendo que se necesiten anti incrustantes para evitar problemas. [28]
- Utilización de la electrodiálisis reversible. Es un proceso que funciona muy bien para aguas salobres, pero no muy bien para aguas con elevadas concentraciones de sales. Si se quisiera utilizar esta técnica con la salmuera, se requerirían demasiadas etapas sucesivas, lo cual haría que el proceso fuera muy costoso tanto a nivel energético como de capital. [28]
- Concentración por evaporación. Las técnicas de evaporación de salmuera pueden realizarse de dos maneras. La primera de ellas es artificial y consiste en evaporar el agua haciendo uso de la compresión por vapor dentro de una cámara de evaporación. Esta opción es muy costosa a nivel energético. La segunda técnica es natural ya que consiste en evaporar el agua de la salmuera utilizando el ciclo natural del agua. Para ello, se hacen unas lagunas de poca profundidad y de mucha superficie para introducir ahí la salmuera y que con el tiempo el agua se evapore. Esta técnica requiere mucha superficie y suele usarse solamente cuando se tienen cantidades pequeñas de salmuera. [28]

Por último, se encuentran las técnicas de valorización de salmuera. Este es el mejor destino que se le puede dar a la salmuera desde el punto de vista ambiental, técnico o económico porque a partir de la salmuera pueden obtenerse compuestos comercializables y que generan un beneficio económico. [28]

La salmuera puede usarse dentro de la misma planta desaladora. Tiene las siguientes aplicaciones:

- Recuperación de energía. [28]
- Uso de la salmuera para la limpieza. [28]
- Producción de energía. [28]
- Producción de productos químicos. [28]

Por lo que respecta a la recuperación de energía, la salmuera aún se encuentra a una presión elevada cuando sale del sistema de membranas y es por eso por lo que esa energía puede ser recuperada mediante turbinas Francis o Pelton, o mediante intercambiadores de presión, que tienen cada vez más uso en las plantas desaladoras actuales. La salmuera también puede utilizarse para limpiar equipos de la planta, puesto que la salmuera, al contener una elevada concentración de sales y por tanto una elevada presión osmótica, es capaz de provocar un choque osmótico a los microorganismos para matarlos, reduciendo la cantidad de agua requerida para la limpieza de la planta. [28]

La salmuera también puede utilizarse para producir energía mediante la utilización de sistema de electrodiálisis reversible o sistemas de ósmosis directa. Estas técnicas usan los gradientes de concentración de sales y su potencial osmótico para generar energía. También existe la posibilidad de hacer pasar la salmuera por una turbina que se encuentra en una caída si la planta está ubicada en una zona más elevada. Por último, la salmuera generada puede aprovecharse para generar compuestos químicos. Es el caso del hipoclorito sódico, que puede generarse mediante la técnica de electrocloración. [28]

En el caso de este trabajo final de máster, la salmuera se va a utilizar para recuperar energía, ya que la salmuera sale del sistema de membranas a una presión elevada y, por tanto, se puede aprovechar para transferirle esa presión a una parte del agua salada de entrada al sistema de membranas para que la bomba de alta presión solo tenga que impulsar una parte del agua salada de entrada y no su totalidad. Además, una vez recuperada la energía de la salmuera, se realiza una descarga al mar de manera controlada mediante inmisario submarino, distribuyendo el vertido de la salmuera en varios puntos para no aumentar la concentración de sal de manera brusca en los puntos de vertido. Durante la semana de limpieza de la planta, parte de la salmuera generada se utiliza para operaciones de limpieza de los equipos, puesto que un agua tan concentrada en sales es capaz de matar a los microorganismos mediante un choque osmótico.

CAPÍTULO 4. REQUISITOS DE DISEÑO

Para el posterior diseño de la planta se van a fijar una serie de requisitos entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Alcanzar una producción de agua dulce de 5000 m³/día en periodos de máxima demanda. En este caso, la planta deberá poder abastecer a toda la población y a los turistas que vengan en periodo de verano, estipulado como los meses de junio, julio y agosto, con un total de 92 días.
- La planta se ubicará a 2.5 km tierra adentro entre las localidades de San Fulgencio, Guardamar del Segura y
- El agua dulce de salida debe cumplir con la normativa española en lo que se refiere a todas las concentraciones de compuestos disueltos en el agua.
- La planta trabajará durante todo el año excepto una sola semana que se reserva para tareas de mantenimiento y limpieza del sistema de membranas. Teniendo esto en cuenta, la planta operará durante 8592 horas.
- Para el diseño inicial del sistema de membranas, se va a suponer una conversión del 45%.
- El factor de seguridad tomado para el cálculo del volumen de los equipos de la planta es de un 15%.

CAPÍTULO 5. DISEÑO

5.1-CÁLCULOS PRELIMINARES

En este apartado se van a realizar los cálculos relacionados con la cantidad de personas que se van a abastecer con la planta teniendo en cuenta no solo los propios habitantes de las localidades de San Fulgencio, La Marina y Guardamar del Segura si no también los turistas que van a llegar en los días de verano. Para ello, como no se poseen datos sobre el turismo en estas tres localidades del sur de la provincia de Alicante, se han tomado datos turísticos sobre Torrevieja, que es una ciudad cercana a estas tres localidades.

En primer lugar, se necesitan saber los habitantes de cada una de las localidades. En la Tabla 5 se muestran los habitantes de todas las localidades implicadas en el cálculo turístico:

Tabla 5. Habitantes de las localidades. [Adaptado de: [18][19][20][29]]

Localidad	Número de habitantes
San Fulgencio	9091
La Marina	2026
Guardamar del Segura	16138
Torrevieja	83457

En lo que se refiere a la población que debe abastecer la planta, el cálculo se puede ver en la Figura 1 del ANEXO 1, dando como resultado final 27255 habitantes a abastecer. No obstante, aún no se han tenido en cuenta los turistas que van a acceder a estas localidades.

A continuación, se calcula el número de turistas que visitan Torrevieja en los meses de verano. En la Tabla 6 se muestran los turistas que visitan Torrevieja en los meses de junio, julio y agosto. Torrevieja recibe un total de 268600 turistas en la temporada de verano. Además, se calculan los días de verano en los que los turistas van a acceder a las localidades que va a abastecer la planta. El cálculo se puede ver en la Figura 2 del ANEXO 1.

Tabla 6. Turistas de Torre Vieja en verano. [Adaptado de: [30]]

Mes	Turistas
Junio	44927
Julio	101440
Agosto	122207

Con los datos de turistas que visitan Torre Vieja en verano y los días que dura el verano, se puede calcular el número de turistas diarios que recibe Torre Vieja. El resultado es de 2919 turistas/día y se calcula en la Figura 3 del ANEXO 1. Al poseer el número de turistas diarios que acceden a Torre Vieja y saber sus habitantes, se puede calcular la densidad de turistas en Torre Vieja. El cálculo se realiza en la Figura 4 del ANEXO 1 y su resultado es de 0.035 turistas/habitante día.

Posteriormente, se realiza el cálculo de la densidad de turistas en las localidades de San Fulgencio, La Marina y Guardamar del Segura. Para ello, se tienen en cuenta los habitantes de las poblaciones que se están teniendo en cuenta para el cálculo y la densidad turística de Torre Vieja. La densidad turística de las localidades que va a abastecer la planta es de 0.011 turistas/habitante día y su cálculo se muestra en la Figura 5 del ANEXO 1.

Para poder calcular el número de turistas máximos que van a haber en un día en las localidades que va a abastecer la planta, se deben saber los días de estancia de esos turistas. Para ello, se toman datos turísticos sobre la provincia de Alicante del año 2021. Los días de estancia para los extranjeros posee un valor de 12.3 días y los días de estancia de los residentes en España posee un valor de 5.2 días. Con estos datos, se puede calcular el tiempo de estancia medio, que es de 8.75 días y su cálculo se encuentra en la Figura 6 del ANEXO 1. [31]

A continuación, sabiendo el número de días de estancia media de los turistas, la densidad de turistas en las tres localidades que va a abastecer la planta y el número de habitantes, se puede calcular el número de turistas máximos que se van a sumar a las tres localidades y que también deben ser abastecidos. El número de turistas que acceden diariamente a las localidades es de 311 turistas/día y se alcanza el número máximo de 2724 turistas. El cálculo puede verse en la Figura 7 del ANEXO 1.

Sabiendo los habitantes totales de las tres localidades y los turistas máximos que van a acceder a estas localidades, se puede calcular el número de personas que va a tener que abastecer la planta en su punto álgido de verano. En total la planta abastecerá a 29980 personas. El cálculo se puede ver en la Figura 8 del ANEXO 1.

Posteriormente, teniendo en cuenta el consumo de agua por cápita, que se estipula con un valor de 150 litros/persona día y teniendo en cuenta un aumento del 10% en este consumo para poder asegurar completamente el suministro, se puede calcular el caudal de agua dulce que va a producir la planta. La planta deberá producir cerca de 4950 m³/día pero se sobredimensiona hasta los 5000 m³/día. El cálculo se muestra en la Figura 9 del ANEXO 1. El sistema de membranas va a tener 5 bastidores, y cada uno va a producir 1000 m³/día. Así, se puede trabajar al 20%, al 40%, al 60%, al 80% y al 100% de la capacidad de la planta. [1]

Finalmente, se calculan las necesidades de agua de mar que va a tener la planta teniendo en cuenta que la conversión elegida inicialmente para el sistema de membranas es del 45%. Las necesidades de agua de mar ascienden hasta los 11110 m³/día y su cálculo se puede ver en la Figura 10 del ANEXO 1. [14]

5.2-POZO DE CAPTACIÓN

Para el cálculo del pozo de captación de agua de mar, en primer lugar, se debe conocer a qué profundidad se debe excavar para alcanzar el agua de mar. Para ello, se hará uso de la ecuación de Ghyben-Herzberg, que es la que aparece a continuación [32]:

$$\text{Profundidad} = 40 * \text{Altura piezométrica agua dulce} \quad (1)$$

Con el uso de la ecuación (1) se puede calcular la profundidad a la que hay que excavar para dar con la interfase que existe entre el agua de mar y el agua dulce. La zona de ubicación de los pozos playeros se muestra en la Figura 23 resaltada la zona en rojo. Esta zona se encuentra a 2 m sobre el nivel del mar y se va a suponer que el agua dulce se encuentra a 1 m sobre el nivel del mar, con lo cual la altura piezométrica utilizada en la ecuación de Ghyben-Herzberg será de 1 m. Cada una de las zonas marcadas en rojo en la Figura 23 va a abastecer a un bastidor del sistema de membranas.



Figura 23. Zona de los pozos playeros. [Adaptada de: Google Earth]

Teniendo la altura piezométrica del agua dulce en la zona en la que se va a excavar el pozo, se puede obtener la profundidad de la interfase entre el agua dulce y el agua salada, que es de 40 m y el cálculo se muestra en la Figura 1 del ANEXO 2. A continuación, se calcula el área total que deben tener los pozos para que puedan abastecer la planta con el caudal de agua salada requerido y teniendo en cuenta que el valor de permeabilidad del terreno es de $5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. En la Figura 2 del ANEXO 2 se muestra tanto el área total de los 10 pozos como el de uno solo, siendo el área total de 25,72 m².

El siguiente paso es calcular la profundidad extra que hay que excavar a partir de la interfase para satisfacer los requerimientos de agua salada de la planta. Para ello, se supone un diámetro de pozo de 0.4 m y que el área lateral del pozo por la que permea el agua es la pared del pozo orientada hacia el mar, con lo cual, solamente se tiene en cuenta el área lateral de la mitad del pozo por debajo de la interfase. El pozo debe tener una profundidad extra de 4.1 m, por lo tanto, el pozo tendrá una profundidad total de 44.1 m. El cálculo de la profundidad total del pozo se muestra en la Figura 3 del ANEXO 2.

5.3-PRETRATAMIENTO

La zona en la que se ubica la planta se encuentra a 2.5 km de los pozos de captación tierra adentro debido a que toda la costa es una zona turística y, por tanto, no se puede construir un edificio de carácter industrial cerca. Además, la zona en la que está ubicada la planta se encuentra a 2 m sobre el nivel del mar, así que desde los pozos hasta la planta no hay cambios de altitud. En primer lugar, se va a calcular el volumen de la cántara de pretratamiento teniendo en cuenta el caudal de agua de mar que requiere la planta y suponiendo que la cántara debe albergar un volumen de agua suficiente para poder abastecer la planta durante 20 minutos. El resultado se sobredimensiona hasta los 180 m³ de volumen y el cálculo se puede ver en la Figura 1 del ANEXO 3.

A continuación, en la Figura 2 del ANEXO 3 se puede ver el cálculo del volumen de la cántara con sus respectivas dimensiones. La cántara tendrá 3 m de profundidad, 6 m de ancho y 10 m de largo para albergar un volumen máximo de 180 m³, de los cuales, el agua de mar va a ocupar 154,3 m³. Teniendo en cuenta las dimensiones y el volumen de agua de mar capaz de albergar la cántara, se calcula la altura que puede alcanzar el agua de mar dentro de la cántara. Este cálculo se puede ver en la Figura 3 del ANEXO 3. El agua de mar dentro de la cántara llega a una altura de 2.57 m. Para cálculos posteriores, se realiza el cálculo de la altura del agua de mar dentro de la cántara que se encuentra por encima del nivel del mar. Este cálculo se realiza en la Figura 4 del ANEXO 3 y su resultado es de 1.57 m.

Se va a calcular tanto la altura como el consumo energético de la bomba que saca agua del pozo. El cálculo se realiza para una sola bomba que extrae agua de uno de los 10 pozos del diseño. Para poder realizar este cálculo, se deben tener en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$\frac{P_1}{\rho_{\text{agua mar}}} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 + H_{\text{bomba}} = \frac{P_2}{\rho_{\text{agua mar}}} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + h_{\text{pérdidas}} \quad (2)$$

$$h_{pérdidas} = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (3)$$

La ecuación (2) es la ecuación de Bernoulli y se usará para calcular la altura que debe proporcionar la bomba para poder impulsar el agua desde el pozo hasta la cántara. Por otro lado, la ecuación (3) es la ecuación de Darcy-Weisbach que nos permite calcular las pérdidas de carga que sufre el fluido a causa de la fricción que existe entre el fluido y la tubería. Para poder calcular las pérdidas de carga que sufre el fluido se necesita el factor de fricción (f), que se puede calcular mediante el uso del diagrama de Moody. El diagrama de Moody se muestra en la Figura 24:

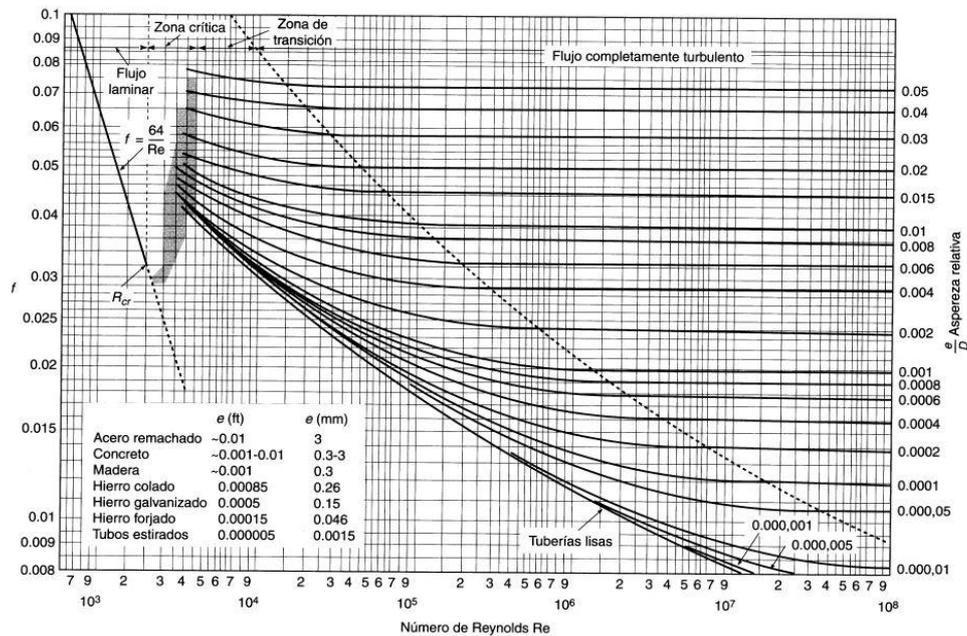


Figura 24. Diagrama de Moody. [32]

En la Figura 24 se puede observar que para poder leer un valor del factor de fricción dentro del diagrama de Moody se requiere calcular el número de Reynolds y la rugosidad relativa. El número de Reynolds y la rugosidad relativa se calculan de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (4)$$

$$Rugosidad\ relativa = \frac{Rugosidad\ tubería}{D} \quad (5)$$

Para poder realizar todos los cálculos explicados anteriormente se requiere de los datos que se muestran en la tabla 7:

Tabla 7. Parámetros de cálculo iniciales. [Adaptado de: [33][34]]

Parámetro	Valor	Unidades
ρ (densidad)	1020	Kg/m ³
μ (viscosidad dinámica)	0.001	Kg/m s
v (velocidad)	1.8	m/s
Rugosidad tubería	0.2	mm

En primer lugar, se va a calcular el diámetro de la tubería para poder trabajar al caudal de salida del pozo y a la velocidad especificada en la Tabla 7. El cálculo se realiza en la Figura 5 del ANEXO 3 y se obtiene un diámetro de 9.5 cm, que son aproximadamente 3.75 pulgadas. Sabiendo este diámetro, se debe elegir de un catálogo de tuberías aquella que tenga el diámetro igual o superior al calculado.

Del catálogo de la empresa Tubinox se escoge la tubería de acero inoxidable de 4 pulgadas de diámetro para trabajar entre -29°C y 38°C. Se escoge la tubería del modelo 5S que posee una presión máxima de trabajo de 35 bares. [35]

Al elegir esta tubería del catálogo, que es un poco más grande que la que se ha calculado, se debe recalculer la velocidad para así realizar los cálculos posteriores con la velocidad real y no con la supuesta inicialmente. La nueva velocidad de trabajo será de 1.586 m/s y su cálculo se realiza en la Figura 6 del ANEXO 3. Además, el nuevo diámetro será de 10,2 cm (4 pulgadas).

Se va a calcular el número de Reynolds y la rugosidad relativa teniendo en cuenta los cambios que ha experimentado el sistema en el diámetro y en la velocidad de trabajo. Los cálculos se muestran en la Figura 7 del ANEXO 3 y el Reynolds posee un valor de $1.644 \cdot 10^5$ mientras que la rugosidad relativa posee un valor de $2 \cdot 10^{-3}$. Con estos dos valores calculados, se puede calcular el factor de fricción utilizando el diagrama de Moody. Del diagrama de Moody se obtiene el valor para el factor de fricción de 0.031.

Con todos los parámetros calculados anteriormente, se pueden calcular las pérdidas de carga mediante la ecuación de Darcy-Weisbach. En la Figura 8 del ANEXO 3 se muestra el cálculo y las pérdidas de carga ascienden a un valor de 97.86 m, que equivalen a 9.66 atmósferas. Sabiendo las pérdidas de carga, se puede aplicar la ecuación de Bernoulli entre la lámina libre del agua del pozo y la lámina libre del agua dentro de la cántara.

Los términos de presión son cero en ambos lados de la ecuación puesto que la presión en la lámina libre del agua sin tener en cuenta la atmosférica se considera como cero. Los términos de velocidad también se anulan porque en estado estacionario no habría variación de la altura del nivel de agua ni en el pozo ni en la cántara. La altura del agua de la cántara es de 1.57 m

(valor calculado en la Figura 4 del ANEXO 3) mientras que la altura de la lámina libre del pozo se considera como cero por ser el punto de referencia. La altura que debe proporcionar la bomba es de 99.43 m, que equivale a 9.82 atmósferas de presión. Su cálculo se muestra en la Figura 9 del ANEXO 3. Al saber la presión que debe aportar la bomba y el caudal que debe impulsar, se puede calcular la potencia que requerirá dicha bomba. La potencia de la bomba se calcula de la siguiente manera:

$$Potencia = \frac{Presión * Caudal}{Rendimiento} \quad (6)$$

En la ecuación (6) se puede ver que para calcular la potencia requerida por una bomba se requiere de la presión de trabajo, el caudal y su rendimiento. Anteriormente se ha calculado la presión y el caudal, así que se supone un valor del 95% para el rendimiento para poder calcular la potencia que requerirá la bomba. La bomba que impulsa agua desde el pozo hasta la cántara requiere una potencia de 13.46 kW. Su cálculo se muestra en la Figura 10 del ANEXO 3.

Por lo que respecta a la adición de químicos, se va a añadir anti incrustante, hipoclorito sódico para desinfectar, ácido sulfúrico para bajar el pH y un reductor de cloro para evitar que éste dañe las membranas. En primer lugar, se va a calcular la dosificación de anti incrustante, que en este caso es el hexametáfosfato de sodio. Las características del hexametáfosfo comercial encontrado se muestran en la tabla 8:

Tabla 8. Características del anti incrustante. [Adaptado de: [36]]

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad	2800	Kg/m ³
Pureza	8%	-----

La dosificación de este anti incrustante se realiza a partir de una disolución diluida no mayor del 5%. En este caso se va a preparar una disolución diluida al 2.5% puesto que el agua de mar viene previamente filtrada por el terreno. Esto significa que por cada 2.5 litros de anti incrustante se deben añadir 100 litros de agua. El cálculo de la disolución al 2.5% de anti incrustante se realiza en la Figura 11 del ANEXO 3 y la disolución posee una concentración de 0.875 kg/litro. [37]

A partir de esta disolución y sabiendo la dosificación requerida por el agua de mar entrante, se calcula el caudal que se debe añadir de la disolución de anti incrustante al agua de mar. El agua de mar entrante suele requerir una dosificación que varía entre 2 y 10 mg/litro de anti incrustante del tipo hexametáfosfato sódico y en este caso, se escoge una dosificación de 5 mg/litro. El cálculo se realiza en la Figura 12 del ANEXO 3 y el caudal de disolución de anti incrustante que se debe añadir es de 0.735 ml/s a dividir entre los 5 bastidores que posee la planta. [8]

Diseño de una planta desaladora mediante ósmosis inversa con una capacidad de producción de 5000 m³/día ubicada en la provincia de Alicante.

A partir del caudal de la disolución de anti incrustante se calcula el volumen del tanque que va a contener esta disolución y a partir del cual se dosificará en la línea de entrada a cada uno de los bastidores. Para poder calcular el volumen del tanque de esta disolución, se va a suponer que se quiere rellenar el tanque una vez al mes, con lo cual, ya se tiene el tiempo de vaciado del tanque. El volumen del tanque de la disolución de anti incrustante contiene un volumen máximo de 2.19 m³, de los cuales 1.9 m³ son de esta disolución. El cálculo se realiza en la Figura 13 del ANEXO 3.

A continuación, se realizan los cálculos referentes a la adición de hipoclorito sódico a la cántara del pretratamiento. Para ello, se encuentra hipoclorito sódico comercial con las características que se muestran en la Tabla 9:

Tabla 9. Características del hipoclorito sódico. [Adaptado de: [38]]

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad	1300	Kg/m ³
Pureza	15%	-----

Con los datos de la Tabla 9 se puede calcular la concentración de la disolución de hipoclorito sódico comercial. La concentración es de 0.195 kg/litro y el cálculo se muestra en la Figura 14 del ANEXO 3. Para el cálculo del caudal añadido de esta disolución de hipoclorito al agua de mar se requiere la concentración de la dosis. Se suele mantener una concentración entre 0.5 y 6 mg/litro de hipoclorito sódico en el agua de mar. En este caso, se va a añadir una dosis de 2 mg/litro debido a que el agua de mar entrante a la planta ya viene filtrada previamente por el terreno y por tanto su actividad biológica es baja. Este cálculo se realiza en la Figura 15 del ANEXO 3 y el caudal de la disolución de hipoclorito que se debe añadir al agua de mar es de 1.32 ml/s. [8]

Por lo que respecta al tanque que contiene la disolución de hipoclorito, se va a suponer que el tanque puede abastecer la planta durante un mes, con lo cual, se puede calcular el volumen de disolución que se va a necesitar. El tanque de la disolución de hipoclorito posee un volumen máximo de 3.93 m³, de los cuales 3.42 m³ son los que ocupa la disolución de hipoclorito. Este cálculo se observa en la Figura 16 del ANEXO 3.

Por lo que respecta a la adición de ácido, se escoge el ácido sulfúrico con las características de la Tabla 10:

Tabla 10. Características del ácido sulfúrico. [Adaptado de: [39]]

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad	1840	Kg/m ³
Pureza	96%	-----

Con los datos de la Tabla 10 se calcula la concentración que posee la disolución de ácido. Esta disolución posee una concentración de 1.77 kg/litro, lo que equivale a una concentración de 18 M y su cálculo se muestra en la Figura 17 del ANEXO 3. Estableciendo una dosis de 0.015 mg/litro de la disolución de ácido se puede calcular el caudal de ácido que se debe añadir al agua de mar para bajar su pH de 8 hasta 6.5. Se escoge un pH por debajo de 7 para evitar la precipitación de sales y su incrustación en las membranas. El caudal de ácido que se debe añadir es de 0.001 ml/s. El cálculo del pH del agua de mar final y el caudal de ácido a añadir se muestran en las Figuras 18 y 19 del ANEXO 3.

Para terminar con la adición de químicos, solamente queda calcular la adición del reductor de cloro, que en este caso se va a utilizar bisulfito sódico. En la Tabla 11 se muestran las características del bisulfito sódico comercial encontrado:

Tabla 11. Características del bisulfito sódico. [Adaptado de: [40]]

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad	1345	Kg/m ³
Pureza	39%	-----

Teniendo en cuenta las características del bisulfito que se muestran en la Tabla 11, se puede calcular la concentración que posee la disolución. En la Figura 20 del ANEXO 3 se muestra este cálculo y el resultado es de 0.525 kg/m³. Por lo que respecta a la dosis de bisulfito sódico, la dosis se encuentra entre 3 y 19 mg/litro. En este caso se va a tomar una dosis de 5 mg/litro y se va a calcular el caudal que se debe añadir de la disolución comercial. El cálculo se muestra en la Figura 21 del ANEXO 3. [8]

Por último, se calcula el volumen del tanque para contener la disolución de bisulfito. El cálculo se muestra en la Figura 22 del ANEXO 3 y el tanque puede contener un máximo de 3.65 m³ de los cuales 3.18 m³ son de disolución de bisulfito. El bisulfito y el anti incrustante se dosifican en la tubería de entrada a cada uno de los bastidores del sistema de membranas mientras que el ácido sulfúrico y el hipoclorito se añaden al agua de mar de la cántara de pretratamiento.

Después de realizar el tratamiento del agua de mar con los compuestos químicos correspondientes, el agua de mar debe pasar primero por un filtro de arena y posteriormente por un filtro de cartuchos antes de entrar al sistema de membranas. En primer lugar, se va a diseñar el filtro de arena. Para ello, se debe fijar una velocidad de filtración y un diámetro dentro del rango admisible y así calcular su longitud para que el caudal de entrada al filtro de arena tenga un tiempo de retención dentro del filtro de una hora. [41]

Los cálculos sobre el diseño del filtro de arena se realizan en la Figura 23 del ANEXO 3. El filtro de arena va a poseer un diámetro de 2.8 m, una longitud de 7.5 m, una velocidad de filtración de 15 m³/m² hora y un caudal a tratar igual que el que se extrae de un pozo con una bomba en la etapa de captación. Teniendo en cuenta que para cada bastidor se va a necesitar el doble de agua de mar que el agua extraída de un pozo, se requerirán 3 filtros de arena de las características anteriormente mencionadas para poder tratar el agua de mar entrante a un bastidor. Dos de esos filtros de arena tratarán cada uno el caudal correspondiente al caudal extraído de un pozo y el tercero se usará cuando haya que parar alguno de los otros dos.

Finalmente, se diseña el filtro de cartuchos. El filtro de cartucho elegido posee las características que se muestran en la Tabla 12:

Tabla 12. Características del filtro de cartucho. [Adaptado de: [42][43]]

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro	0.061	m
Longitud	0.508	m
Pérdidas de presión	0.8	bar
Presión de trabajo	6	bar
Caudal filtrado	20	litros/minuto

Este filtro de cartucho es de la marca Tashia, más concretamente, es el cartucho FA modelo CART 20 FA con un tamaño de poro de 5 micras y que está fabricado con hilo bobinado de polipropileno. No obstante, para poder realizar los cálculos se requiere de un caudal filtrado o una velocidad de filtración y en el catálogo de Tashia no se encuentra este dato del fabricante, así que se toma un filtro de cartucho similar de la marca Lenntech fabricado con el mismo material y los mismos tamaños. [42] [43]

En la Figura 24 del ANEXO 3 se realiza el cálculo de la velocidad de filtración que posee el cartucho. El cartucho elegido posee una velocidad de filtración de 12.33 m³/m² hora. Teniendo este dato y el caudal de entrada al filtro de cartuchos, que será el doble del caudal extraído de un pozo, se puede calcular el área total necesaria de filtro para filtrar ese caudal además del número de cartuchos que se requieren para cada filtro. El área total requerida es de 7.5 m² y el número de filtros requerido asciende a un total de 80 porque se sobredimensiona y su cálculo

se muestra en la Figura 25 del ANEXO 3. A continuación, se calcula la altura que tendrá el filtro de cartuchos, sabiendo que estará compuesto por 4 niveles, cada uno conteniendo 20 filtros de polipropileno. La altura del filtro de cartuchos será de 2 m como mínimo. El cálculo se muestra en la Figura 26 del ANEXO 3.

Para terminar con el pretratamiento, solo falta calcular la altura y la potencia de la bomba que va a extraer agua de la cántara para impulsarla al filtro de arena y el filtro de cartuchos. Para ello, se requiere calcular primero las pérdidas por fricción en las tuberías que hay en esta parte de la instalación. Para los siguientes cálculos se va a tener en cuenta información que se muestra en la Tabla 13:

Tabla 13. Información sobre tuberías [Elaboración propia]

Tramo	Recorrido	Longitud (m)	Caudal (m ³ /s)	Longitud total (m)
1	Cántara hasta entrada bomba	20	0.026	20
2	Salida bomba hasta entrada filtro de arena	20	0.013	40
3	Salida filtro de arena hasta entrada filtro de cartuchos	20	0.013	40
4	Salida filtro de cartuchos hasta entrada bomba de alta presión	20	0.026	20

Los tramos 2 y 3 de la Tabla 13 poseerán dos tramos de tubería, cada uno de 20 m y transportando un caudal igual al de salida de un pozo. Sobre estas tuberías ya se conoce información puesto que las tuberías que van desde cada uno de los pozos hasta la cántara de pretratamiento son iguales. Así que solo se requiere calcular su pérdida de carga directamente. Los otros dos tramos de tuberías, al poseer caudales más grandes, se deben realizar todos los cálculos expuestos al principio de este mismo apartado.

En primer lugar, se van a calcular las pérdidas de carga de los tramos 2 y 3 puesto que la información sobre este tipo de tubería ya se calculó anteriormente. Las pérdidas de estos tramos de tubería ascienden a 3.13 m, que es el equivalente a 0.31 atm. Su cálculo se muestra en la Figura 27 del ANEXO 3.

En segundo lugar, para poder calcular las pérdidas en los tramos 1 y 4, se debe calcular el diámetro de la tubería y recalcularse la velocidad de trabajo habiendo elegido del catálogo de

tuberías aquella que posea el mismo diámetro obtenido mediante el cálculo o el próximo superior. En este caso, el cálculo del diámetro de la tubería de los tramos 1 y 4 se muestra en la Figura 28 del ANEXO 3 y debe tener 5.31 pulgadas de diámetro. Del catálogo de Tubinox se escoge la tubería que posee un diámetro de 6 pulgadas que es el modelo 5S que soporta 31 bares de presión. [35]

Se calcula la nueva velocidad a la que va a trabajar la tubería de los tramos 1 y 4 sabiendo que se debe poner una tubería de 6 pulgadas en lugar de una de 5.31 pulgadas. La velocidad de trabajo en estos tramos será de 1.41 m/s y su cálculo se muestra en la Figura 29 del ANEXO 3. El siguiente paso es calcular el factor de fricción para poder utilizar la ecuación de Darcy-Weisbach para el cálculo de las pérdidas. Para ello, se debe ir al diagrama de Moody con un número de Reynolds y una rugosidad relativa. En la Figura 30 del ANEXO 3 se muestra el cálculo del número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería de 6 pulgadas.

El número de Reynolds asciende a un valor de $2.2 \cdot 10^5$ y la rugosidad relativa toma un valor de 0.001. Utilizando estos valores, mediante el diagrama de Moody se obtiene un valor del factor de fricción igual a 0.0275. Aplicando la ecuación de Darcy-Weisbach, se calculan las pérdidas por fricción en los tramos 1 y 4 de tuberías. Las pérdidas por fricción alcanzan un valor de 0.73 m, lo que equivale a una presión de 0.072 atm. Este cálculo se muestra en la Figura 31 del ANEXO 3.

Finalmente, con todos los datos anteriores y aplicando la ecuación de Bernoulli entre la lámina libre del agua del agua de mar de dentro de la cántara y el punto de entrada a la bomba de alta presión, se calcula la altura que debe proporcionar la bomba, así como su consumo energético. La bomba debe proporcionar una altura de 93 m, lo que equivale a una presión de 9.19 atm. Este cálculo se muestra en la Figura 32 del ANEXO 3. La potencia de la bomba se calcula en la Figura 33 del ANEXO 3 y su consumo es de 25.21 kW. Cabe destacar que habrá 5 bombas iguales que ésta extrayendo agua de la cántara para llevarla a cada uno de los bastidores.

5.4-SISTEMA DE MEMBRANAS

El sistema de membranas va a constar en 5 bastidores, pero el cálculo se va a realizar solamente para uno de ellos ya que los demás serán exactamente iguales. En primer lugar, se va a calcular el número de membranas requeridas y los tubos de presión que deben contener esas membranas. La membrana escogida es la FilmTec SW30HRLE-400 de la marca DuPont y sus características principales se muestran en la Tabla 14:

Tabla 14. Características de la membrana. [Adaptado de: [44]]

Parámetro	Valor
Área de membrana	37 m ²
Rechazo de sales estabilizado	99.8 %
Rechazo de boro	92 %
Pérdidas de presión	1 bar
Presión máxima de trabajo	83 bar

Para poder calcular el número de membranas que se requieren, se debe conocer el área total de filtrado que se requiere para obtener el caudal de permeado y el área de la membrana. Para calcular el área total de filtrado requerida, se hace uso de la siguiente ecuación:

$$\text{Área} = \frac{\text{Caudal volumétrico permeado}}{\text{Densidad de flujo}} \quad (7)$$

Para calcular el caudal volumétrico de permeado, se debe conocer el caudal de agua de mar entrante al sistema de membranas y la conversión. El caudal es un dato conocido puesto que en la etapa de pretratamiento ya se trabajó con el caudal de agua de mar que va a entrar al bastidor. Por lo que respecta a la conversión, se supone un valor del 45% para el diseño del sistema inicial.

La densidad de flujo debe ser un valor supuesto dentro de un rango aceptable. Para poder elegir un valor de densidad de flujo, se accede a una guía que posee DuPont sobre los rangos en los que deben encontrarse las densidades de flujo. La densidad de flujo debe encontrarse entre 12 y 17 litros/m² hora, con lo cual, se toma un valor de 15 litros/m² hora que se encuentra entre el rango de trabajo. [45]

El cálculo del número de membranas y tubos requeridos se muestra en la Figura 1 del ANEXO 4 y se requerirán 77 membranas a dividir entre 11 tubos de presión. Además, se calcularon los caudales de permeado y rechazo, que serán importantes para los cálculos siguientes.

A continuación, se calculan las concentraciones de todos los compuestos químicos en las corrientes de rechazo y permeado teniendo en cuenta la composición del agua de mar entrante. La composición del agua de mar entrante se muestra en la Tabla 15 y se puede ver también en la Figura 2 del ANEXO 4:

Tabla 15. Composición del agua de mar [Adaptado de: [46]]

Compuesto	Concentración (ppm)
Cloruro	21472.35
Sodio	11875.77
Magnesio	1535.45
Sulfato	1007.64
Calcio	455.84
Potasio	431.85
Bromo	73.41
Estroncio	9.12
Boro	5.52
Fluoruro	1.46
Bario	0.02
Total	36868

Con los datos de concentración de los componentes en el agua de mar y el caudal volumétrico de entrada al bastidor, se calcula el caudal másico de entrada para cada uno de los componentes. El cálculo se muestra en la Figura 3 del ANEXO 4. Los caudales másicos de los componentes en las corrientes de rechazo y permeado se calculan en las Figuras 4 y 5 del ANEXO 4. Los caudales másicos del rechazo se calculan utilizando el rechazo de sales que posee la membrana y los caudales del permeado se calculan restándole a los caudales másicos entrantes los del rechazo.

A partir de los caudales másicos de los componentes en el permeado y en el rechazo y sus respectivos caudales volumétricos, se calcula la concentración de cada uno de estos componentes en sus correspondientes corrientes. Cabe destacar que el pH en el permeado siempre baja un poco con respecto al pH a la entrada, con lo cual, se va a considerar que el pH del permeado es 2 décimas más bajo que el de la entrada.

En la Tabla 16 se pueden ver las concentraciones de los componentes en la corriente de rechazo y en la Figura 6 del ANEXO 4 se muestra su cálculo:

Tabla 16. Concentraciones en el rechazo. [Elaboración propia]

Compuesto	Concentración (ppm)
Cloruro	38960
Sodio	21550
Magnesio	2786
Sulfato	1828
Calcio	827.14
Potasio	783.61
Bromo	133.21
Estroncio	16.55
Boro	9.23
Fluoruro	2.65
Bario	0.036
Total	66896.43

En la Tabla 17 se pueden ver las concentraciones de los componentes en la corriente de permeado y en la Figura 7 del ANEXO 4 se muestra su cálculo:

Tabla 17. Concentraciones en el permeado. [Elaboración propia]

Compuesto	Concentración (ppm)
Cloruro	95.43
Sodio	52.78
Magnesio	6.82
Sulfato	4.48
Calcio	2.03
Potasio	1.92
Bromo	0.33
Estroncio	0.041
Boro	0.981
Fluoruro	0.006
Bario	0.000089
pH	6.3
Total	164.82

Para asegurar que el agua obtenida en el permeado cumple con la legislación, se toman datos de las concentraciones del BOE para comparar con los obtenidos en este sistema de membranas. En la Tabla 18 se muestran los valores límite y los valores orientativos para cada uno de los compuestos. Comparando los valores calculados del permeado con los del BOE, se puede ver que todas las concentraciones de los compuestos expuestos se encuentran en valores incluso por debajo del nivel orientativo siendo solamente el pH el que no cumple porque se encuentra dos décimas por debajo del valor mínimo del rango orientativo. No obstante, el agua recién salida del sistema como permeado no es apta para consumo humano debido a la baja concentración de sales que posee y aún queda pasarla por la etapa de remineralización posterior para adicionarle sales minerales y ajustar su pH para que pueda ser enviada a la red.

Tabla 18. Concentraciones límite. [Adaptado de: [46]]

Compuesto	Concentración orientativa (ppm)	Concentración máxima (ppm)
Boro	1.5	2.4
Fluoruro	1.5	-----
Cloruro	250	-----
Sodio	200	600
Sulfato	250	500
Calcio	100	-----
Magnesio	30	-----
Potasio	10	-----
Dureza	500	-----
pH	6.5-9.5	4.5-10

A continuación, se calcula la potencia de la bomba de alta presión y la bomba booster. La bomba de alta presión será la encargada de subir la presión desde 1 bar al que se encuentra el agua de mar en la entrada de la bomba hasta 65 bares de presión, que será la presión supuesta a la que trabajará el sistema de membranas. Por otro lado, la bomba booster será la encargada de aumentar la presión de la corriente de agua de mar bypassada hasta los 65 bares de presión. En la entrada de la bomba de alta presión se realiza un bypass del 50% a la corriente para que entre a un intercambiador de presiones junto con el rechazo, así se aprovechará la presión del rechazo para aumentar la presión de la mitad del caudal de entrada. La potencia de las bombas de alta presión y booster se muestran en la Figura 8 del ANEXO 4. La bomba de alta presión tendrá un consumo de 88 kW y la bomba booster tendrá un consumo de 9.48 kW.

Por lo que respecta al intercambiador de presiones, se va a suponer con una transferencia de energía del 100%, con lo cual, los 58 bares de presión a los que se encuentra el rechazo son transferidos a la mitad del caudal de entrada al sistema de membranas, consiguiendo aprovechar la energía que posee el rechazo haciendo que disminuya el coste energético de la bomba de alta presión.

Para terminar, las membranas deben limpiarse durante la semana de limpieza de la planta que se realiza una vez al año. Para saber cómo se limpian las membranas elegidas para este sistema, se accede a su ficha técnica, dónde el fabricante nos informa de que las membranas de esta índole se limpian a un pH ácido de 1 como mínimo durante 30 minutos. [44]

Para realizar la limpieza del sistema de membranas, se elige el ácido sulfúrico comercial que también es utilizado en el pretratamiento. Este ácido está muy concentrado (18 M) y posee un

pH de 0.3, con lo cual, se le debe añadir agua destilada para formar una disolución de ácido sulfúrico que posea un pH de 1 como mínimo para poder limpiar el sistema de membranas. [44]

En la Figura 9 del ANEXO 4 se muestra el cálculo del volumen de agua destilada que se debe añadir a un litro de ácido sulfúrico comercial para que la mezcla final tenga un pH de 1. Se deben añadir 4.1 litros de agua destilada por cada litro de ácido sulfúrico.

A continuación, se calcula el volumen total de la disolución de ácido sulfúrico con agua destilada se requiere para llenar todos los módulos de membrana que hay en la instalación. Para ello, se debe calcular el volumen que puede haber dentro de un módulo de membrana teniendo en cuenta su espaciado, su longitud y el diámetro del módulo. El cálculo se realiza en la Figura 10 del ANEXO 4. Para llenar todo el sistema de membranas, se requieren 2272 litros de disolución de ácido sulfúrico. El tanque que va a contener esta disolución va a tener un volumen de 2613 litros, lo cual, si suponemos un diámetro de 1.5 m, su altura va a ser de 1.48 m. Estos cálculos se muestran en la Figura 11 del ANEXO 4.

5.5-REMINEALIZACIÓN

En esta etapa se diseña un contactor de calcita para remineralizar el permeado salido del sistema de membranas, además de una balsa para almacenamiento de agua donde se le va a adicionar sosa para aumentar el pH hasta que se encuentre dentro del rango de pH aceptable.

En primer lugar, se diseña el contactor de calcita. Para poder diseñarlo, se deben tener en cuenta ciertos parámetros y sus valores óptimos para el diseño. Estos parámetros óptimos se muestran en la Tabla 19:

Tabla 19. Parámetros óptimos del contactor de calcita. [Adaptado de: [47]]

Parámetro	Valor
Velocidad	8 m/hora
Tiempo de contacto	10 minutos
pH del agua de entrada	3.5
Dosis de CaCO ₃	0.163 kg/m ³

Las dimensiones del contactor de calcita son las siguientes: 1.33 m de altura con un diámetro de 2.57 m. Los cálculos se muestran en la Figura 1 del ANEXO 5. A continuación, se calcula el caudal de ácido sulfúrico requerido para bajar el pH de 6.3 hasta 3.5 para que el lecho de calcita trabaje en su punto óptimo. En las Figuras 2 y 3 del ANEXO 5 se muestran los cálculos realizados en lo referente al ácido sulfúrico que se debe añadir. Se deberán añadir 0.094 ml/s de ácido sulfúrico para bajar el pH del permeado de 6.3 hasta 3.5.

Se calcula la concentración del agua producto y se obtiene una concentración total de 464.82 mg/litro, sin embargo, este resultado se obtiene aumentando la dosis de carbonato cálcico

desde 0.163 kg/m³ hasta los 0.3 kg/m³. Se ha decidido aumentar la dosis para acercarnos más al valor óptimo de la dureza de 500 ppm que viene reflejado en la Tabla 18. Los cálculos realizados se pueden ver en las Figuras 4, 5 y 6 del ANEXO 5.

Sabiendo la cantidad de ácido sulfúrico requerida tanto para bajar el pH del agua de mar entrante en el pretratamiento como para disminuir el pH de la corriente de permeado, se puede diseñar un tanque para que contenga el ácido sulfúrico, al igual que los demás compuestos que se adicionan en el pretratamiento. Se debe tener en cuenta que el caudal de ácido del pretratamiento es para tratar todo el caudal entrante mientras que el caudal de ácido del contactor es solamente para un bastidor, con lo cual, habría que multiplicar por 5 el caudal de ácido del contactor. El tanque de ácido va tener una capacidad máxima de 1.4 m³, de los cuales, 1.22 m³ van a ser de ácido sulfúrico. El cálculo se muestra en la Figura 7 del ANEXO 5.

Para terminar con el diseño solamente falta diseñar la balsa de almacenamiento de agua producto a la cual se le va a adicionar sosa para aumentar su pH desde 3.5 a 7.5 para poder enviar el agua a la red de suministro de las localidades.

El tamaño de la balsa de almacenamiento de agua producto va a tener un volumen igual al 10% de la producción diaria, es decir, 500 m³ de capacidad. Con el factor de seguridad para el volumen, la balsa tendrá una capacidad máxima de 575 m³. La balsa tendrá una superficie de 144 m² y una profundidad de 4 m. Estos cálculos se muestran en la Figura 8 del ANEXO 5.

Para terminar, solamente se necesita calcular el caudal de sosa que se debe añadir al agua producto almacenada en la balsa de almacenamiento para subir el pH del agua producto desde 3.5 hasta 7.5 para poder enviarla a la red de suministro. Las características de la sosa comercial que se va a utilizar se muestran en la Tabla 20:

Tabla 20. Características de la sosa. [Adaptado de: [48]]

Parámetro	Valor
Densidad	1274 kg/m ³
Pureza	25%

Teniendo en cuenta las características de la sosa que se muestran en la Tabla 20 se calculan las concentraciones tanto máscas y molares de la sosa. La sosa posee una concentración de 0.32 kg/litro, lo que equivale a una concentración de 8 moles/litro. Este cálculo se muestra en la Figura 9 del ANEXO 5.

Por lo que respecta al caudal de sosa que se debe añadir, éste se calcula en la Figura 10 del ANEXO 5 y su resultado final es de 0.004 ml/s. El pH que tendrá el agua producto es de 7.57 y se calcula en la Figura 11 del ANEXO 5.

CAPÍTULO 6. SIMULACIÓN

Para poder saber cómo funciona un sistema de membranas, previamente se hace uso de un simulador para ayudarnos a ver el funcionamiento final del sistema de membranas que se quiere utilizar. En el caso de este trabajo fin de máster, se ha utilizado el software gratuito de la empresa DuPont llamado WAVE.

Al ejecutar el programa, la primera ventana que aparece es la que se muestra en la Figura 25:

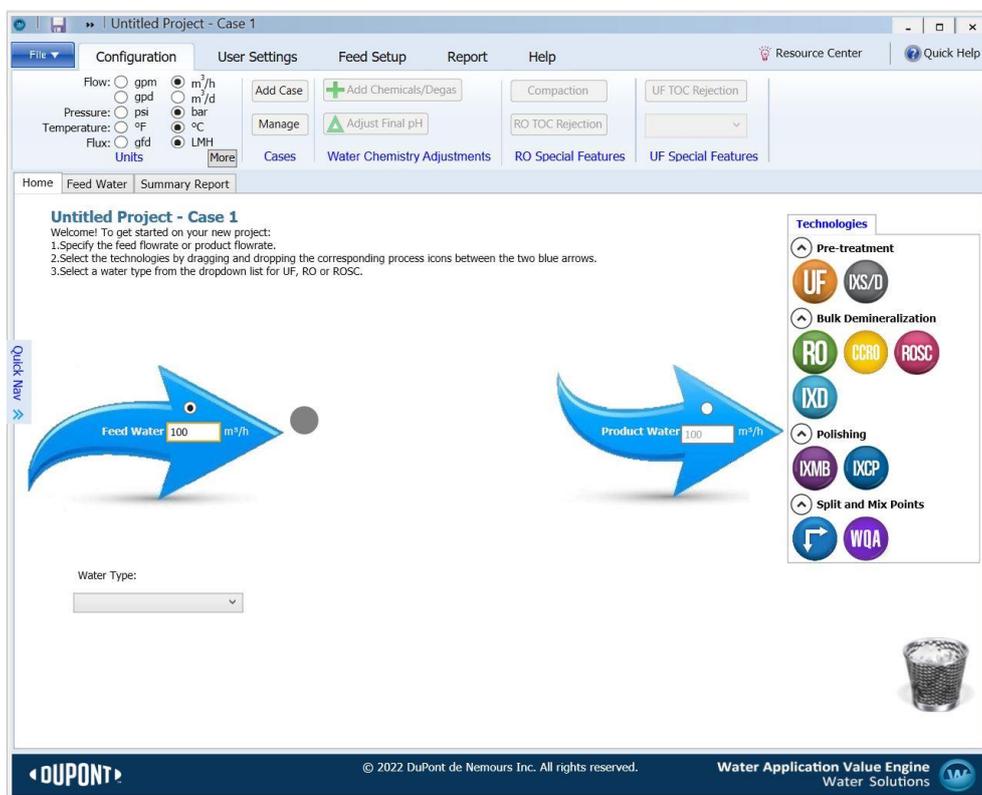


Figura 25. Pestaña inicial de WAVE [Elaboración propia]

En la Figura 25 se puede ver que el programa nos da la opción de elegir entre introducirle una cantidad de agua de mar o la cantidad de agua dulce que se quiere obtener. En este caso, se va a simular un solo bastidor de la planta, puesto que todos los demás serán exactamente iguales. Con esto en mente, se escoge la opción de obtener una cierta cantidad de agua dulce, que en este caso será de 1000 m³/día. Además de esto, se debe escoger una bolita del apartado de tecnologías que se encuentra en la parte derecha. Se escoge RO (Reverse osmosis) que es la ósmosis inversa ya que esta es la tecnología de nuestro sistema de membranas.

Diseño de una planta desaladora mediante ósmosis inversa con una capacidad de producción de 5000 m³/día ubicada en la provincia de Alicante.

En la Figura 26 se muestra cómo quedaría la primera pestaña del programa con los datos de nuestro sistema:

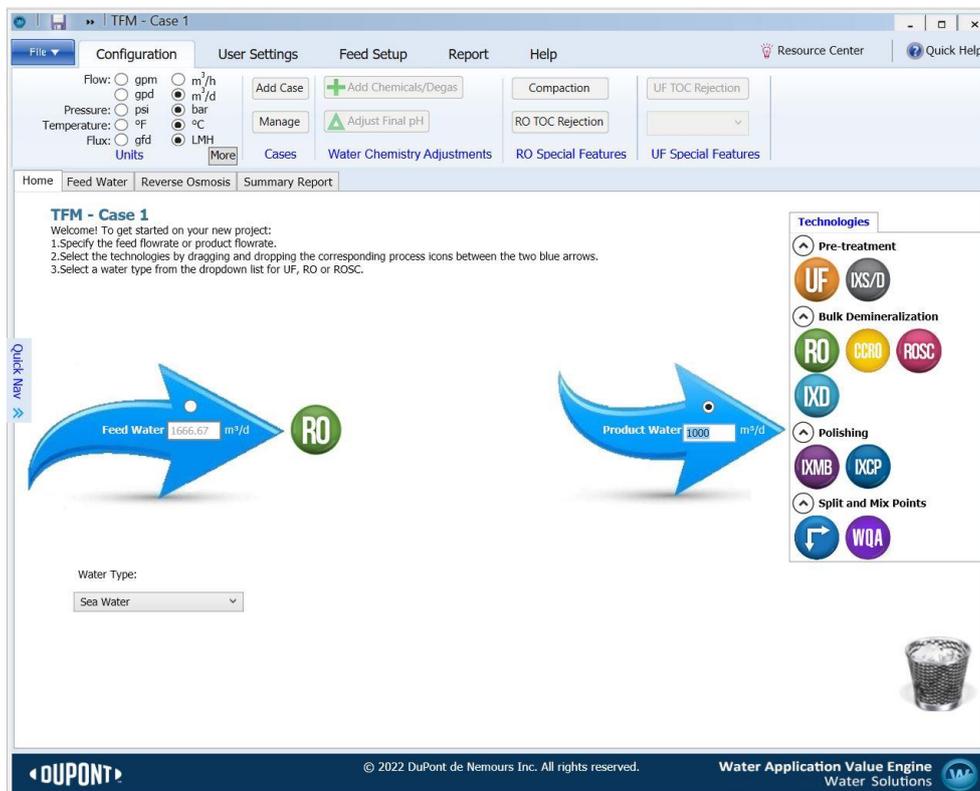


Figura 26. Pestaña inicial configurada. [Elaboración propia]

Una vez se tiene configurado el sistema, se debe pasar a la siguiente pestaña del programa, que es en la que se van a introducir los datos del agua de mar que va a introducirse al sistema de membranas. La temperatura de trabajo va a ser de 25 °C, el agua de mar va a entrar a un pH de 8.1 y el tipo de pretratamiento es el convencional. En la Figura 27 se puede ver esta pestaña configurada con todas las concentraciones de todos los compuestos y opciones adicionales:

Diseño de una planta desaladora mediante ósmosis inversa con una capacidad de producción de 5000 m³/día ubicada en la provincia de Alicante.

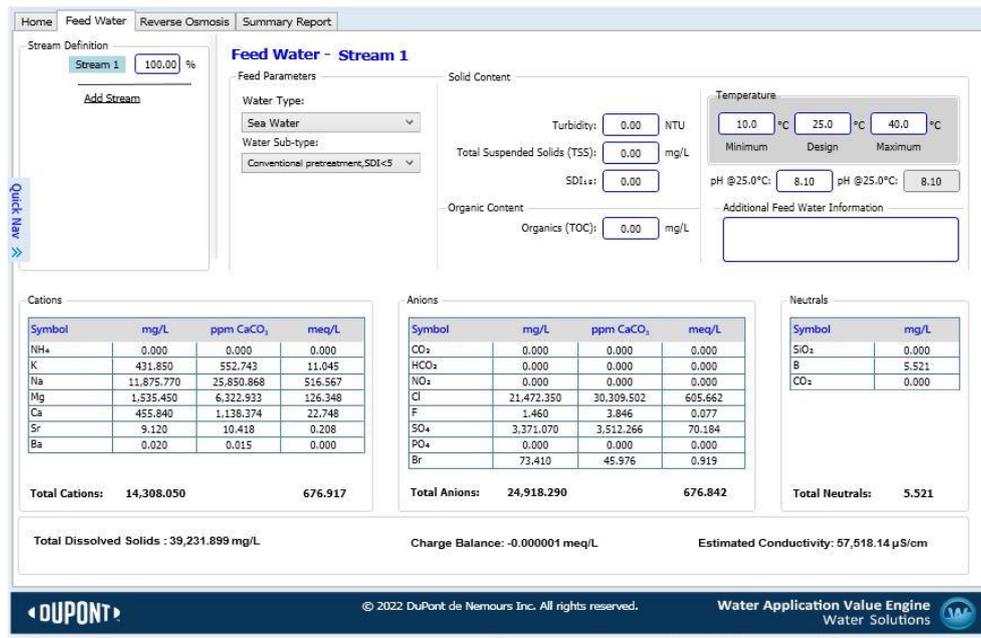


Figura 27. Pestaña de agua de alimentación configurada. [Elaboración propia]

Al introducir por primera vez las concentraciones de todos los compuestos, el programa nos indica que existe un desbalanceo de cargas entre aniones y cationes, con lo cual, para poder avanzar se deben balancear las cargas adicionando aniones o cationes al agua. En este caso, había demasiadas cargas positivas y el programa dejó introducir una mayor cantidad de sulfatos para poder compensar las cargas y así poder avanzar en la simulación. Una vez se configura el agua de entrada al proceso de ósmosis inversa, se avanza a la siguiente pestaña, que es la de proceso, que en este caso es la ósmosis inversa. En la Figura 28 se muestra configurada la pestaña de proceso según lo que se ha obtenido en el diseño realizado:

Reverse Osmosis Pass Configuration

Configuration for Pass 1

Number of Stages: 1 2 3 4 5

Flow Factor:

Temperature: Design °C

Pass Permeate Back Pressure: bar

Flows

Feed Flow: m³/d

Recovery: %

Permeate Flow: m³/d

Flux: LMH

Conc. Recycle Flow: m³/d

Bypass Flow: m³/d

Stages	
	Stage 1
# PV per stage	11
# Els per PV	7
Element Type	SW30HRLE-400
Specs	
Total Els per Stage	77
Pre-stage ΔP (bar)	0.31
Stage Back Press (bar)	0.00
Boost Press (bar)	N/A
Feed Press (bar)	0
% Conc to Feed	0.00
Flow Factor	1.00

Figura 28. Pestaña de proceso configurada. [Elaboración propia]

En la Figura 28 se puede ver que se ha elegido la membrana SW30HRLE400, con 7 membranas por tubo y 11 tubos de presión. Esto da lugar a una densidad de flujo de 14.6 litros/m² hora. Además, se ha situado la conversión en 45% ya que es con la que se diseñó el sistema inicialmente.

Finalmente, se encuentra la pestaña de resultados. En esta pestaña, el software muestra gran cantidad de datos relevantes sobre el sistema, entre los cuales se encuentran: concentraciones del rechazo y del permeado y el consumo energético del sistema.

Teniendo todo esto en cuenta, para realizar un análisis de sensibilidad, de la pestaña inicial y del agua de alimentación no se cambia nada puesto que el tipo de sistema y el agua de mar son iguales en todas las simulaciones que se van a realizar. El análisis de sensibilidad que se va a realizar compete principalmente al consumo energético del sistema de membranas, es decir, que es de interés saber cuánta energía se requiere en un bastidor para poder producir un metro cúbico de agua producto y este es un dato que nos da el programa en la pestaña de resultados.

Para poder ver cambios en el coste energético dentro de un mismo sistema, se va escoger un rango de conversiones y densidades de flujo para ir cambiando dentro del sistema y así poder ver la evolución del coste energético cuando se tienen conversiones bajas o altas y cuando se

tienen densidades de flujo bajas o altas. El rango de conversiones elegido va a estar entre 25% y 60%. Se empezará en 25% e irá subiendo un 5% cada vez que se quiera variar el sistema. Por otro lado, para cambiar la densidad de flujo entre 12 y 17 litros/ m² hora dentro del sistema, se varían el número de membranas por tubo, situando este valor entre 6 y 8 membranas y se ajusta la densidad de flujo cambiando el número de tubos de presión del bastidor.

Para obtener distintos valores de coste energético y obtener distintas series de datos se realiza lo siguiente: se fija una densidad de flujo de trabajo cuando el sistema tiene 6 membranas por tubo y se varía la conversión desde 25% hasta el 60% para obtener datos de coste energético a esa densidad de flujo específica, luego, se varía la densidad de flujo del sistema variando el número de tubos de presión del sistema manteniendo el mismo número de membranas por tubo y se vuelve a variar la conversión para obtener resultados nuevamente. Se realiza esto con todas las densidades de flujo posibles que se encuentren entre 12 y 17 litros/ m² hora manteniendo constante el número de membranas por tubo para dar lugar a la serie 1. La serie 2 es lo mismo, solo que se cambia el número de membranas por tubo a 7 y la serie 3 se cambia el número de membranas por tubo a 8. Para poder comparar membranas entre sí, se escogen las siguientes: SW30HRLE400, que es la que tiene nuestro sistema inicial, la SW30XHR400 y la SW30XLE400. Se realiza el mismo proceso de simulación para todas las membranas y así se obtienen datos de coste energético para todas ellas a distintas densidades de flujo y conversión.

CAPÍTULO 7. RESULTADOS

En este capítulo se van a mostrar los resultados obtenidos en las distintas series para cada una de las membranas con las que se realizaron las simulaciones.

7.1-MEMBRANA SW30HRLE400

7.1.1-SERIE 1

Lo que se observa en la Figura 29 es lo siguiente: existen distintas series de datos, como por ejemplo la serie 1-1. Esta serie en concreto quiere decir que existen 6 membranas por tubo de presión y que la densidad de flujo es la más elevada posible, en este caso, 17 litros/m² hora. Teniendo esto en cuenta, la serie 1-1 representa a los datos más elevados de coste energético en cada una de las conversiones. Si se baja la densidad de flujo del sistema, la serie pasa a denominarse serie 1-2, porque, al igual que la primera, posee 6 membranas por tubo de presión, pero su densidad de flujo es inferior a 17 litros/m² hora. Así se construyen todas las series, desde la 1-1 hasta la 1-6, siendo la 1-1 la que tiene una mayor densidad de flujo y 6 membranas por tubo de presión y la 1-6 la que tiene la densidad de flujo más baja y 6 membranas por tubo de presión.

Además, los puntos de las distintas series se encuentran en color rojo o en color verde. Si se encuentra en color rojo, lo que esto quiere decir es que el coste energético supera el valor fijado de 2.5 kWh/m³ como máximo, con lo cual, no es un punto de operación del sistema válido para trabajar, puesto que excede el límite fijado. Si, por el contrario, el punto es de color verde, es un punto de operación válido puesto que posee un coste energético más bajo que el máximo fijado.

Teniendo esto en cuenta, en la Figura 29 se puede ver que la serie 1-1 no posee ningún punto válido, ya que todos los puntos a distintas conversiones dan lugar a consumos energéticos mayores que 2.5 kWh/m³. A partir de la serie 1-2, cuando la densidad de flujo ha bajado un poco, empiezan a haber puntos válidos a conversiones de 50% y 55%. La serie 1-3 sigue bajando su consumo energético con respecto a la serie 1-2, con lo cual, consigue un punto válido más, el que se encuentra a una conversión del 60%. Las series 1-4, 1-5 y 1-6 son las que mejores resultados obtienen puesto que poseen valores válidos en un rango de conversiones que va desde 45% hasta el 60%. Sin embargo, aunque las últimas 3 series poseen valores válidos entre 45% y 60% de conversión, la serie que consigue un coste energético más bajo es la serie 1-6.

Diseño de una planta desaladora mediante ósmosis inversa con una capacidad de producción de 5000 m³/día ubicada en la provincia de Alicante.

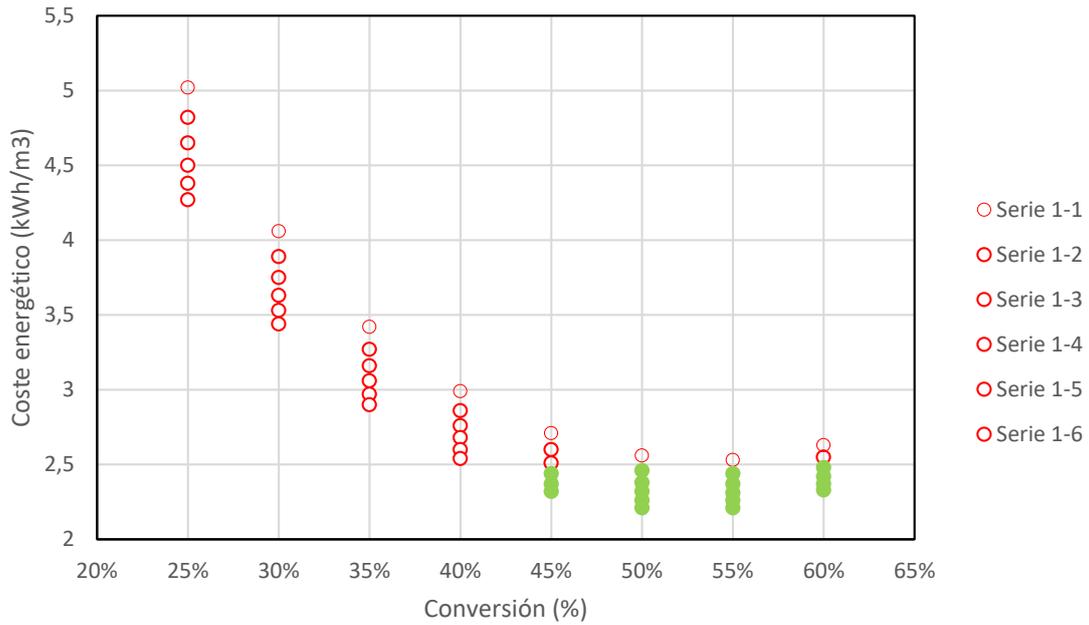


Figura 29. Resultados serie 1-Membrana 1.

7.1.2-SERIE 2

Al aumentar el número de membranas por tubo a 7, se obtienen los siguientes resultados:

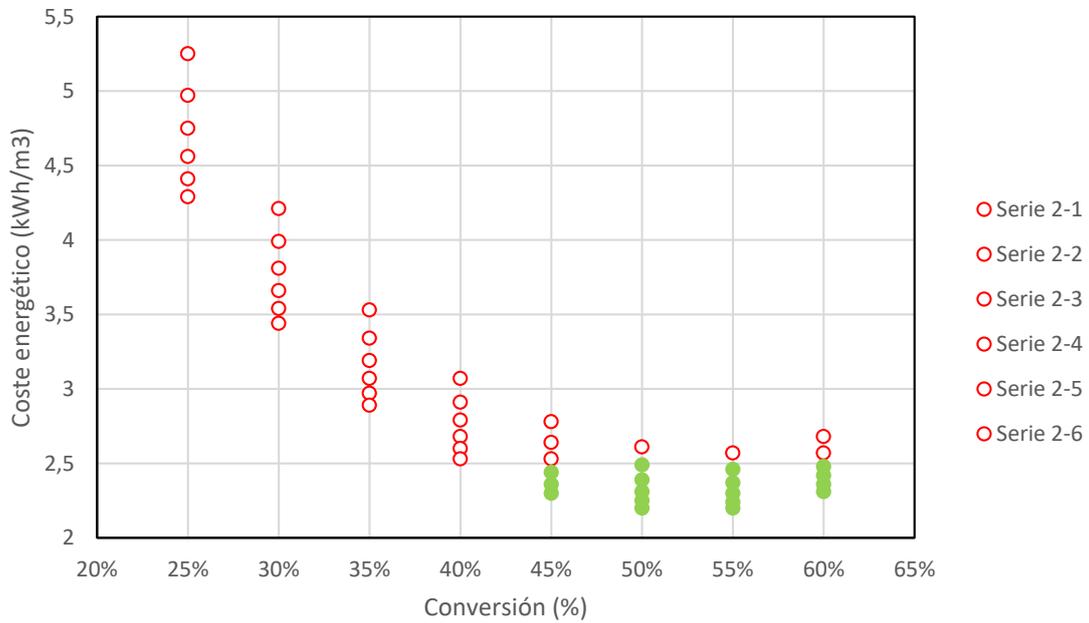


Figura 30. Resultados serie 2-Membrana 1.

Por lo que se puede ver en la Figura 30, en este caso la serie 2-1 tampoco consigue obtener ningún punto válido. A partir de la serie 2-2 empiezan a aparecer puntos válidos a conversiones de 50% y 55%. La serie 2-3 consigue bajar el consumo energético con respecto a la serie 2-2 y

consigue un punto válido extra a 60% de conversión. Las series 2-4, 2-5 y 2-6 son las que más valores válidos poseen. La serie 2-6 consigue valores un poco más bajos que la serie 1-6 del subapartado anterior, lo cual significa que a conversiones mayores al 45% los consumos energéticos bajan al aumentar el número de membranas por tubo. Si nos fijamos y comparamos las series 1 y 2, a conversiones bajas y altas densidades de flujo, la serie 2 posee unos consumos energéticos más elevados que la serie 1. Mientras que a densidades de flujo bajas y mayores conversiones, la serie 2 consigue mejores resultados con respecto a la serie 1.

7.1.3-SERIE 3

Al aumentar el número de membranas por tubo a 8 se obtienen los siguientes resultados:

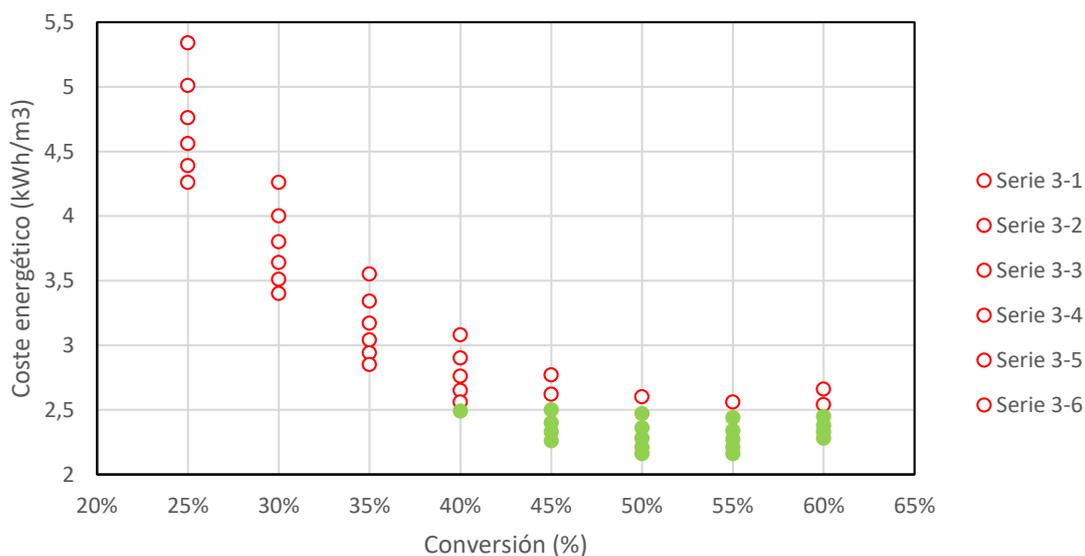


Figura 31. Resultados serie 3-Membrana 1.

En esta última serie se observa lo mismo que en las otras 2 anteriores, solo que en este caso se aumenta el número de membranas por tubo a 8. Las series a bajas conversiones y elevadas densidades de flujo aumentan su coste energético con respecto a la serie 1 y 2 pero, bajan todavía más el consumo a conversiones entre 45% y 60% a bajas densidades de flujo.

Si se quisiera utilizar la membrana SW30HRLE400 para el sistema de membranas, la mejor opción sería trabajar con 8 membranas por tubo de presión, a densidades de flujo bajas o cercanas a 12 litros/m² hora y a conversiones de 45%, 50% o 55% ya que esos puntos son los que han obtenido un consumo energético más bajo de las 3 series realizadas para esta membrana.

7.2-MEMBRANA SW30XHR400

7.2.1-SERIE 1

Cuando se tienen 6 membranas por tubo de presión, se obtienen los siguientes resultados:

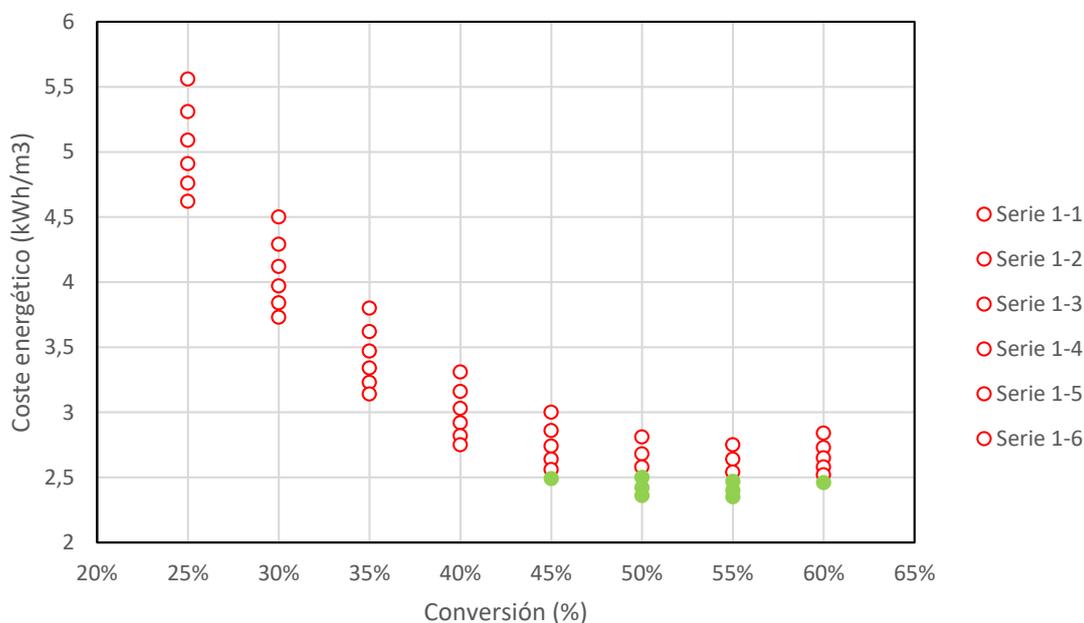


Figura 32. Resultados serie 1-Membrana 2.

En el caso de esta membrana, al trabajar con 6 membranas por tubo de presión, las primeras 3 series no obtienen puntos de operación válidos porque siempre se encuentran por encima del máximo fijado de consumo energético. Es la serie 1-4 la que obtiene los primeros dos puntos de operación válidos a conversiones de 50% y 55%. La serie 1-5 se encuentra en la misma situación que la 1-4 solo que posee unos consumos energéticos un poco menores. La serie 1-6 es la que más puntos válidos obtiene, ya que puede trabajar a conversiones de 45%, 50%, 55% y 60%.

7.2.2-SERIE 2

En la Figura 33 se puede ver que, al igual que ocurre con la serie 1, las primeras 3 series de datos siguen sin obtener valores de operación válidos, aunque se haya aumentado el número de membranas por tubo de 6 a 7. Es la serie 2-4 la que presenta dos valores válidos a conversiones de 50% y 55%. La serie 2-5 se encuentra en la misma situación que la 2-4, solo que posee unos consumos energéticos menores. Por último, la serie 2-6, al igual que la serie 1 para esta membrana, posee puntos válidos a conversiones que van desde 45% hasta 60%. Al comparar las series 1 y las series 2 de esta membrana, se observa que ocurre lo mismo que con las series de la membrana anterior. A elevadas densidades de flujo y bajas conversiones, al aumentar el número de membranas por tubo, el coste energético aumenta, mientras que, a elevadas conversiones y bajas densidades de flujo, al aumentar el número de membranas por tubo, el coste energético disminuye. A continuación, se muestra la Figura 33:

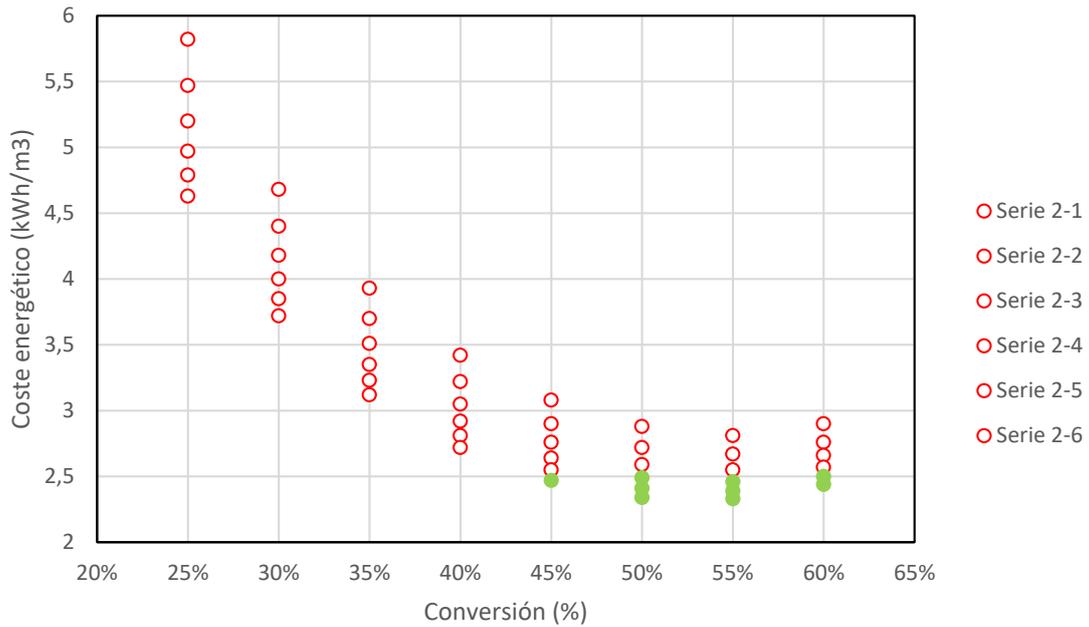


Figura 33. Resultados serie 2-Membrana 2.

7.2.3-SERIE 3

Al aumentar el número de membranas por tubo a 8 se obtienen los siguientes resultados:

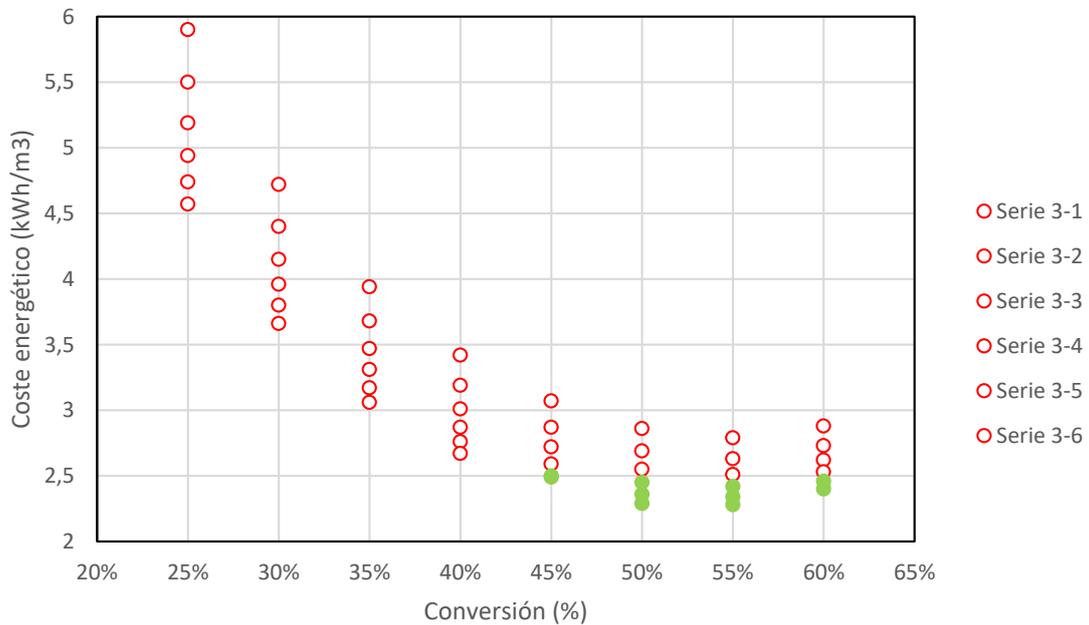


Figura 34. Resultados serie 3-Membrana 2.

Por lo que se observa en la Figura 34, las primeras 3 series no poseen puntos de operación válidos puesto que exceden el límite de consumo energético. La serie 3-4 posee dos puntos válidos a conversiones de 50% y 55%. Las series 3-5 y 3-6 poseen 4 puntos de operación válidos

a conversiones que van desde 45% hasta 60%. En estas series ocurre exactamente lo mismo si se comparan con las dos anteriores. A bajas conversiones y elevadas densidades de flujo el coste energético crece y a conversiones más altas y densidades de flujo más bajas el consumo energético disminuye. Si se quisiera usar esta membrana en el sistema se debería trabajar con 8 membranas por tubo de presión, a una densidad de flujo lo más cercana a 12 litros/m² hora y una conversión que va desde 45% hasta 60%.

7.3-MEMBRANA SW30XLE400

7.3.1-SERIE 1

Al poner 6 membranas por tubo de presión se obtienen los siguientes resultados:

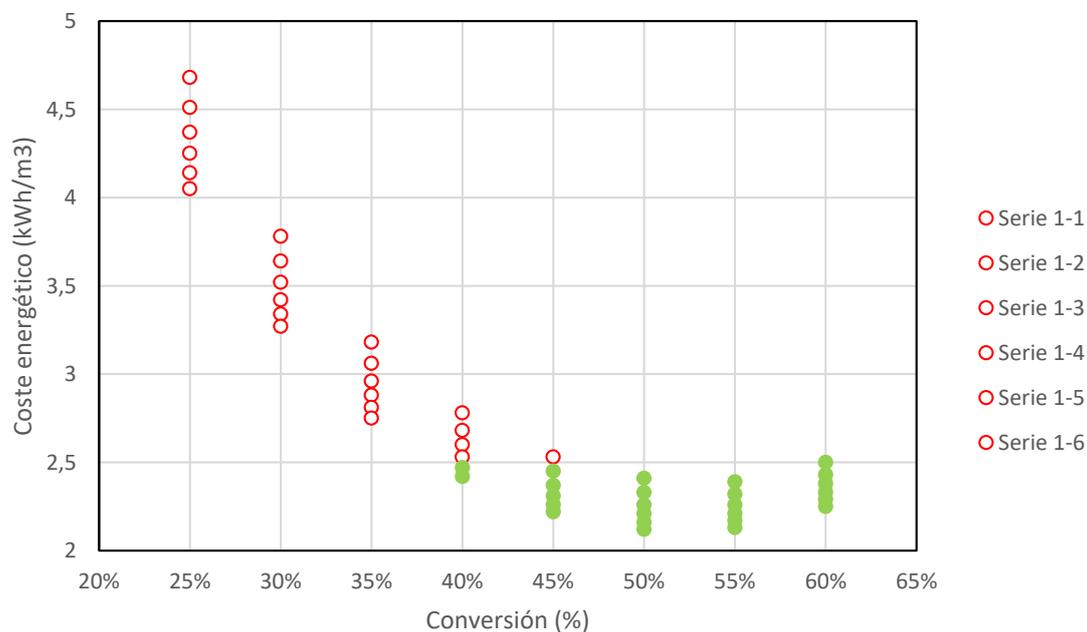


Figura 35. Resultados serie 1-Membrana 3.

En el caso de esta membrana, la serie 1-1 ya obtiene puntos válidos a conversiones de 50%, 55% y 60%. La serie 1-2, con respecto a la serie 1-1, posee un punto de operación válido extra cuando la conversión es de 45%. Las series 1-3, 1-4 y 1-5 poseen valores válidos a las mismas conversiones que la serie 1-2 pero el coste energético va disminuyendo a medida que disminuye la densidad de flujo. Por último, la serie 1-6 posee puntos válidos desde el 40% de conversión hasta el 60%.

7.3.2-SERIE 2

Al poner 7 membranas por tubo se obtienen los siguientes resultados:

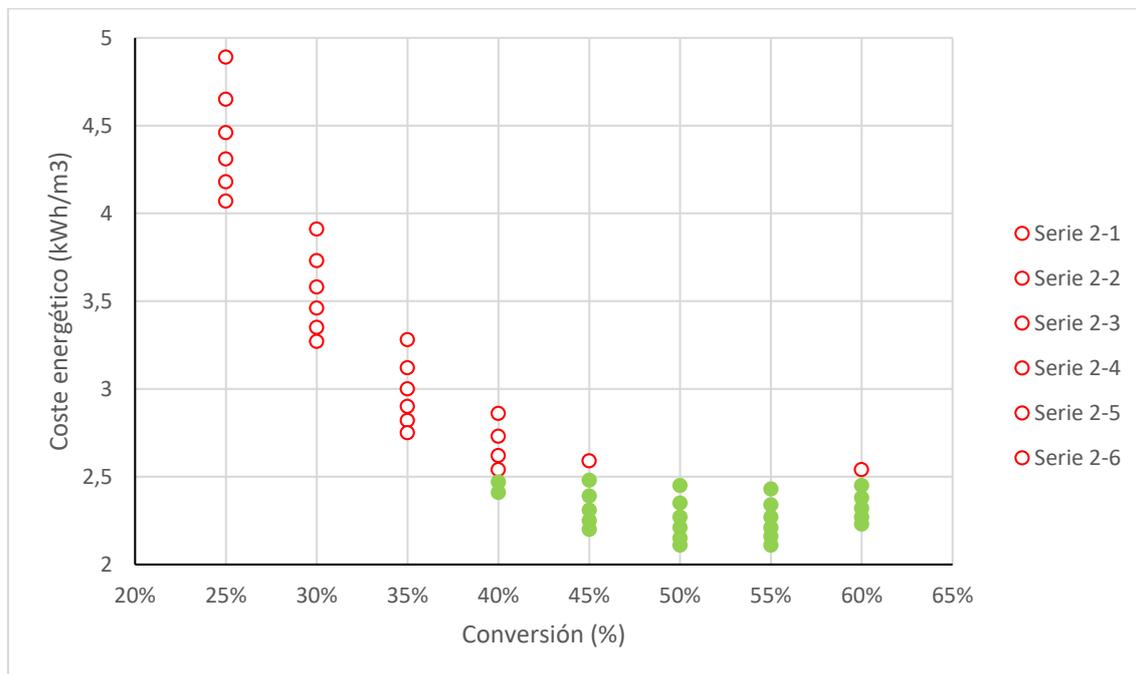


Figura 36. Resultados serie 2-Membrana 3.

Por lo que se puede ver en la Figura 36, la serie 2-1 solamente posee dos puntos de operación válidos, que se encuentran a conversiones de 50% y 55%. Las series 2-2, 2-3 y 2-4 tienen puntos válidos a conversiones que van desde 45% hasta el 60%. Las últimas dos series poseen puntos de operación válidos desde 40% de conversión hasta el 60% de conversión. Si se comparan las series 1 y 2, a conversiones bajas y densidades de flujo elevadas, la serie 2 posee mayores costes energéticos que la serie 1, mientras que, a bajas densidades de flujo y conversiones elevadas, la serie 2 posee costes energéticos más bajos que la serie 1.

7.3.3-SERIE 3

Por lo que se puede ver en la Figura 37, la serie 3-1 posee dos puntos de operación válidos, uno a 50% de conversión y otro al 55% de conversión. Las series 3-2, 3-3 y 3-4 poseen cuatro puntos de operación válidos, situados entre 45% y el 60% de conversión. Las series 3-5 y 3-6 poseen puntos de operación entre las conversiones de 40% y el 60%. Si se usara esta membrana para el sistema, podría trabajar a una densidad de flujo cercana a 12 litros/m² hora, con una conversión del 45% o 50% y con 8 membranas por tubo de presión. A continuación, se muestra la Figura 37:

Diseño de una planta desaladora mediante ósmosis inversa con una capacidad de producción de 5000 m³/día ubicada en la provincia de Alicante.

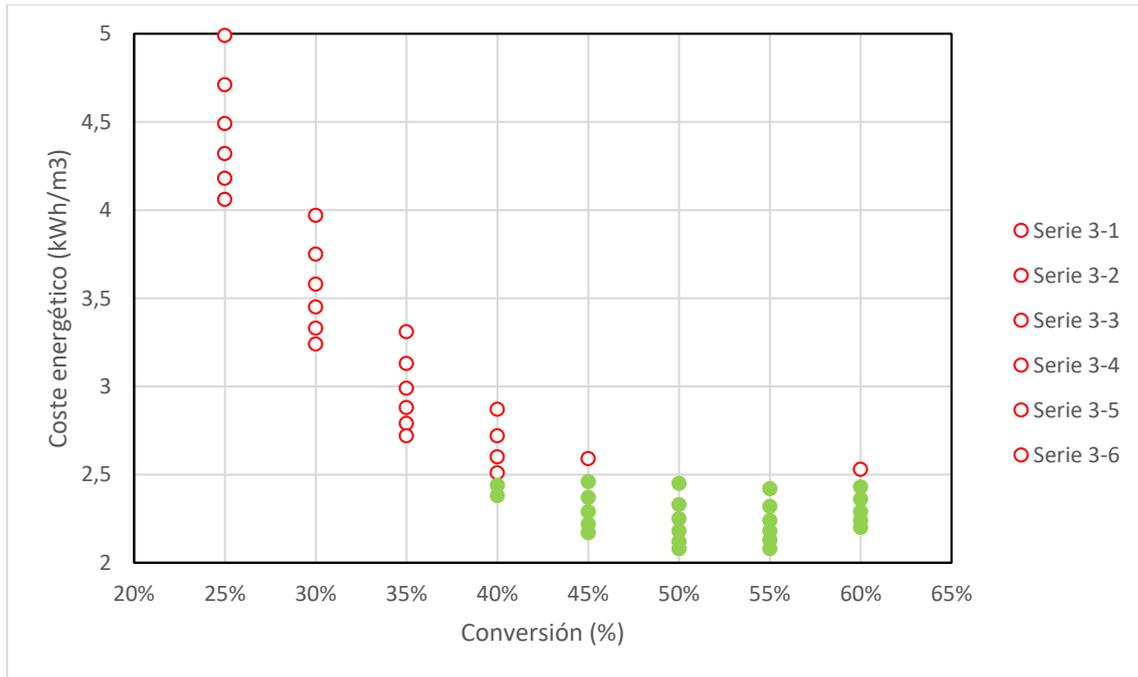


Figura 37. Resultados serie 3-Membrana 3.

CAPÍTULO 8. OBJETIVOS DE DESARROLLO

SOSTENIBLE

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en los que puede influir una planta desaladora por ósmosis inversa son:

- Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento. Este objetivo es el principal en el que influye una desaladora. Una planta desaladora es capaz de suministrar agua dulce de calidad a la población, que la pueden usar tanto para las tareas domésticas, lavarse, cocinar o simplemente beberse. [51]
- Objetivo 14: Vida submarina. Es cierto que las desaladoras generan un agua muy concentrada en sales denominada salmuera y que muchas veces ésta vuelve al mar. Mediante el vertido controlado en zonas de bajo impacto medioambiental, se puede verter salmuera al mar u océano sin afectar en lo más mínimo a las plantas o animales que allí residen.[51]

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES

Tras realizar todas las simulaciones con las membranas propuestas, se puede decir que la mejor membrana para el sistema de ósmosis inversa es la SW30XLE400, puesto que es la que posee unos costes energéticos más bajos. Con la membrana SW30XLE400 se trabajaría en un punto óptimo a una conversión del 50%, una densidad de flujo de 12 litros/m² hora y con 8 membranas por tubo de presión, punto de operación donde posee un coste energético de 2.08 kWh/m³, que es el valor más bajo de todas las series de resultados obtenidos.

Por lo que respecta al objetivo principal del trabajo final de máster, se ha conseguido llevar a cabo el diseño de la planta desaladora de forma satisfactoria, diseñando cada una de las etapas del proceso. Además, se ha conseguido obtener noción de la problemática del agua, se ha conseguido utilizar un simulador de procesos de membrana para poder realizar un análisis de sensibilidad de tipo energético y, por último, se ha conseguido identificar los principales Objetivos de Desarrollo Sostenible en los cuales puede afectar una planta desaladora, que son el Objetivo 6 y el 14.

REFERENCIAS

1. **Shiklomanov, Igor A.** *WORLD WATER RESOURCES*. International Hydrological Programme, State Hydrological Institute. St. Petersburg-Russia : s.n., 1998.
2. **H. Gleick, Peter y F. White, Gilbert.** *Water in Crisis*. Pacific Institute for Studies in Development, Environment and Security, Stockholm Environment Institute . 1993.
3. **Roser, Max, y otros.** "World Population Growth". [En línea] Our World In Data, 2013. <https://ourworldindata.org/world-population-growth#citation>.
4. **Ritchie, Hannah y Roser, Max.** "Fresh Water Use". [En línea] Our World In Data, 2017. <https://ourworldindata.org/water-use-stress#citation>.
5. **UNESCO.** *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos. 2019 No dejar a nadie atrás*. 2019.
6. **F. Zarza, Laura.** *¿Qué es el estrés hídrico?* iagua.
7. **Pulido-Velazquez, Manuel, Macian-Sorribes, Héctor y Escrivá-Bou, Alvar.** *Balance hídrico actual y futuro en las cuencas de España, déficit estructurales e implicaciones socioeconómicas*. Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente / Water Policy Center, Universitat Poliècnica de València / Public Policy Institute of California . Valencia-España / San Francisco-Estados Unidos : s.n., 2020.
8. **Cabero García, Julen.** *Proceso de desalación de agua de mar mediante un sistema de ósmosis inversa de muy alta conversión en tres etapas con recirculación de permeado y doble sistema de recuperación de energía*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería . Bilbao : s.n., 2016. Tesis doctoral.
9. **K. Buros, O.** *The ABCs of desalting*. International Desalination Association. Topsfield-Massachusetts-Estados Unidos : s.n.
10. **D. Khawaji, Akili, K. Kutubkhanah, Ibrahim y Wie, Jong-Mihn.** *Advances in seawater desalination technologies*. Royal Commission for Jubail and Yanbu. Yanbu Al-Sinaiyah-Saudi Arabia : s.n., 2007.
11. **Raluy, Gemma, Serra, Luis y Uche, Javier.** *Life cycle assesment of MSF, MED and RO desalination technologies*. Departamento de Ingeniería Mecánica, Univeridad de Zaragoza. Zaragoza-España : s.n., 2006.
12. **T. El-Dessouky, Hisham, M. Ettouney, Hisham y Al-Roumi, Yousef.** *Multi-stage flash desalination: present and future outlook*. Department of Chemical Engineering, Kuwait University. Kuwait : s.n., 1999.
13. **Valero, Fernando, Barceló, Angel y Arbós, Ramón.** *Electrodialysis Technology. Theory and Applications*. InTech. España : s.n., 2011.
14. **Mezher, Toufic, y otros.** *Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies*. Masdar Institute of Science and Technology. Abu Dabi-Emiratos Árabes Unidos : s.n., 2010.
15. **World Bank Group.** *The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World*. Marzo-2019.

16. **Eke, Joyner, y otros.** *The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity.* Department of Chemical and Materials Engineering / Department of Chemical Engineering / College of Science and Engineering, University of Kentucky / Khalifa University of Science and Technology / Hamad Bin Khalifa University . Kentucky-Estados Unidos / Abu Dhabi-Emiratos Árabes Unidos / Doha-Qatar : s.n., 2020.
17. **Morote-Seguido, Álvaro Francisco y Hernández-Hernández, María.** *La urbanización del litoral alicantino: un modelo urbanístico insostenible, vulnerable a la sequía y a los efectos del cambio climático.* Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales / Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física., Universidad de Valencia / Universidad de Alicante. Valencia / Alicante : s.n., 2019.
18. **Wikipedia.** *San Fulgencio.*
19. —. *La Marina.*
20. —. *Guardamar del Segura.*
21. **Ramos Pardal, Jesús David.** *Análisis Técnico-Económico de una Instalación de Ósmosis Retardada por Presión (PRO).* Departamento de Ingeniería Química, Escuela Técnica Superior de Ingeniería-Universidad de Sevilla. Sevilla : s.n., 2019. Trabajo fin de máster.
22. **Pérez Talavera, José Luis.** *Fundamentos, diseño, construcción y mantenimiento. Plantas desaladoras de agua de mar. CAPTACIONES.* Febrero-2017.
23. **Gobierno de España.** *Praderas de Posidonia oceánica.* Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2014.
24. —. *Caracterización ecocartográfica de playas.* Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. 2007.
25. **FAO.** *Permeabilidad del suelo.*
26. **El Azhar, F., y otros.** *Remineralization of Reverse Osmosis (RO)-desalted water for a Moroccan desalination plant: optimization and cost evaluation of the lime saturator post.* Department of Chemistry, Faculty of Sciences-Ibn Taffal University / Office National de l'Eau Potable (ONEP). Kénitra-Morocco / Rabat-Morocco : s.n., 2012.
27. **Villegas-Mendoza, Iván Emmanuel, y otros.** *Remineralización de agua osmotizada mediante un contactor de calcita de flujo continuo ascendente.* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec-Morelos-México : s.n., 2020.
28. **Zarzo Martínez, Domingo.** *Problemática y soluciones para la gestión y tratamiento de salmueras procedentes de desaladoras.* Instituto del agua y de las ciencias ambientales, Universidad de Alicante. 2017. Tesis doctoral.
29. **Wikipedia.** *Torre Vieja.*
30. **Instituto Nacional de Estadística (INE).** *Número de turistas mensuales por comunidades autónomas y provincia desagregados por municipio de destino.* <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=53000&L=0>
31. **Turisme Comunitat Valenciana.** *Evolución de la actividad turística provincia de Alicante 2021.* https://www.turisme.gva.es/tcv/tcv2021/2_Alicante_2021c.pdf

32. **Diagrama de Moody.** <https://blog.utp.edu.co/docenciaedwin/files/2015/06/diagrama-Moody.pdf>
33. **Colomina Montava, Jordi.** *Diseño de una planta desalinizadora con sistema de ósmosis inversa para producir 20000m³/día.* Universitat Politècnica de València-Campus d'Alcoi. Septiembre-2016. Trabajo final de grado en Ingeniería Química.
34. **Beall Industry Group.** *Rugosidad de la tubería de acero inoxidable.* 2020. <https://es.beallindustry.com/news/roughness-of-stainless-steel-pipe-31235913.html>
35. **Tubinox.** *Catálogo General.* 2023. <https://www.tubinox.com/catalogo>
36. **Vadequímica.** *Hexametáfosfato sódico.* <https://www.vadequimica.com/hexametafosfato-sodico25kg.html#:~:text=El%20hexametáfosfato%20sódico%2C%20también%20conocido,fosfórico%20puro%20con%20sosa%20cáustica.>
37. **ZUKER.** *Antiincrustante Fosfato.* <http://grupozuker.com/wp-content/uploads/2019/06/2.-ZUKER-QZ-9056-antincrustante-fosfato.pdf>
38. **QUIMIPUR.** *Sodio Hipoclorito 15% comercial.* <http://quimipur.com/productos/productos-quimicos/sodio-hipoclorito-15>
39. **Merck.** *ácido sulfúrico 95-97%.* https://www.merckmillipore.com/ES/es/product/Sulfuric-acid-95-970-0,MDA_CHEM-100731
40. **Vadequímica.** *Bisulfito sódico líquido.* <https://www.vadequimica.com/bisulfito-sodico-solucion-alimentario-25litros.html>
41. **Lenntech.** *Filtros de arena.* <https://www.lenntech.es/sistemas/profundo/arena/filtro-de-arena.htm>
42. **Tashia.** *Tratamientos del agua. Filtros cartucho.* https://images.proultry.com/files/company/1657/Catalogo_TASHIA_filtracion_2014_v1401_E.pdf
43. **Lenntech.** *Polypropylene string-wound cartridges.* <https://www.lenntech.com/systems/sediment/cartridge/cartridge.htm>
44. **Dupont.** *FilmTec™ SW30HRLE-400 Element.* <https://www.lenntech.com/Data-sheets/DuPont-FilmTec-SW30HRLE-400-L.pdf>
45. **DuPont.** *Membrane System Design Guidelines for 8" FilmTec™ Elements.* <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Membrane-Sys-Design-Guidelines-8inch-Manual-Exc-45-D01695-en.pdf>
46. **Gobierno de España-Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática.** *BOE-Boletín Oficial del Estado.* 11 de enero de 2023.
47. **Villegas-Mendoza, Iván Emmanuel, y otros.** *Remineralización de agua osmotizada mediante un contactor de calcita de flujo continuo ascendente.* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec-Morelos-México : s.n., 2020.
48. **Vadequímica.** *HIDRÓXIDO DE SODIO - SOSA CÁUSTICA LÍQUIDA.*

Diseño de una planta desaladora mediante ósmosis inversa con una capacidad de producción de 5000 m³/día ubicada en la provincia de Alicante.

49. Cabrera, E., Estrela, T. y Lora, J. *Pasado, presente y futuro de la desalación en España.* Universitat Politècnica de València / Confederación Hidrográfica del Júcar . Valencia : s.n., junio de 2019.

50. Giménez Carretero, Beatriz. *Estudio de dimensionado y viabilidad económica de la implantación de una planta desaladora en Jeddah (Arabia Saudí).* Escuela Politécnica Superior de Alcoi, Universitat Politècnica de València. Alcoi : s.n., Setiembre 2020. Trabajo fin de grado.

51. Organización de las Naciones Unidas. *Objetivos de Desarrollo Sostenible.*

52. Universitat Politècnica de València. *Prácticas EPSG-Estudiante-FAQs.*
<https://www.upv.es/contenidos/PEPSG/infoweb/pepsg/info/904723normalc.html>

PRESUPUESTO

Para la realización del presupuesto, deben tenerse en cuenta tanto los costes directos como los de operación de la planta. Los primeros hacen referencia a la construcción de la planta, el diseño preliminar realizado, el diseño con detalle, las pruebas en planta piloto y la administración y gestión de permisos medio ambientales entre otros. Por otro lado, los costes de operación hacen referencia al coste energético necesario para que la planta funcione, los productos químicos utilizados, el personal de la planta, el mantenimiento y el reemplazo de membranas entre otros. El presupuesto se realiza para la planta diseñada inicialmente, no de la planta con el sistema de ósmosis inversa mejorado gracias al análisis de sensibilidad.

En primer lugar, se van a tratar los costes de capital directos, que son los que van referidos a la construcción de la planta:

Costes de capital directos (Construcción)

CONCEPTO		%
Preparación del terreno, accesos , parking,..	125,000 €	1.7%
Captación de agua	450,000 €	6.0%
Pretratamiento	750,000 €	10.0%
Gestión de Concentrados	200,000 €	2.7%
Gestion de residuos	125,000 €	1.7%
Sistemas Eeléctricos y de instrumentación	225,000 €	3.0%
Instalaciones y equipos auxiliares	75,000 €	1.0%
Edificios	350,000 €	4.7%
Equipos para el Sistema de OI	2,358,950 €	31.6%
Post-tratamiento	519,608 €	7.0%
Puesta en marcha y pruebas de aceptación	75,000 €	1.0%
Subtotal de costes directos	5,253,557 €	70.4%

Figura 1. Costes de capital directos.

En segundo lugar, se van a tratar los costes de capital indirectos:

Costes de capital indirectos (No construcción)

Costes de Ingeniería del proyecto

Ingeniería Preliminar	100,000 €	1.34%
Ensayos piloto	40,000 €	0.54%
Diseño de detalle	450,000 €	6.03%
Gestión y supervisión de la construcción	200,000 €	2.68%
Subtotal-servicios de ingeniería.	790,000 €	10.58%

Desarrollo del Proyecto

Administración, contratación y gestión	125,000 €	1.67%
Permisos ambientales	160,000 €	2.14%
Servicios Legales	90,000 €	1.21%
Subtotal Desarrollo del proyecto.	375,000 €	5.02%

Costes financieros del proyecto

Intereses durante la construcción	223,903 €	3.00%
Fondo de Reserva para el servicio de la deuda	223,903 €	3.00%
Otros costes financieros	223,903 €	3.00%
Subtotal-financiación del proyecto	671,709 €	9.00%
Contingencias	373,172 €	5.00%
Subtotal costes indirectos del capital	2,209,881 €	29.61%

Figura 2. Costes de capital indirectos.

Sabiendo los costes de capital directos e indirectos, se pueden saber los costes de capital totales, los cuales ascienden a un valor de 7463438 €.

En tercer lugar, se muestran los costes de operación que tiene la planta:

Costes Variables

CONCEPTO	€	€/m ³	% del Total
Energía	1,020,473 €	0.57 €	71.3%
Productos Químicos	71,540 €	0.04 €	5.0%
Reemplazamiento de membranas y filtros	89,425 €	0.05 €	6.2%
Gestión de corrientes residuales	35,770 €	0.02 €	2.5%
Subtotal costes variables	1,217,208 €	0.68 €	85.01%

Costes Fijos

Personal	53,655 €	0.03 €	3.7%
Mantenimiento	53,655 €	0.03 €	3.7%
Vigilancia ambiental	17,885 €	0.01 €	1.2%
Costes indirectos	89,425 €	0.05 €	6.2%
Subtotal costes fijos	214,620 €	0.12 €	14.99%

Total costes O&M	1,431,828 €	0.80 €	100.00%
-----------------------------	--------------------	---------------	----------------

Figura 3. Costes de operación de la planta.

Diseño de una planta desaladora mediante ósmosis inversa con una capacidad de producción de 5000 m³/día ubicada en la provincia de Alicante.

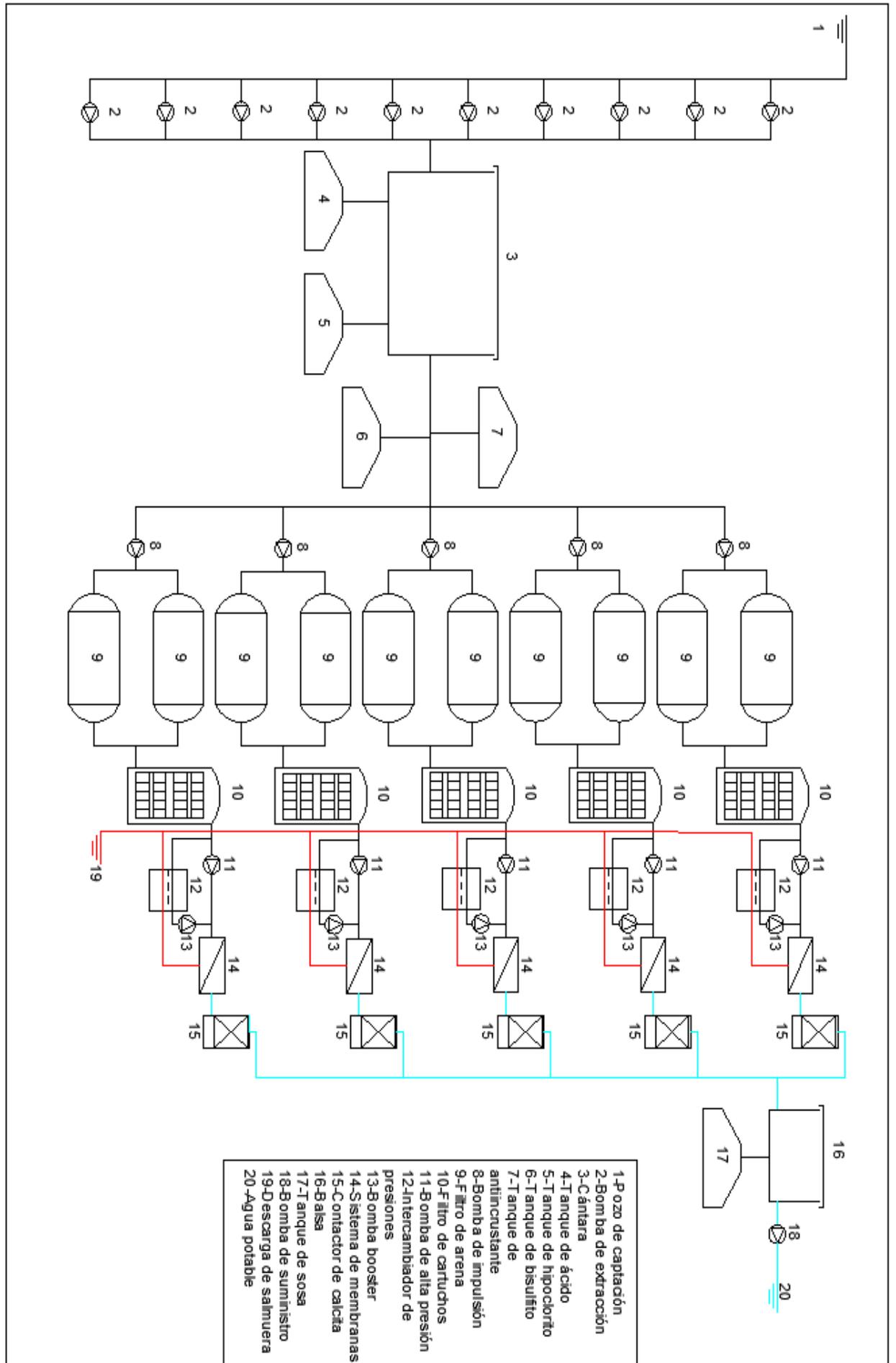
Por último, se muestra el coste que tendría el agua salida de la desaladora:

CONCEPTO	€/m ³	% del Total
Costes Fijos		
Amortización de la inversión	0.296 €	27.00%
Personal	0.030 €	2.74%
Mantenimiento	0.030 €	2.74%
Vigilancia ambiental	0.010 €	0.91%
Costes indirectos	0.050 €	4.56%
Subtotal costes fijos	0.416 €	37.94%
Costes Variables		
Energía	0.571 €	52.03%
Productos Químicos	0.040 €	3.65%
Reemplazamiento de membranas y filtros	0.050 €	4.56%
Gestión de corrientes residuales	0.020 €	1.82%
Subtotal costes variables	0.681 €	62.06%
Total costes producción	1.097 €	100%
Beneficio industrial (10%)	0.10 €	
Impuestos (10%)	0.11 €	
Coste de venta del agua desalada	1.31 €	

Figura 4. Coste del agua producto.

DIAGRAMA DE FLUJO

Diseño de una planta desaladora mediante ósmosis inversa con una capacidad de producción de 5000 m³/día ubicada en la provincia de Alicante.



ANEXOS

ANEXO 1-CÁLCULOS PRELIMINARES

HABITANTES A ABASTECER
1-San Fulgencio
2-La Marina
3-Guardamar del Segura
4-Torrevieja
$Habitantes_1 := 9091$ habitantes
$Habitantes_2 := 2026$ habitantes
$Habitantes_3 := 16138$ habitantes
$Habitantes_4 := 83457$ habitantes
$Habitantes_{abastecidos} := Habitantes_1 + Habitantes_2 + Habitantes_3$
$Habitantes_{abastecidos} = 27255$ habitantes

Figura 1

TURISTAS DE CADA MES DE VERANO EN TORREVIEJA Y LOS DÍAS CONSIDERADOS COMO PERIODO DE VERANO
m1-junio
m2-julio
m3-agosto
$Turistas_{m1_4} := 44927$ turistas
$Turistas_{m2_4} := 101440$ turistas
$Turistas_{m3_4} := 122207$ turistas
$Turistas_4 := Turistas_{m1_4} + Turistas_{m2_4} + Turistas_{m3_4}$
$Turistas_4 = 2.686 \cdot 10^5$ turistas
$Días_{m1} := 30$ días
$Días_{m2} := 31$ días
$Días_{m3} := 31$ días
$Días_{verano} := Días_{m1} + Días_{m2} + Días_{m3}$
$Días_{verano} = 92$ días

Figura 2

TURISTAS QUE ACCEDEN DIARIAMENTE A TORREVIEJA

$$Turistas_diarios_4 := \frac{Turistas_4}{Días_verano}$$

$$Turistas_diarios_4 = 2.919 \cdot 10^3 \text{ turistas/día}$$

Figura 3

DENSIDAD DE TURISTAS EN TORREVIEJA

$$Densidad_turistas_4 := \frac{Turistas_diarios_4}{Habitantes_4}$$

$$Densidad_turistas_4 = 0.035 \text{ turistas/habitante día}$$

Figura 4

DENSIDAD TURÍSTICA DE LAS LOCALIDADES 1,2 Y 3 TENIENDO EN CUENTA LA DENSIDAD TURÍSTICA DE TORREVIEJA Y LOS HABITANTES DE TODAS LAS LOCALIDADES

Densidad de turistas	Habitantes
0.035	83457
x	27255

$$Densidad_turistas_123 := \frac{Habitantes_abastecidos}{Habitantes_4} \cdot Densidad_turistas_4$$

$$Densidad_turistas_123 = 0.011 \text{ turistas/habitante día}$$

Figura 5

DÍAS DE ESTANCIA MEDIO DE LOS TURISTAS

$$Días_estancia_extranjeros := 12.3 \text{ días}$$
$$Días_estancia_españoles := 5.2 \text{ días}$$
$$Días_estancia := \frac{Días_estancia_extranjeros + Días_estancia_españoles}{2}$$
$$Días_estancia = 8.75 \text{ días}$$

Figura 6

TURISTAS QUE ACCEDEN DIARIAMENTE A LAS LOCALIDADES 1,2 Y 3 Y LOS MÁXIMOS TURISTAS QUE SE ALCANZAN

$$Turistas_diarios_123 := Densidad_turistas_123 \cdot Habitantes_abastecidos$$
$$Turistas_diarios_123 = 3.113 \cdot 10^2 \text{ turistas/día}$$
$$Turistas_máximos_123 := Turistas_diarios_123 \cdot Días_estancia$$
$$Turistas_máximos_123 = 2.724 \cdot 10^3 \text{ turistas}$$

Figura 7

POBLACIÓN A ABASTECER COMO MÁXIMO

$$Población_abastecida := Habitantes_abastecidos + Turistas_máximos_123$$
$$Población_abastecida = 2.998 \cdot 10^4 \text{ personas}$$

Figura 8

CAUDAL DE AGUA QUE DEBE ABASTECER LA PLANTA TENIENDO EN CUENTA EL CONSUMO POR CÁPITA CON UN AUMENTO DE UN 10% PARA ASEGURAR EL SUMINISTRO

$$\text{Consumo_cápita} := 0.150 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

$$\text{Consumo_aumentado} := 1.1 \cdot \text{Consumo_cápita}$$

$$\text{Consumo_diario} := \text{Consumo_aumentado} \cdot \text{Población_abastecida}$$

$$\text{Consumo_diario} = (4.947 \cdot 10^3) \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

$$\text{Consumo_diario} = 0.057 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

El caudal de agua dulce se sobredimensiona en 5000 m³/día

$$\text{Producción_diaria} := 5000 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

$$\text{Producción_diaria} = 0.058 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Figura 9

AGUA SALADA REQUERIDA PARA LA PLANTA

$$\text{Conversión} := 0.45$$

$$\text{Consumo_agua_salada} := \frac{\text{Producción_diaria}}{\text{Conversión}}$$

$$\text{Consumo_agua_salada} = (1.111 \cdot 10^4) \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

$$\text{Consumo_agua_salada} = 0.129 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Figura 10

ANEXO 2-CÁLCULOS DEL POZO

PROFUNDIDAD DE LA INTERFASE

$$\text{Altura_piezométrica_agua_dulce} := 1 \cdot \text{m}$$

$$\text{Profundidad_interfase} := \text{Altura_piezométrica_agua_dulce} \cdot 40$$

$$\text{Profundidad_interfase} = 40 \text{ m}$$

Figura 1

ÁREA EN CONTACTO CON EL AGUA SALADA

$$\text{Número_pozos} := 10$$

$$\text{Permeabilidad} := 5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Área_total_pozo} := \frac{\text{Consumo_agua_salada}}{\text{Permeabilidad}}$$

$$\text{Área_total_pozo} = 25.72 \text{ m}^2$$

$$\text{Área_pozo} := \frac{\text{Área_total_pozo}}{\text{Número_pozos}}$$

$$\text{Área_pozo} = 2.572 \text{ m}^2$$

Figura 2

PROFUNDIDAD AGREGADA DEL POZO Y PROFUNDIDAD TOTAL DEL POZO

$$\text{Diámetro_pozo} := 0.4 \cdot \text{m}$$

$$\text{Perímetro} := \pi \cdot \text{Diámetro_pozo}$$

$$\text{Perímetro} = 1.257 \text{ m}$$

$$\text{Medio_perímetro} := \frac{\text{Perímetro}}{2}$$

$$\text{Medio_perímetro} = 0.628 \text{ m}$$

$$\text{Profundidad_extra} := \frac{\text{Área_pozo}}{\text{Medio_perímetro}}$$

$$\text{Profundidad_extra} = 4.093 \text{ m}$$

$$\text{Profundidad_total_pozo} := \text{Profundidad_interfase} + \text{Profundidad_extra}$$

$$\text{Profundidad_total_pozo} = 44.093 \text{ m}$$

Figura 3

ANEXO 3-CÁLCULOS DEL PRETRATAMIENTO

VOLUMEN DE LA CÁNTARA DE PRETRATAMIENTO

$$Tiempo_vaciado := 1200 \cdot s$$
$$Volumen_cántara := Tiempo_vaciado \cdot Consumo_agua_salada$$
$$Volumen_cántara = 154.321 \text{ m}^3$$
$$Volumen_real_cántara := Volumen_cántara \cdot 1.15$$
$$Volumen_real_cántara = 177.469 \text{ m}^3$$

Figura 1

DIMENSIONES CÁNTARA

$$Profundidad_cántara := 3 \cdot m$$
$$Ancho_cántara := 6 \cdot m$$
$$Largo_cántara := 10 \cdot m$$
$$Volumen_total_cántara := Profundidad_cántara \cdot Ancho_cántara \cdot Largo_cántara$$
$$Volumen_total_cántara = 180 \text{ m}^3$$

Figura 2

ALTURA DEL AGUA DE MAR DENTRO DE LA CÁNTARA

$$Altura_agua_cántara := \frac{Volumen_cántara}{Ancho_cántara \cdot Largo_cántara}$$
$$Altura_agua_cántara = 2.572 \text{ m}$$

Figura 3

ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR DEL AGUA DENTRO DE LA CÁNTARA

$$Altura_{snm} := 2 \cdot m$$

$$Altura_{snm_cántara} := Altura_{snm} - Profundidad_cántara + Altura_agua_cántara$$

$$Altura_{snm_cántara} = 1.572 \text{ m}$$

Figura 4

CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE IMPULSIÓN DE AGUA DEL POZO HASTA LA CÁNTARA

$$Velocidad := 1.8 \cdot \frac{m}{s}$$

$$Q_{pozo} := \frac{Consumo_agua_salada}{Número_pozos}$$

$$Q_{pozo} = 0.013 \frac{m^3}{s}$$

$$Área_tubería := \frac{Q_{pozo}}{Velocidad}$$

$$Área_tubería = 0.007 \text{ m}^2$$

$$Diámetro_tubería := \left(\frac{Área_tubería \cdot 4}{\pi} \right)^{0.5}$$

$$Diámetro_tubería = 0.095 \text{ m}$$

$$Diámetro_tubería = 3.755 \text{ in}$$

Figura 5

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE TRABAJO CON LA TUBERÍA DE 4 PULGADAS

$$Diámetro_real := 4 \cdot in = 0.102 \text{ m}$$

$$Área_tubería_real := \frac{\pi \cdot Diámetro_real^2}{4}$$

$$Área_tubería_real = 0.008 \text{ m}^2$$

$$Velocidad_trabajo := \frac{Q_{pozo}}{Área_tubería_real}$$

$$Velocidad_trabajo = 1.586 \frac{m}{s}$$

Figura 6

CÁLCULO DEL REYNOLS Y LA RUGOSIDAD RELATIVA

$$\rho_{mar} := 1020 \cdot \frac{kg}{m^3}$$
$$\mu_{mar} := 0.001 \cdot \frac{kg}{m \cdot s}$$
$$Rugosidad := 0.2 \cdot mm$$
$$Reynols := \frac{\rho_{mar} \cdot Velocidad_trabajo \cdot Diámetro_real}{\mu_{mar}}$$
$$Reynols = 1.644 \cdot 10^5$$
$$Rugosidad_relativa := \frac{Rugosidad}{Diámetro_real}$$
$$Rugosidad_relativa = 0.002$$

Figura 7

CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH

$$\gamma_{mar} := \rho_{mar} \cdot g$$
$$\gamma_{mar} = (1 \cdot 10^4) \frac{N}{m^3}$$
$$f := 0.031$$
$$L_tubería := 2500 \cdot m$$
$$h_pérdidas := f \cdot \frac{L_tubería}{Diámetro_real} \cdot \frac{Velocidad_trabajo^2}{2 \cdot g}$$
$$h_pérdidas = 97.857 \text{ m}$$
$$Presión_pérdidas := \gamma_{mar} \cdot h_pérdidas$$
$$Presión_pérdidas = (9.788 \cdot 10^5) \text{ Pa}$$
$$Presión_pérdidas = 9.66 \text{ atm}$$

Figura 8

CÁLCULO DE LA ALTURA QUE DEBE PROPORCIONAR LA BOMBA

$$\frac{P_1}{\gamma_{\text{mar}}} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_1 + H_{\text{bomba}} = \frac{P_2}{\gamma_{\text{mar}}} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_2 + h_{\text{pérdidas}}$$

$$H_{\text{bomba}} := \text{Altura}_{\text{snm}_{\text{cántara}}} + h_{\text{pérdidas}}$$

$$H_{\text{bomba}} = 99.429 \text{ m}$$

$$\text{Presión}_{\text{bomba}} := \gamma_{\text{mar}} \cdot H_{\text{bomba}}$$

$$\text{Presión}_{\text{bomba}} = 9.816 \text{ atm}$$

Figura 9

CÁLCULO DEL CONSUMO DE LA BOMBA

$$\text{Rendimiento}_{\text{bomba}} := 0.95$$

$$\text{Potencia}_{\text{bomba}_{\text{alimentación}}} := \frac{\text{Presión}_{\text{bomba}} \cdot Q_{\text{pozo}}}{\text{Rendimiento}_{\text{bomba}}}$$

$$\text{Potencia}_{\text{bomba}_{\text{alimentación}}} = (1.346 \cdot 10^4) \text{ W}$$

Figura 10

CONCENTRACIÓN DE LA DISOLUCIÓN DE ANTI INCRUSTANTE

$$\text{Pureza}_{\text{antiincrustante}} := 0.08$$

$$\rho_{\text{antiincrustante}} := 2800 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa}_{\text{antiincrustante}} := \rho_{\text{antiincrustante}} \cdot 2.5 \cdot \text{liter}$$

$$\text{Masa}_{\text{antiincrustante}} = 7 \text{ kg}$$

$$\text{Masa}_{\text{antiincrustante}_{\text{real}}} := \frac{\text{Masa}_{\text{antiincrustante}}}{\text{Pureza}_{\text{antiincrustante}}}$$

$$\text{Masa}_{\text{antiincrustante}_{\text{real}}} = 87.5 \text{ kg}$$

$$C_{\text{disolución}_{\text{antiincrustante}}} := \frac{\text{Masa}_{\text{antiincrustante}_{\text{real}}}}{100 \cdot \text{liter}}$$

$$C_{\text{disolución}_{\text{antiincrustante}}} = 0.875 \frac{\text{kg}}{\text{liter}}$$

Figura 11

CAUDAL AÑADIDO DE DISOLUCIÓN DE ANTI INCRUSTANTE

$$Dosis_requerida_antiincrustante := 5 \cdot \frac{mg}{liter}$$
$$Q_máscico_antiincrustante := Dosis_requerida_antiincrustante \cdot Consumo_agua_salada$$
$$Q_máscico_antiincrustante = (6.43 \cdot 10^{-4}) \frac{kg}{s}$$
$$Q_antiincrustante_añadido := \frac{Q_máscico_antiincrustante}{C_disolución_antiincrustante}$$
$$Q_antiincrustante_añadido = 0.735 \frac{ml}{s}$$

Figura 12

VOLUMEN DEL TANQUE DE LA DISOLUCIÓN DE ANTI INCRUSTANTE

$$Tiempo_mes := 30 \cdot day$$
$$Volumen_disolución_antiincrustante := Q_antiincrustante_añadido \cdot Tiempo_mes$$
$$Volumen_disolución_antiincrustante = 1.905 m^3$$
$$Volumen_tanque_antiincrustante := Volumen_disolución_antiincrustante \cdot 1.15$$
$$Volumen_tanque_antiincrustante = 2.19 m^3$$

Figura 13

CONCENTRACIÓN DE LA DISOLUCIÓN DE HIPOCLORITO SÓDICO

$$\rho_hipoclorito := 1.3 \cdot \frac{kg}{liter}$$
$$Pureza_hipoclorito := 0.15$$
$$C_disolución_hipoclorito := \frac{15 \cdot liter}{100 \cdot liter} \cdot \rho_hipoclorito$$
$$C_disolución_hipoclorito = 0.195 \frac{kg}{liter}$$

Figura 14

CAUDAL DE LA DISOLUCIÓN DE HIPOCLORITO AÑADIDO

$$Dosis_hipoclorito := 2 \cdot \frac{mg}{liter}$$

$$Q_m\acute{a}sico_hipoclorito := Dosis_hipoclorito \cdot Consumo_agua_salada$$

$$Q_m\acute{a}sico_hipoclorito = (2.572 \cdot 10^{-4}) \frac{kg}{s}$$

$$Q_hipoclorito_a\acute{n}adido := \frac{Q_m\acute{a}sico_hipoclorito}{C_disoluci\acute{o}n_hipoclorito}$$

$$Q_hipoclorito_a\acute{n}adido = 1.319 \frac{ml}{s}$$

Figura 15

VOLUMEN DEL TANQUE DE HIPOCLORITO

$$Tiempo_mes = 30 \text{ day}$$

$$Volumen_disoluci\acute{o}n_hipoclorito := Q_hipoclorito_a\acute{n}adido \cdot Tiempo_mes$$

$$Volumen_disoluci\acute{o}n_hipoclorito = 3.419 \text{ m}^3$$

$$Volumen_tanque_hipoclorito := Volumen_disoluci\acute{o}n_hipoclorito \cdot 1.15$$

$$Volumen_tanque_hipoclorito = 3.932 \text{ m}^3$$

Figura 16

CONCENTRACIÓN DE LA DISOLUCIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO

$$Peso_molecular_ácido := 98 \cdot \frac{gm}{mol}$$

$$\rho_ácido := 1840 \cdot \frac{kg}{m^3}$$

$$Pureza_ácido := 0.96$$

$$C_disoluci\acute{o}n_ácido := \frac{96 \cdot liter}{100 \cdot liter} \cdot \rho_ácido$$

$$C_disoluci\acute{o}n_ácido = 1.766 \frac{kg}{liter}$$

$$C_molar_ácido := \frac{C_disoluci\acute{o}n_ácido}{Peso_molecular_ácido}$$

$$C_molar_ácido = 18.024 \frac{mol}{liter}$$

Figura 17

CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISOLUCIÓN DE ÁCIDO A AÑADIR

$$Dosis_{\text{ácido}} := 0.015 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$
$$Q_{\text{másico}_{\text{ácido}}} := Consumo_{\text{agua}_{\text{salada}}} \cdot Dosis_{\text{ácido}}$$
$$Q_{\text{másico}_{\text{ácido}}} = (1.929 \cdot 10^{-6}) \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$
$$Q_{\text{molar}_{\text{ácido}}} := \frac{Q_{\text{másico}_{\text{ácido}}}}{Peso_{\text{molecular}_{\text{ácido}}}}$$
$$Q_{\text{molar}_{\text{ácido}}} = (1.968 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$
$$Q_{\text{volumétrico}_{\text{ácido}}} := \frac{Q_{\text{másico}_{\text{ácido}}}}{\rho_{\text{ácido}}}$$
$$Q_{\text{volumétrico}_{\text{ácido}}} = 0.001 \frac{\text{ml}}{\text{s}}$$

Figura 18

pH DEL AGUA DE MAR DESPUÉS DE ADICIÓN DE ÁCIDO

$$C_{\text{protones}_{\text{inicialmente}}} := 10^{-8} \cdot \frac{\text{mol}}{\text{liter}}$$
$$Moles_{\text{protones}_{\text{iniciales}}} := C_{\text{protones}_{\text{inicialmente}}} \cdot Consumo_{\text{agua}_{\text{salada}}}$$
$$Moles_{\text{protones}_{\text{añadidos}}} := 2 \cdot Q_{\text{molar}_{\text{ácido}}}$$
$$Moles_{\text{protones}_{\text{finales}}} := Moles_{\text{protones}_{\text{iniciales}}} + Moles_{\text{protones}_{\text{añadidos}}}$$
$$C_{\text{protones}_{\text{final}}} := \frac{Moles_{\text{protones}_{\text{finales}}}}{Consumo_{\text{agua}_{\text{salada}}}} = (3.161 \cdot 10^{-7}) \frac{\text{mol}}{\text{liter}}$$
$$pH := -\log\left(C_{\text{protones}_{\text{final}}} \cdot \frac{\text{liter}}{\text{mol}}\right) = 6.5$$

Figura 19

CONCENTRACIÓN DE LA DISOLUCIÓN DE BISULFITO

$$\rho_{\text{bisulfito}} := 1345 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Pureza} := 0.39$$

$$C_{\text{disolución bisulfito}} := \frac{39 \cdot \text{liter}}{100 \cdot \text{liter}} \cdot \rho_{\text{bisulfito}}$$

$$C_{\text{disolución bisulfito}} = 0.525 \frac{\text{kg}}{\text{liter}}$$

Figura 20

CAUDAL DE LA DISOLUCIÓN DE BISULFITO

$$\text{Dosis bisulfito} := 5 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$Q_{\text{másico bisulfito}} := \text{Dosis bisulfito} \cdot \text{Consumo agua salada}$$

$$Q_{\text{másico bisulfito}} = (6.43 \cdot 10^{-4}) \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{bisulfito añadido}} := \frac{Q_{\text{másico bisulfito}}}{C_{\text{disolución bisulfito}}}$$

$$Q_{\text{bisulfito añadido}} = 1.226 \frac{\text{ml}}{\text{s}}$$

Figura 21

VOLUMEN DEL TANQUE DE BISULFITO

$$\text{Tiempo mes} = 30 \text{ day}$$

$$\text{Volumen disolución} := Q_{\text{bisulfito añadido}} \cdot \text{Tiempo mes}$$

$$\text{Volumen disolución} = 3.177 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen tanque} := \text{Volumen disolución} \cdot 1.15$$

$$\text{Volumen tanque} = 3.654 \text{ m}^3$$

Figura 22

DISEÑO DEL FILTRO DE ARENA

$$\text{Velocidad_filtración} := 15 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr} \cdot \text{m}^2}$$
$$Q_{\text{pozo}} = 0.013 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$
$$Q_{\text{entrada_filtro_arena}} := Q_{\text{pozo}}$$
$$Q_{\text{entrada_filtro_arena}} = 46.296 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$
$$\text{Diámetro_filtro_arena} := 2.8 \cdot \text{m}$$
$$\text{Área_filtro_arena} := \frac{\pi \cdot \text{Diámetro_filtro_arena}^2}{4}$$
$$\text{Área_filtro_arena} = 6.158 \text{ m}^2$$
$$\text{Tiempo_retención_filtro_arena} := 1 \cdot \text{hr}$$
$$\text{Longitud_filtro} := \frac{Q_{\text{entrada_filtro_arena}} \cdot \text{Tiempo_retención_filtro_arena}}{\text{Área_filtro_arena}}$$
$$\text{Longitud_filtro} = 7.519 \text{ m}$$

Figura 23

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE FILTRACIÓN

$$Q_{\text{filtrado_cartucho}} := 20 \cdot \frac{\text{liter}}{\text{min}}$$
$$\text{Diámetro_cartucho} := 0.061 \cdot \text{m}$$
$$\text{Longitud_cartucho} := 0.508 \cdot \text{m}$$
$$\text{Área_filtración_cartucho} := \pi \cdot \text{Diámetro_cartucho} \cdot \text{Longitud_cartucho}$$
$$\text{Área_filtración_cartucho} = 0.097 \text{ m}^2$$
$$\text{Velocidad_filtración_cartucho} := \frac{Q_{\text{filtrado_cartucho}}}{\text{Área_filtración_cartucho}}$$
$$\text{Velocidad_filtración_cartucho} = 12.326 \frac{\text{m}^3}{\text{hr} \cdot \text{m}^2}$$

Figura 24

CÁLCULOS DEL ÁREA DE FILTRO REQUERIDA Y EL NÚMERO DE FILTROS

$$Q_{\text{entrada_filtro_cartucho}} := 2 \cdot Q_{\text{pozo}}$$

$$Q_{\text{entrada_filtro_cartucho}} = 92.593 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

$$\text{Área_total_filtración} := \frac{Q_{\text{entrada_filtro_cartucho}}}{\text{Velocidad_filtración_cartucho}}$$

$$\text{Área_total_filtración} = 7.512 \text{ m}^2$$

$$\text{Número_filtros} := \frac{\text{Área_total_filtración}}{\text{Área_filtración_cartucho}}$$

$$\text{Número_filtros} = 77.16$$

Figura 25

CÁLCULO DE LA ALTURA DEL FILTRO DE CARTUCHOS

$$\text{Niveles} := 4$$

$$\text{Altura_filtro_cartuchos} := \text{Niveles} \cdot \text{Longitud_cartucho}$$

$$\text{Altura_filtro_cartuchos} = 2.032 \text{ m}$$

Figura 26

CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE CARGA DE LOS TRAMOS 2 Y 3

$$\text{Longitud_tramo_2} := 40 \cdot \text{m}$$

$$\text{Longitud_tramo_3} := 40 \cdot \text{m}$$

$$\text{Longitud_total} := \text{Longitud_tramo_2} + \text{Longitud_tramo_3}$$

$$f := 0.031$$

$$\text{Diámetro_real} = 0.102 \text{ m}$$

$$\text{Velocidad_trabajo} = 1.586 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$h_{\text{pérdidas_23}} := f \cdot \frac{\text{Longitud_total}}{\text{Diámetro_real}} \cdot \frac{\text{Velocidad_trabajo}^2}{2 \cdot g}$$

$$h_{\text{pérdidas_23}} = 3.131 \text{ m}$$

$$\text{Presión_pérdidas_23} := h_{\text{pérdidas_23}} \cdot \gamma_{\text{mar}}$$

$$\text{Presión_pérdidas_23} = 0.309 \text{ atm}$$

Figura 27

CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE LOS TRAMOS 1 Y 4

$$Q_{\text{trabajo}} := 2 \cdot Q_{\text{pozo}}$$

$$Q_{\text{trabajo}} = 0.026 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{Velocidad} := 1.8 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Área}_{\text{tubería}} := \frac{Q_{\text{trabajo}}}{\text{Velocidad}}$$

$$\text{Área}_{\text{tubería}} = 0.014 \text{ m}^2$$

$$\text{Diámetro}_{\text{tubería}} := \left(\frac{4 \cdot \text{Área}_{\text{tubería}}}{\pi} \right)^{0.5}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{tubería}} = 0.135 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{tubería}} = 5.31 \text{ in}$$

Figura 28

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE TRABAJO CON LA TUBERÍA DE 6 PULGADAS

$$\text{Diámetro}_{\text{real}} := 6 \cdot \text{in} = 0.152 \text{ m}$$

$$\text{Área}_{\text{tubería}_{\text{real}}} := \frac{\pi \cdot \text{Diámetro}_{\text{real}}^2}{4}$$

$$\text{Área}_{\text{tubería}_{\text{real}}} = 0.018 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidad}_{\text{trabajo}} := \frac{2 Q_{\text{pozo}}}{\text{Área}_{\text{tubería}_{\text{real}}}}$$

$$\text{Velocidad}_{\text{trabajo}} = 1.41 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Figura 29

CÁLCULO DEL REYNOLDS Y LA RUGOSIDAD RELATIVA TUBERÍA DE 6 PULGADAS

$$\rho_{\text{mar}} := 1020 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu_{\text{mar}} := 0.001 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$\text{Rugosidad} := 0.2 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Reynolds} := \frac{\rho_{\text{mar}} \cdot \text{Velocidad}_{\text{trabajo}} \cdot \text{Diámetro}_{\text{real}}}{\mu_{\text{mar}}}$$

$$\text{Reynolds} = 2.192 \cdot 10^5$$

$$\text{Rugosidad}_{\text{relativa}} := \frac{\text{Rugosidad}}{\text{Diámetro}_{\text{real}}}$$

$$\text{Rugosidad}_{\text{relativa}} = 0.001$$

Figura 30

CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN LOS TRAMOS 1 Y 4

$$\gamma_{mar} := \rho_{mar} \cdot g$$

$$\gamma_{mar} = (1 \cdot 10^4) \frac{N}{m^3}$$

$$f := 0.0275$$

$$Longitud_tramo_1 := 20 \cdot m$$

$$Longitud_tramo_4 := 20 \cdot m$$

$$Longitud_total := Longitud_tramo_1 + Longitud_tramo_4$$

$$Longitud_total = 40 \cdot m$$

$$h_{pérdidas_14} := f \cdot \frac{Longitud_total}{Diámetro_real} \cdot \frac{Velocidad_trabajo^2}{2 \cdot g}$$

$$h_{pérdidas_14} = 0.732 \cdot m$$

$$Presión_pérdidas_14 := \gamma_{mar} \cdot h_{pérdidas_14}$$

$$Presión_pérdidas_14 = 0.072 \cdot atm$$

Figura 31

CÁLCULO DE LA ALTURA QUE DEBE PROPORCIONAR LA BOMBA

$$P_2 := 1 \cdot atm$$

$$v_2 := Velocidad_trabajo = 1.41 \frac{m}{s}$$

$$h_1 := 0 \cdot m$$

$$h_2 := 1 \cdot m$$

$$h_{pérdidas_cartuchos} := \frac{0.8 \cdot bar}{\gamma_{mar}} = 7.998 \cdot m$$

$$h_{pérdidas_arena} := \frac{7 \cdot bar}{\gamma_{mar}} = 69.981 \cdot m$$

$$h_{pérdidas} := h_{pérdidas_14} + h_{pérdidas_23} + h_{pérdidas_cartuchos} + h_{pérdidas_arena}$$

$$h_{pérdidas} = 81.841 \cdot m$$

$$\frac{P_1}{\gamma_{mar}} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_1 + H_{bomba} = \frac{P_2}{\gamma_{mar}} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_2 + h_{pérdidas}$$

$$H_{bomba} := \frac{P_2}{\gamma_{mar}} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_2 + h_{pérdidas}$$

$$H_{bomba} = 93.072 \cdot m$$

$$Presión_bomba := \gamma_{mar} \cdot H_{bomba}$$

$$Presión_bomba = 9.188 \cdot atm$$

Figura 32

CÁLCULO DEL CONSUMO DE LA BOMBA

$Rendimiento_bomba := 0.95$

$Potencia_bomba_alimentación := \frac{Presión_bomba \cdot 2 \cdot Q_pozo}{Rendimiento_bomba}$

$Potencia_bomba_alimentación = (2.521 \cdot 10^4) \text{ W}$

Figura 33

ANEXO 4-CÁLCULOS DEL SISTEMA DE MEMBRANAS

CÁLCULO DEL NÚMERO DE MEMBRANAS Y TUBOS DE PRESIÓN

$Conversión = 0.45$

$Q_{entrada} := 2 \cdot Q_{pozo} = 0.026 \frac{m^3}{s}$

$Q_{permeado} := Conversión \cdot Q_{entrada}$

$Q_{permeado} = 0.012 \frac{m^3}{s}$

$Q_{rechazo} := Q_{entrada} - Q_{permeado}$

$Q_{rechazo} = 0.014 \frac{m^3}{s}$

$Densidad_{flujo} := 15 \cdot \frac{liter}{m^2 \cdot hr}$

$Área_{total} := \frac{Q_{permeado}}{Densidad_{flujo}}$

$Área_{total} = (2.778 \cdot 10^3) m^2$

$Área_{membrana} := 37 \cdot m^2$

$Número_{membranas} := \frac{Área_{total}}{Área_{membrana}}$

$Número_{membranas} = 75.075$

$Membranas_{por_{tubo}} := 7$

$Número_{tubos} := \frac{Número_{membranas}}{Membranas_{por_{tubo}}}$

$Número_{tubos} = 10.725$

Figura 1

COMPOSICIÓN DEL AGUA DE MAR	
C_{cloruro}	$= 21472.35 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$
C_{sodio}	$= 11875.77 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$
C_{magnesio}	$= 1535.45 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$
$C_{\text{azufre sulfato}}$	$= 1007.64 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$
C_{calcio}	$= 455.84 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$
C_{potasio}	$= 431.85 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$
C_{bromo}	$= 73.41 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$
$C_{\text{estroncio}}$	$= 9.12 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$
C_{boro}	$= 5.52 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$
C_{flur}	$= 1.46 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$
C_{bario}	$= 0.02 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$
$STD_{\text{agua mar}}$	$= C_{\text{cloruro}} + C_{\text{sodio}} + C_{\text{magnesio}} + C_{\text{azufre sulfato}} + C_{\text{calcio}} + C_{\text{potasio}} + C_{\text{bromo}} + C_{\text{estroncio}} + C_{\text{boro}} + C_{\text{flur}} + C_{\text{bario}}$
$STD_{\text{agua mar}}$	$= 36.868 \frac{\text{gm}}{\text{liter}}$

Figura 2

CAUDALES MÁXICOS DE LOS COMPONENTES EN EL AGUA DE MAR	
$M_{\text{cloruro agua mar}}$	$= C_{\text{cloruro}} \cdot Q_{\text{entrada}} = 552.272 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$
$M_{\text{sodio agua mar}}$	$= C_{\text{sodio}} \cdot Q_{\text{entrada}} = 305.447 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$
$M_{\text{magnesio agua mar}}$	$= C_{\text{magnesio}} \cdot Q_{\text{entrada}} = 39.492 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$
$M_{\text{azufre sulfato agua mar}}$	$= C_{\text{azufre sulfato}} \cdot Q_{\text{entrada}} = 25.917 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$
$M_{\text{calcio agua mar}}$	$= C_{\text{calcio}} \cdot Q_{\text{entrada}} = 11.724 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$
$M_{\text{potasio agua mar}}$	$= C_{\text{potasio}} \cdot Q_{\text{entrada}} = 11.107 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$
$M_{\text{bromo agua mar}}$	$= C_{\text{bromo}} \cdot Q_{\text{entrada}} = 1.888 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$
$M_{\text{estroncio agua mar}}$	$= C_{\text{estroncio}} \cdot Q_{\text{entrada}} = 0.235 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$
$M_{\text{boro agua mar}}$	$= C_{\text{boro}} \cdot Q_{\text{entrada}} = 0.142 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$
$M_{\text{flur agua mar}}$	$= C_{\text{flur}} \cdot Q_{\text{entrada}} = 0.038 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$
$M_{\text{bario agua mar}}$	$= C_{\text{bario}} \cdot Q_{\text{entrada}} = (5.144 \cdot 10^{-4}) \frac{\text{gm}}{\text{s}}$

Figura 3

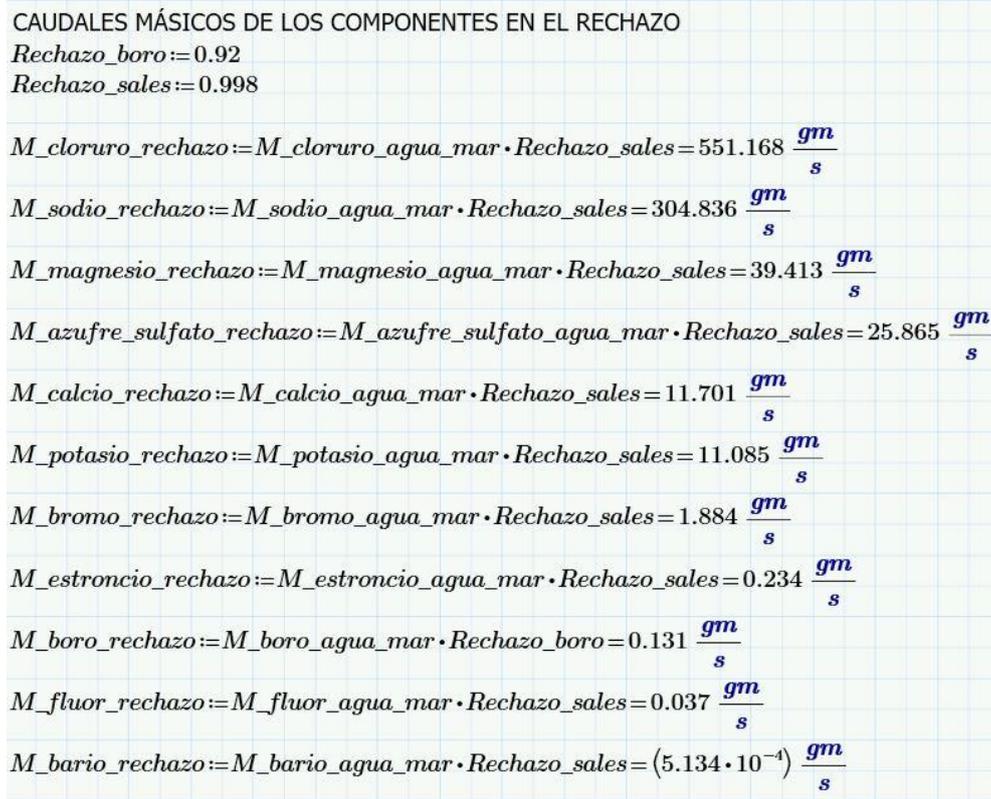


Figura 4

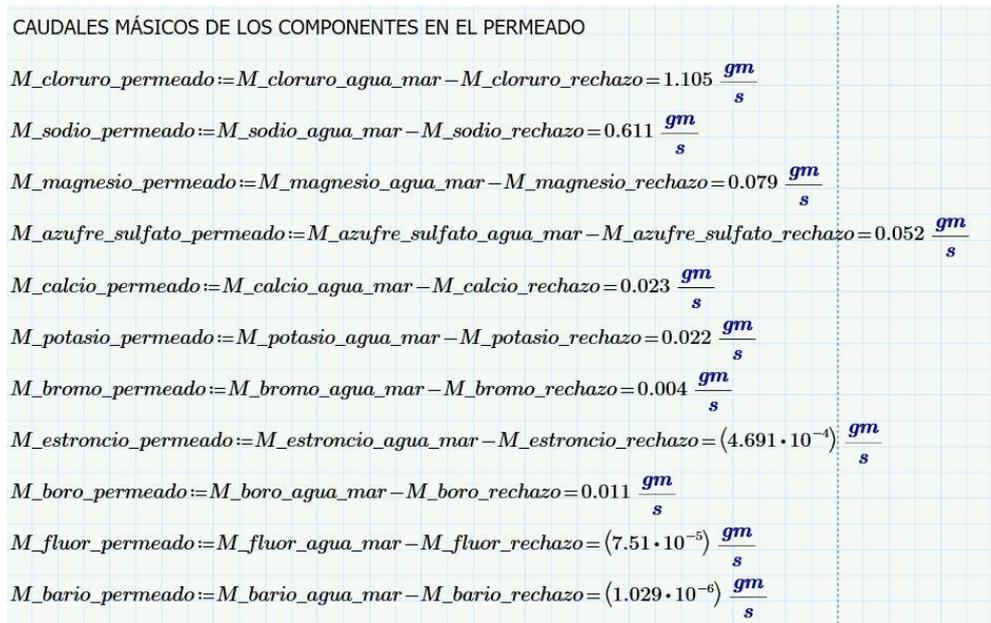


Figura 5

CÁLCULO DE LAS CONCENTRACIONES EN EL RECHAZO

$$C_{\text{cloruro_rechazo}} := \frac{M_{\text{cloruro_rechazo}}}{Q_{\text{rechazo}}} = (3.896 \cdot 10^4) \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{sodio_rechazo}} := \frac{M_{\text{sodio_rechazo}}}{Q_{\text{rechazo}}} = (2.155 \cdot 10^4) \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{magnesio_rechazo}} := \frac{M_{\text{magnesio_rechazo}}}{Q_{\text{rechazo}}} = (2.786 \cdot 10^3) \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{sulfato_rechazo}} := \frac{M_{\text{azufre_sulfato_rechazo}}}{Q_{\text{rechazo}}} = (1.828 \cdot 10^3) \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{calcio_rechazo}} := \frac{M_{\text{calcio_rechazo}}}{Q_{\text{rechazo}}} = 827.142 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{potasio_rechazo}} := \frac{M_{\text{potasio_rechazo}}}{Q_{\text{rechazo}}} = 783.611 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{bromo_rechazo}} := \frac{M_{\text{bromo_rechazo}}}{Q_{\text{rechazo}}} = 133.206 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{estroncio_rechazo}} := \frac{M_{\text{estroncio_rechazo}}}{Q_{\text{rechazo}}} = 16.549 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{boro_rechazo}} := \frac{M_{\text{boro_rechazo}}}{Q_{\text{rechazo}}} = 9.233 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{fluor_rechazo}} := \frac{M_{\text{fluor_rechazo}}}{Q_{\text{rechazo}}} = 2.649 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{bario_rechazo}} := \frac{M_{\text{bario_rechazo}}}{Q_{\text{rechazo}}} = 0.036 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

Figura 6

CÁLCULO DE LAS CONCENTRACIONES EN EL PERMEADO

$$C_{\text{cloruro_permeado}} := \frac{M_{\text{cloruro_permeado}}}{Q_{\text{permeado}}} = 95.433 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{sodio_permeado}} := \frac{M_{\text{sodio_permeado}}}{Q_{\text{permeado}}} = 52.781 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{magnesio_permeado}} := \frac{M_{\text{magnesio_permeado}}}{Q_{\text{permeado}}} = 6.824 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{sulfato_permeado}} := \frac{M_{\text{azufre_sulfato_permeado}}}{Q_{\text{permeado}}} = 4.478 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{calcio_permeado}} := \frac{M_{\text{calcio_permeado}}}{Q_{\text{permeado}}} = 2.026 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{potasio_permeado}} := \frac{M_{\text{potasio_permeado}}}{Q_{\text{permeado}}} = 1.919 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{bromo_permeado}} := \frac{M_{\text{bromo_permeado}}}{Q_{\text{permeado}}} = 0.326 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{estroncio_permeado}} := \frac{M_{\text{estroncio_permeado}}}{Q_{\text{permeado}}} = 0.041 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{boro_permeado}} := \frac{M_{\text{boro_permeado}}}{Q_{\text{permeado}}} = 0.981 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{fluor_permeado}} := \frac{M_{\text{fluor_permeado}}}{Q_{\text{permeado}}} = 0.006 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{bario_permeado}} := \frac{M_{\text{bario_permeado}}}{Q_{\text{permeado}}} = (8.889 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

Figura 7

CÁLCULO DE LA BOMBA DE ALTA PRESIÓN Y LA BOMBA BOOSTER

Rendimiento := 0.95

Presión_entrada := 1 · bar

Presión_ósmosis := 65 · bar

Pérdidas_por_elemento := 1 · bar

Elementos_por_tubo := 7

Pérdidas_presión := Elementos_por_tubo · Pérdidas_por_elemento = 7 bar

Presión_rechazo := Presión_ósmosis – Pérdidas_presión = 58 bar

$$Q_{bypass} := \frac{Q_{entrada}}{2} = 0.013 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{sin_bypass} := \frac{Q_{entrada}}{2} = 0.013 \frac{m^3}{s}$$

$$Potencia_bomba_alta := \frac{Q_{sin_bypass} \cdot Presión_ósmosis}{Rendimiento}$$

Potencia_bomba_alta = (8.799 · 10⁴) W

$$Potencia_bomba_booster := \frac{Q_{bypass} \cdot (Presión_ósmosis – Presión_rechazo)}{Rendimiento}$$

Potencia_bomba_booster = (9.476 · 10³) W

Figura 8

VOLUMEN DE AGUA DESTILADA PARA LA DISOLUCIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO

pH_inicial := 0.3

Volumen_inicial := 1 · liter

$$C_{protones_inicial} := (10^{-pH_inicial}) \cdot \frac{mol}{liter} = 0.501 \frac{mol}{liter}$$

Moles_protones_inicial := Volumen_inicial · C_protones_inicial = 0.501 mol

Volumen_agua_destilada := 4.1 · liter

Volumen_final := Volumen_inicial + Volumen_agua_destilada = 5.1 liter

$$C_{protones_final} := \frac{Moles_protones_inicial}{Volumen_final} = 0.098 \frac{mol}{liter}$$

$$pH_final := -\log\left(C_{protones_final} \cdot \frac{liter}{mol}\right) = 1.008$$

Figura 9

VOLUMEN DE LÍQUIDO EN LOS MÓDULOS DE MEMBRANAS

$Bastidores := 5$
 $Membranas_por_bastidor := 77$
 $Membranas_totales := Bastidores \cdot Membranas_por_bastidor = 385$
 $Espaciador := 28 \cdot 0.00254 \cdot mm = 0.071 \text{ mm}$
 $Longitud_módulo := 1016 \cdot mm$
 $Diámetro_grande := 201 \cdot mm$
 $Diámetro_pequeño := 29 \cdot mm$

$Radio_grande := \frac{Diámetro_grande}{2} = 100.5 \text{ mm}$
 $Radio_pequeño := \frac{Diámetro_pequeño}{2} = 14.5 \text{ mm}$

$Radio_útil := Radio_grande - Radio_pequeño = 86 \text{ mm}$

$Número_espacios := \frac{Radio_útil}{Espaciador} = 1.209 \cdot 10^3$
 $Número_espacios_reales := \frac{Número_espacios}{2} = 604.612$

$Radio_total_espacios := Número_espacios_reales \cdot Espaciador = 43 \text{ mm}$

$Volumen_líquido_membrana := \pi \cdot \frac{(2 \cdot Radio_total_espacios)^2}{4} \cdot Longitud_módulo$
 $Volumen_líquido_membrana = 5.902 \text{ liter}$
 $Volumen_total_líquido := Volumen_líquido_membrana \cdot Membranas_totales$
 $Volumen_total_líquido = (2.272 \cdot 10^3) \text{ liter}$

Figura 10

TANQUE PARA LA DISOLUCIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO DE LIMPIEZA

$Volumen_total_líquido = 2.272 \text{ m}^3$
 $Volumen_tanque := 1.15 \cdot Volumen_total_líquido = 2.613 \text{ m}^3$
 $Diámetro := 1.5 \cdot m$

$Altura_tanque := \frac{Volumen_tanque}{\frac{\pi \cdot Diámetro^2}{4}} = 1.479 \text{ m}$

Figura 11

ANEXO 5-CÁLCULOS DEL CONTACTOR DE CALCITA

CÁLCULO DEL CONTACTOR DE CALCITA

$$Velocidad_contactor := 8 \cdot \frac{m}{hr}$$
$$Tiempo_contactor := 10 \cdot min$$
$$Q_permeado = 0.012 \frac{m^3}{s}$$
$$Altura_contactor := Velocidad_contactor \cdot Tiempo_contactor$$
$$Altura_contactor = 1.333 \text{ m}$$
$$Volumen_lecho := Q_permeado \cdot Tiempo_contactor$$
$$Volumen_lecho = 6.944 \text{ m}^3$$
$$Área_contactor := \frac{Volumen_lecho}{Altura_contactor}$$
$$Área_contactor = 5.208 \text{ m}^2$$
$$Diámetro_contactor := \left(\frac{Área_contactor \cdot 4}{\pi} \right)^{0.5}$$
$$Diámetro_contactor = 2.575 \text{ m}$$

Figura 1

CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISOLUCIÓN DE ÁCIDO A AÑADIR AL PERMEADO

$$Dosis_ácido := 15 \cdot \frac{mg}{liter}$$
$$Q_másico_ácido := Q_permeado \cdot Dosis_ácido$$
$$Q_másico_ácido = (1.736 \cdot 10^{-4}) \frac{kg}{s}$$
$$Q_molar_ácido := \frac{Q_másico_ácido}{Peso_molecular_ácido}$$
$$Q_molar_ácido = 0.002 \frac{mol}{s}$$
$$Q_volumétrico_ácido := \frac{Q_másico_ácido}{\rho_ácido}$$
$$Q_volumétrico_ácido = 0.094 \frac{ml}{s}$$

Figura 2

pH DEL AGUA DEL PERMEADO DESPUÉS DE ADICIÓN DE ÁCIDO

$$C_{\text{protones_inicialmente}} := 10^{-6.3} \cdot \frac{\text{mol}}{\text{liter}}$$

$$\text{Moles_protones_iniciales} := C_{\text{protones_inicialmente}} \cdot Q_{\text{permeado}}$$

$$\text{Moles_protones_añadidos} := 2 \cdot Q_{\text{molar_ácido}}$$

$$\text{Moles_protones_finales} := \text{Moles_protones_iniciales} + \text{Moles_protones_añadidos}$$

$$C_{\text{protones_final}} := \frac{\text{Moles_protones_finales}}{Q_{\text{permeado}}} = (3.066 \cdot 10^{-4}) \frac{\text{mol}}{\text{liter}}$$

$$\text{pH} := -\log \left(C_{\text{protones_final}} \cdot \frac{\text{liter}}{\text{mol}} \right) = 3.513$$

Figura 3

CAUDAL DE CALCIO ADICIONADO EN EL CONTACTOR DE CALCITA

$$\text{Peso_molecular_carbonato_cálcico} := 100 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{mol}}$$

$$\text{Peso_calcio} := 40 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{mole}}$$

$$\text{Peso_molecular_carbonato} := 60 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{mole}}$$

$$\text{Dosis_carbonato_cálcico} := 0.3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Q_{\text{permeado}} = 0.012 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$M_{\text{carbonato_cálcico}} := \text{Dosis_carbonato_cálcico} \cdot Q_{\text{permeado}} = 3.472 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

$$N_{\text{carbonato_cálcico}} := \frac{M_{\text{carbonato_cálcico}}}{\text{Peso_molecular_carbonato_cálcico}} = 0.035 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$N_{\text{calcio}} := N_{\text{carbonato_cálcico}} = 0.035 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$N_{\text{carbonato}} := N_{\text{carbonato_cálcico}} = 0.035 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{calcio}} := N_{\text{calcio}} \cdot \text{Peso_calcio} = 1.389 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{carbonato}} := N_{\text{carbonato}} \cdot \text{Peso_molecular_carbonato} = 2.083 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

Figura 4

CÁLCULO DE LOS CAUDALES MÁSICOS DE LOS COMPONENTES EN EL AGUA PRODUCTO

$$M_{\text{cloruro_producto}} := M_{\text{cloruro_permeado}} = 1.105 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{sodio_producto}} := M_{\text{sodio_permeado}} = 0.611 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{magnesio_producto}} := M_{\text{magnesio_permeado}} = 0.079 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{azufre_sulfato_producto}} := M_{\text{azufre_sulfato_permeado}} = 0.052 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{calcio_producto}} := M_{\text{calcio_permeado}} + M_{\text{calcio}} = 1.412 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{potasio_producto}} := M_{\text{potasio_permeado}} = 0.022 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{bromo_producto}} := M_{\text{bromo_permeado}} = 0.004 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{estroncio_producto}} := M_{\text{estroncio_permeado}} = (4.691 \cdot 10^{-4}) \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{boro_producto}} := M_{\text{boro_permeado}} = 0.011 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{fluor_producto}} := M_{\text{fluor_permeado}} = (7.51 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{bario_producto}} := M_{\text{bario_permeado}} = (1.029 \cdot 10^{-6}) \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{carbonato_producto}} := M_{\text{carbonato}} = 2.083 \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

Figura 5

CONCENTRACIONES DE LOS COMPONENTES EN EL AGUA PRODUCTO

$$C_{\text{cloruro_producto}} := \frac{M_{\text{cloruro_producto}}}{Q_{\text{permeado}}} = 95.433 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{sodio_producto}} := \frac{M_{\text{sodio_producto}}}{Q_{\text{permeado}}} = 52.781 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{magnesio_producto}} := \frac{M_{\text{magnesio_producto}}}{Q_{\text{permeado}}} = 6.824 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{sulfato_producto}} := \frac{M_{\text{azufre_sulfato_producto}}}{Q_{\text{permeado}}} = 4.478 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{calcio_producto}} := \frac{M_{\text{calcio_producto}}}{Q_{\text{permeado}}} = 122.026 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{potasio_producto}} := \frac{M_{\text{potasio_producto}}}{Q_{\text{permeado}}} = 1.919 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{bromo_producto}} := \frac{M_{\text{bromo_producto}}}{Q_{\text{permeado}}} = 0.326 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{estroncio_producto}} := \frac{M_{\text{estroncio_producto}}}{Q_{\text{permeado}}} = 0.041 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{boro_producto}} := \frac{M_{\text{boro_producto}}}{Q_{\text{permeado}}} = 0.981 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{fluor_producto}} := \frac{M_{\text{fluor_producto}}}{Q_{\text{permeado}}} = 0.006 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{bario_producto}} := \frac{M_{\text{bario_producto}}}{Q_{\text{permeado}}} = (8.889 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$C_{\text{carbonato_producto}} := \frac{M_{\text{carbonato_producto}}}{Q_{\text{permeado}}} = 180 \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

Figura 6

CÁLCULO DEL TANQUE DE ÁCIDO SULFÚRICO

$$Q_{\text{ácido_pretratamiento}} := 0.001 \cdot \frac{\text{ml}}{\text{s}}$$
$$Q_{\text{ácido_contactor}} := 0.094 \cdot \frac{\text{ml}}{\text{s}}$$
$$Q_{\text{ácido_total_contactor}} := 5 \cdot Q_{\text{ácido_contactor}} = 0.47 \frac{\text{ml}}{\text{s}}$$
$$Q_{\text{ácido_total}} := Q_{\text{ácido_total_contactor}} + Q_{\text{ácido_pretratamiento}} = 0.471 \frac{\text{ml}}{\text{s}}$$
$$\text{Tiempo_mes} = 30 \text{ day}$$
$$\text{Volumen_disolución_ácido} := Q_{\text{ácido_total}} \cdot \text{Tiempo_mes} = 1.221 \text{ m}^3$$
$$\text{Volumen_tanque_ácido} := 1.15 \cdot \text{Volumen_disolución_ácido} = 1.404 \text{ m}^3$$

Figura 7

CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LA Balsa DE ALMACENAMIENTO DE AGUA PRODUCTO

$$\text{Volumen_agua} := 500 \cdot \text{m}^3$$
$$\text{Volumen_balsa} := 1.15 \cdot \text{Volumen_agua} = 575 \text{ m}^3$$
$$\text{Profundidad_balsa} := 4 \cdot \text{m}$$
$$\text{Área_balsa} := \frac{\text{Volumen_balsa}}{\text{Profundidad_balsa}} = 143.75 \text{ m}^2$$
$$\text{Lado_balsa} := \text{Área_balsa}^{0.5} = 11.99 \text{ m}$$

Figura 8

CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DE SOSA

$$\text{Pureza} := 0.25$$
$$\rho_{\text{sosa}} := 1278 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$
$$C_{\text{másica_sosa}} := \frac{25 \cdot \text{liter}}{100 \cdot \text{liter}} \cdot \rho_{\text{sosa}} = 0.32 \frac{\text{kg}}{\text{liter}}$$
$$\text{Peso_molecular_sosa} := 40 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{mol}}$$
$$C_{\text{molar_sosa}} := \frac{C_{\text{másica_sosa}}}{\text{Peso_molecular_sosa}} = 7.988 \frac{\text{mol}}{\text{liter}}$$

Figura 9

CÁLCULO DEL CAUDAL DE SOSA A AÑADIR AL AGUA PRODUCTO

$$Q_{\text{producto}} := 5 \cdot Q_{\text{permeado}} = 0.058 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Dosis_{\text{sosa}} := 0.015 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{liter}}$$

$$Q_{\text{másico_sosa}} := Dosis_{\text{sosa}} \cdot Q_{\text{producto}} = (8.681 \cdot 10^{-4}) \frac{\text{gm}}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{volumétrico_sosa}} := \frac{Q_{\text{másico_sosa}}}{C_{\text{másica_sosa}}} = 0.003 \frac{\text{ml}}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{molar_sosa}} := Q_{\text{volumétrico_sosa}} \cdot C_{\text{molar_sosa}} = 0.022 \frac{\text{mmol}}{\text{s}}$$

Figura 10

CÁLCULO DEL PH DEL AGUA PRODUCTO DESPUÉS DE AÑADIR LA SOSA

$$C_{\text{OH_inicial}} := 10^{-10.5} \cdot \frac{\text{mol}}{\text{liter}} = (3.162 \cdot 10^{-11}) \frac{\text{mol}}{\text{liter}}$$

$$Q_{\text{OH_inicial}} := C_{\text{OH_inicial}} \cdot Q_{\text{producto}} = (1.83 \cdot 10^{-9}) \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{OH_añadido}} := Q_{\text{molar_sosa}} = (2.17 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{OH_final}} := Q_{\text{OH_inicial}} + Q_{\text{OH_añadido}} = (2.17 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$C_{\text{OH_final}} := \frac{Q_{\text{OH_final}}}{Q_{\text{producto}}} = (3.75 \cdot 10^{-7}) \frac{\text{mol}}{\text{liter}}$$

$$p_{\text{OH}} := -\log\left(C_{\text{OH_final}} \cdot \frac{\text{liter}}{\text{mol}}\right) = 6.426$$

$$\text{pH} := 14 - p_{\text{OH}} = 7.574$$

Figura 11