

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA POLITÈCNICA SUPERIOR DE ALCOY



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

CAMPUS D'ALCOI

TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

“Estudio de dimensionado y viabilidad económica de la implantación de una planta desaladora en Jeddah (Arabia Saudí)”

Autor:

Dña. Beatriz Giménez Carretero

Dirigido por:

Dr. Vicent Fombuena Borràs

Dr. Jaime Lora García

Septiembre 2020

Agradecimientos

A mis profesores Vicent y Jaime, por enseñarme todo lo que saben y hacer de su trabajo su pasión.

A mis padres, mi hermana y Omar, por haberme apoyado en todo momento durante todos estos años de estudios, por aguantar las noches de estudio, los momentos de ofuscación y por enseñarme a no rendirme.

Resumen

“Estudio de dimensionado y viabilidad económica de la implantación de una planta desaladora en Jeddah (Arabia Saudí)”

El siguiente proyecto tiene como objetivo el diseño de una planta desalinizadora en Jeddah (Arabia Saudí), debido a la gran escasez de agua para el consumo y a la gran población de este país.

Se realizará el estudio de los distintos métodos de desalación existentes en el mercado, seleccionando el método más adecuado para este proceso. El diseño de la planta se desarrollará bajo las características de la Ósmosis Inversa, en el cual se hace pasar el agua de mar por un pretratamiento, para su posterior filtración en las membranas de osmosis inversa y finalmente se pasa por un lecho de calcita para establecer la cantidad de sales minerales que la hacen apta para el consumo humano.

Se dimensionará la planta para desalinizar el agua mediante 5 trenes, obteniendo un caudal de 300 000m³/día.

Debido a que este tipo de plantas desaladoras requieren de una importante cantidad de energía eléctrica para su funcionamiento a pleno rendimiento y la mayor parte de la energía que existe en la zona esta generada a partir del petróleo, siendo medios contaminantes y aumentando la huella del carbono.

Por lo tanto, se realizará el diseño de una central fotovoltaica conectada a red para cubrir las necesidades de energía eléctrica de la planta. Dicha central estará formada por 37 838 módulos fotovoltaicos y tendrá un consumo de 14 000kWp.

Summary

"Study of sizing and economic feasibility of the implementation of a desalination plant in Jeddah (Saudi Arabia)"

The following project aims to design a desalination plant in Jeddah, Saudi Arabia, due to the large shortage of water for consumption and the large population of this country. The study of the different desalination methods will be carried out on the market, selecting the most appropriate method for this process.

The design of the plant will be developed under the characteristics of reverse osmosis, in which seawater passes through a pre-treated, for further filtration in reverse osmosis membranes and finally passed through a calcite bed to establish the amount of mineral salts that make it suitable for human consumption.

The plant will be sized to desalinate the water by 5 trains, obtaining a flow of 300 000m³/day.

Because this type of desalination plants requires a significant amount of electrical energy for full-performance operation and most of the energy that exists in the area is generated from oil, being polluting media, and increasing the carbon footprint.

Therefore, the design of a photovoltaic plant will be carried out to the grid to meet the electrical power needs of the plant. This plant will consist by 37 838 photovoltaic modules and will have a consumption of 14 000kWp.

Resum

"Estudi de dimensionament i viabilitat econòmica de la implementació d'una dessalinitzadora a Jeddah (Aràbia Saudita)"

El següent projecte té com a objectiu dissenyar una planta dessalinitzadora a Jeddah, Aràbia Saudita, a causa de la gran escassetat d'aigua per al consum i a la gran població d'aquest país.

L'estudi dels diferents mètodes de dessalinització del mercat es realitzarà seleccionant el mètode més apropiat per a aquest procés. El disseny de la planta es desenvoluparà sota les característiques de l'osmosi Inversa, en què l'aigua de mar passa a través d'un Pretractat, per a una major filtració en les membranes d'osmosi inversa i finalment passa a través d'un llit Calcita per establir la quantitat de sals minerals que la fan adequada per al consum humà.

La planta es dimensiona per desalin l'aigua per 5 trens, obtenint un cabal de 300 000m³/dia.

Atès que aquest tipus de plantes de dessalinització requereixen una quantitat significativa d'energia elèctrica per al seu funcionament en ple rendiment i la major part de l'energia que existeix a la zona es genera a partir del petroli, sent contaminants significa i augmentant la petjada de carboni.

Per tant, el disseny d'una planta fotovoltaica es realitzarà per satisfer les necessitats de potència elèctrica de la planta. Aquesta planta constarà de 37 838 mòduls fotovoltaics i tindrà un consum de 14 000kWp.

Contenido

Agradecimientos	1
Resumen.....	2
Resum.....	4
Listado de tablas.....	10
1. Marco teórico.	11
1.1. Introducción.	11
1.1.1. Recursos hídricos a nivel mundial	11
1.1.2. Recursos hídricos en Arabia Saudí y Jeddah.	12
1.2. Antecedentes.	14
1.2.1. Situación global de la desalinización.	14
1.2.2. Desalinización en Arabia Saudí y Jeddah.....	14
1.3. Métodos de desalinización y justificación de la elección.....	15
1.3.1. Destilación súbita por efecto flash (destilación Multietapa Súbita Flash).	15
1.3.2. Destilación por Efecto Múltiple (MED).....	16
1.3.3. Compresión de Vapor (VC).	17
1.3.4. Ósmosis inversa (RO).....	18
1.3.5. Electrodiálisis y reversión de electrodiálisis (ED).	19
1.3.6. Justificación de la elección.	20
2. Objetivo.....	21
2.1. Objetivo general.....	21
2.2. Objetivos particulares.	21
3. Diseño de la planta desaladora.	22
3.1. Introducción del diseño.....	22
3.2. Ubicación de la planta.....	22
3.3. Propiedades del agua del Mar Rojo.	24
3.3.1. Análisis del agua a la entrada.	24
3.3.2. Captación.....	24
3.3.3. Pretratamiento.....	25
3.3.3.1. Regulación del pH.....	26
3.3.3.2. Coagulación.	27
3.3.3.3. Desinfección.	29
3.3.3.4. Agente reductor.	30
3.3.3.5. Antiincrustante.....	31
3.3.3.6. Ultrafiltración.	32
3.4. Ósmosis inversa.....	33

3.4.1.	Consideraciones del diseño.....	34
3.4.2.	Simulación en IMS Design	34
3.4.3.	Sistema ERD.....	36
3.4.4.	Limpieza de membranas.	37
3.5.	Post-tratamiento.....	37
3.5.1.	Lecho del calcita.	38
3.5.1.1.	Dosificación de CO2.....	39
3.5.1.2.	Diseño de los lechos de calcita.....	39
3.6.	Vertido de salmuera.....	40
3.7.	Bombas y conducciones.....	40
3.7.1.	Materiales.	40
3.7.1.1.	Polietileno de alta densidad (PEAD).....	41
3.7.1.2.	Poliéster reforzado con fibras de vidrio (PRFV)	41
3.7.2.	Explicación del proceso de cálculo.....	41
3.8.	Tanques.....	45
3.8.1.	Tanque de captación.....	45
3.8.2.	Tanque de agua producto.....	45
3.8.3.	Tanque de neutralización.....	46
3.8.4.	Tanque intermedio.....	46
3.9.	Diseño eléctrico de la Central Fotovoltaica.....	47
3.9.1.	Descripción y selección de los elementos de la Central Fotovoltaica.....	47
3.9.1.1.	Módulos fotovoltaicos.....	47
3.9.1.2.	Inversor.....	49
3.9.1.3.	Caja de conexiones.....	52
3.9.1.4.	Estructura de soporte.....	53
3.9.2.	Cálculos de la instalación fotovoltaica	53
3.9.2.1.	Configuración y número de módulos fotovoltaicos	53
3.9.2.2.	Orientación e inclinación de los módulos fotovoltaicos.	56
3.9.2.2.1.	Orientación de los módulos fotovoltaicos	56
3.9.2.2.2.	Inclinación de los módulos fotovoltaicos	57
3.9.2.3.	Distancia mínima entre filas de módulos fotovoltaicos.....	58
3.9.2.4.	Número y disposición de cajas de conexiones.....	61
3.9.2.5.	Cableado instalación eléctrica.....	61
4.	Estudio económico.....	62
4.1.	Coste económico de la central fotovoltaica.....	62
4.2.	Coste económico de la planta desaladora.....	62

4.3.	Coste económico del agua obtenida.....	67
4.4.	Influencia de las variables	67
5.	Conclusiones.....	68
6.	Bibliografía.....	69
7.	Anexos.....	72
	Anexo I: Módulo de ultrafiltración.....	72
	Anexo II: Membrana de osmosis.....	73
	Anexo III: Diseño de la planta.....	74
	Anexo IV: Cálculos de las bombas.....	75

Abreviaturas

CV	Vapor Compression	Compresión Mecánica
ED	Electrodialysis	Electrodiálisis
ERI	Energy Recovery Inc.	Recuperador de energía
HMP	Hexametafosfato de sodio	
ISFV	Instalación Solar Fotovoltaica	
MED	Multi Effect Distillation	Destilación por Efecto Múltiple
MFS	Multi Stage Flash Distillation	Destilación Multietapa Súbita Flash
MVC	Mechanical Vapor Compression	Compresión mecánica de vapor
RO	Reverse Osmosis	Ósmosis inversa
TDS	Total Disolved Solids	Solidos Totales Disueltos
TVC	Thermal Vapor Compression	Compresión térmica de vapor

Listado de figuras

Figura 1. Nivel de estrés hídrico físico* [1]	11
Figura 2. Cambio en la precipitación neta, 2010-2050 [2].	12
Figura 3. Precipitaciones anuales en la Península arábiga [3].	13
Figura 4. Resumen del clima en Jeddah [4].....	14
Figura 5. Diagrama del proceso MSF [5].	16
Figura 6. Diagrama del proceso MED [5].....	16
Figura 7. Diagrama del proceso VC [5].....	17
Figura 8. Diagrama del proceso RO [5].....	18
Figura 9. Diagrama del proceso ED[5].....	19
Figura 10. Ubicación de la planta desaladora.	23
Figura 11. Ampliación de la ubicación de la planta desaladora [6].....	23
Figura 12. Imagen de captación por pozo playero [8].	24
Figura 13. Diagrama de bloques del proceso de pretratamiento.	26
Figura 14. Funcionamiento de los filtros de ultrafiltración.....	32
Figura 15. Filtro ultrafiltración industrial.	33
Figura 16. Análisis y captación en IMS Design [9].	34
Figura 17. Cálculo de membranas y recirculación energía [9].	35
Figura 18. Diagrama del proceso [9].	35
Figura 19. Simulación del programa ERI.....	36
Figura 20. Lecho de calcita con disolvedor de CO ₂ [11].	38
Figura 21. Bomba de alta presión [14].	44
Figura 22. Bomba booster [15].....	44
Figura 23. Bomba de captación [16].	44
Figura 24. Módulo fotovoltaico [12].	48
Figura 25. Inversor fotovoltaico [13].....	50
Figura 26. Orientación módulo fotovoltaico (ángulo azimut) [14].	57
Figura 27. Ángulo inclinación módulo fotovoltaico [14].	57
Figura 28. Distancia mínima entre filas de módulos fotovoltaicos.	58
Figura 29. Valores obtenidos distancia mínima entre filas de módulos fotovoltaicos.	59
Figura 30. Representación gráfica de las variables.	67

Listado de tablas

Tabla 1. Composición del agua de mar en Jeddah [7].....	24
Tabla 2. Datos del ácido sulfúrico.	26
Tabla 3. Datos del cloruro férrico.....	28
Tabla 4. Datos del hipoclorito de sodio.....	29
Tabla 5. Datos del bisulfito de sodio.	30
Tabla 6. Datos del hexametáfosfato de sodio.....	31
Tabla 7. Parámetros obtenidos en el IMS Design	36
Tabla 8. Tabla resumen de las bombas necesarias.	43
Tabla 9. Características del módulo fotovoltaico LONGI SOLAR LR6-72PH 370M	49
Tabla 10. Características técnicas de la estación de potencia MV Power Station 5000SC-EV de SMA.	51
Tabla 11. Características técnicas de la caja de conexiones String-Monitor SSM-U2415 de SMA.	52
Tabla 12. Coste de la central fotovoltaica.....	62
Tabla 13. Coste final del agua.	67
Tabla 14. Comparativa número de tubos y flujo promedio respecto al coste.....	67

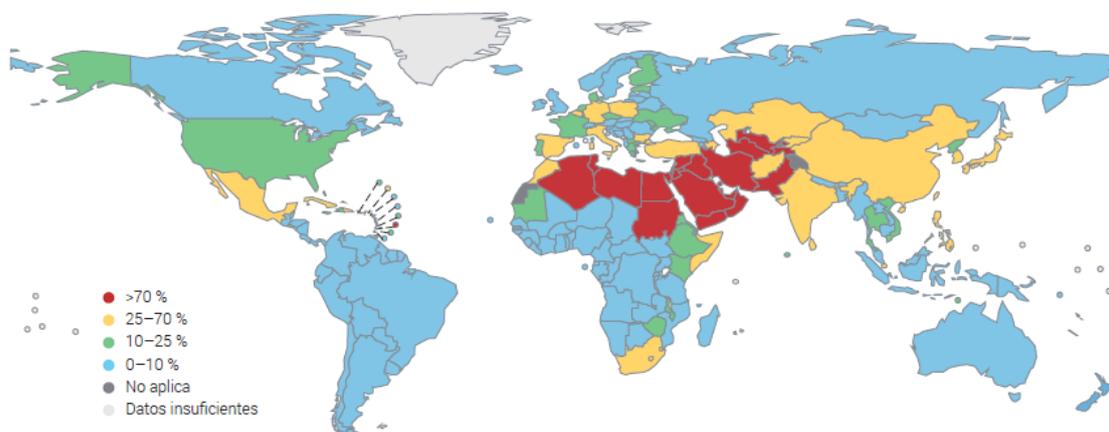
1. Marco teórico.

1.1. Introducción.

1.1.1. Recursos hídricos a nivel mundial

Más de 2 000 millones de personas viven en países con un alto estrés físico por el agua. Aunque el estrés hídrico promedio es solo del 11%, 31 países experimentan un estrés hídrico entre el 25% y el 70%, y 22 países están por encima del 70%, y por lo tanto están bajo un estrés hídrico severo (ONU, 2018a). El creciente estrés hídrico indica un alto uso de los recursos hídricos, con mayor impacto en la sostenibilidad de estos y un creciente conflicto entre los usuarios [1].

También, cabe destacar otros aspectos importantes del estrés hídrico. En primer lugar, dado que la disponibilidad de agua puede ser variable de una temporada a otra, los datos promedio del año no muestran periodos de escasez de agua. En segundo lugar, la combinación de los datos a nivel de país puede ocultar diferencias (a veces enormes) en la disponibilidad del agua a lo largo de varias cuencas hidrográficas dentro de un país o región determinado. En tercer lugar, el estrés hídrico físico no tiene en cuenta la escasez económica de agua, donde el acceso al agua no está limitado como resultado de la cantidad de recursos hídricos existentes en sí, sino por la falta de infraestructuras para recolectar, transportar y tratar el agua con fines humanos. La mayoría de estos países tienen menos del 6% de su área cultivada equipada con sistemas de riego (AQUASTAT, s.f.)y, por lo tanto, una baja tasa de extracción comparada con los recursos disponibles de agua dulce a nivel de país, a pesar del estrés hídrico potencialmente grave a niveles locales [1].



*El estrés hídrico físico se define aquí como la proporción del total de agua dulce extraída anualmente por todos los sectores principales, incluidos los requisitos ambientales de agua, respecto a la cantidad total de recursos renovables de agua dulce, expresada como porcentaje.

Figura 1. Nivel de estrés hídrico físico* [1]

Es probable que los niveles de estrés hídrico físico aumenten a medida que crezcan las poblaciones y su demanda de agua, y se intensifiquen los efectos del cambio climático (ONU, 2018a). De igual manera, es probable que el cambio climático y la variabilidad del clima en aumento oscilen a escala local y de cuenca, según las restricciones. Sin embargo, en su mayoría, las áreas secas tenderán a ser más secas y las húmedas más húmedas (figura 2), de forma que el cambio climático probablemente exacerbará el estrés hídrico en las áreas que ya son de las más afectadas [1].

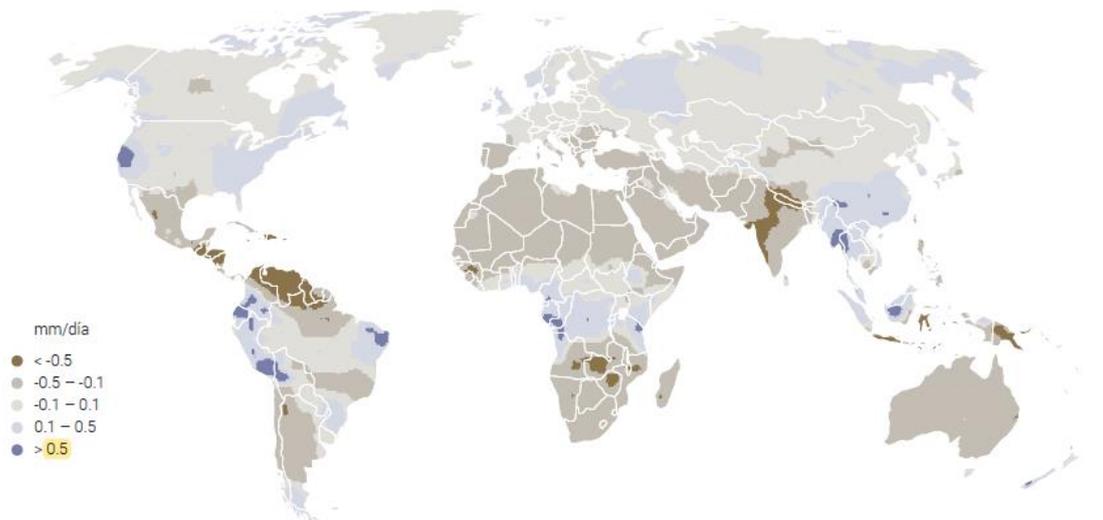


Figura 2. Cambio en la precipitación neta, 2010-2050 [2].

Las estimaciones sugieren que, si la degradación del medio ambiente y las presiones insostenibles sobre los recursos hídricos mundiales continúan, el 45% del producto interior bruto (PIB) mundial, el 52% de la población mundial y el 40% de la producción mundial de cereales estarán en riesgo para el año 2050. Las poblaciones pobres y marginadas se verán desproporcionadamente afectadas, agravando aún más las ya crecientes desigualdades (ONU, 2018a) [1].

1.1.2. Recursos hídricos en Arabia Saudí y Jeddah.

La península arábiga (Arabia Saudí, Irak, Jordania, Omán, Yemen y los Emiratos Árabes Unidos), se asienta sobre uno de los mayores depósitos de agua subterránea, pero la precipitación anual limitada hace que estos no se recarguen adecuadamente [2].

Actualmente, Arabia Saudí obtiene la mayor parte de su agua potable mediante la desalinización del agua de mar, pero usar esa agua para la agricultura “tiene un costo prohibitivo”. Por lo tanto, el gobierno trata de desarrollar recursos para extraer el agua subterránea para riego [2].

Con una lluvia de menos de 25mm al año, gran parte del agua se considera agua fósil. Algunas de las aguas datan del pleistocénico, cuando un clima más húmedo llenó muchos de los acuíferos del mundo. Otras regiones, como las zonas montañosas del sur de la Península arábiga, ven más lluvia y nieve anuales, que recargan continuamente el acuífero [2].

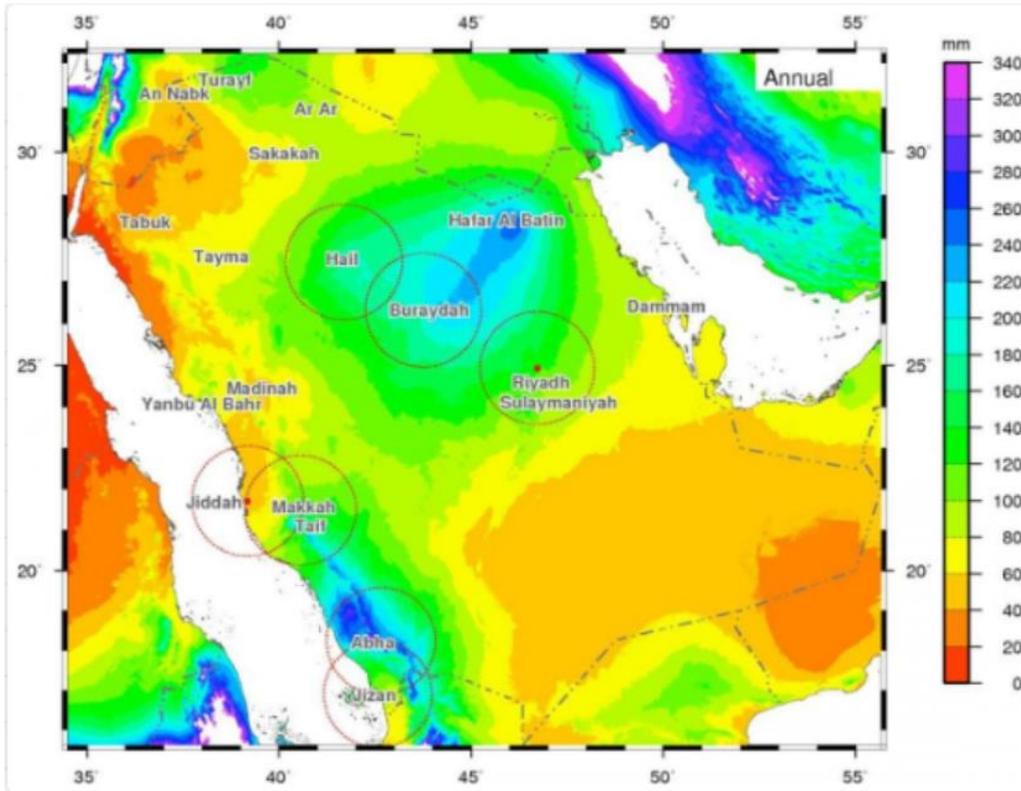


Figura 3. Precipitaciones anuales en la Península arábiga [3].

La ciudad de Jeddah alberga el puerto marítimo más importante de la costa oeste de la península arábiga, está situada en el emirato de La Meca.

Alberga una población de 3 434 000 habitantes en el casco urbano, mientras que en el área metropolitana puede llegar hasta los 3 800 000 habitantes. Se encuentra entre las cien áreas más pobladas del mundo.

La climatología en Jeddah se caracteriza por tener veranos muy largos, tórridos, bochornosos y áridos, mientras que sus inviernos son cortos, ventosos y mayoritariamente despejados. Las temperaturas generalmente oscilan entre los 18°C a 39°C. Las probabilidades de precipitación son de un 3% de noviembre a enero (unos 65mm al año), con lo que se puede suponer que tienen muy poca agua de lluvia para abastecer los acuíferos y obtener agua de ellos [3].

Se debe tener en cuenta la temperatura durante todo el año, ya que será necesaria para saber cómo afectará esta al funcionamiento de nuestra planta desaladora. La temperatura del agua marina oscila entre 25°C en invierno y 31°C durante el verano [3].

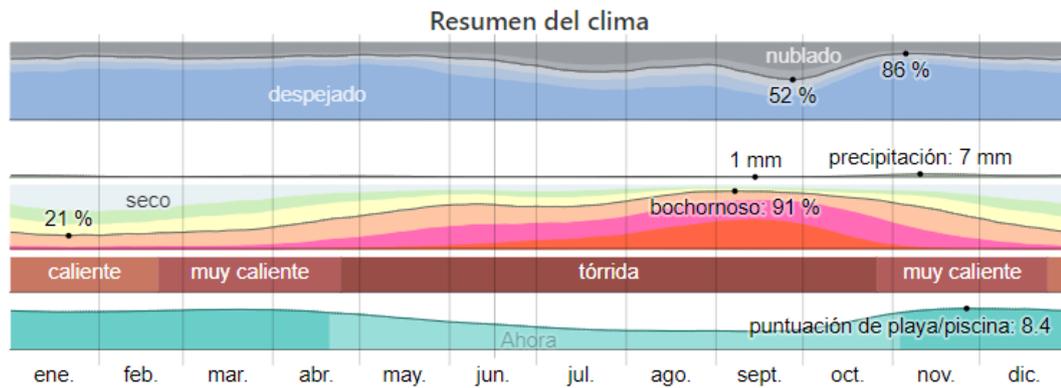


Figura 4. Resumen del clima en Jeddah [4].

1.2. Antecedentes.

1.2.1. Situación global de la desalinización.

Actualmente Arabia Saudí, es uno de los países pioneros en desalinización de agua del mar. En este país 4 de cada 5 litros que se consumen provienen de plantas desalinizadoras. Los siguientes países en la lista son los Emiratos Árabes, Libia, Kuwait, Qatar, Estados Unidos, Japón y España [4].

La desalinizadora más grande del mundo es la de Sorek, ubicada cerca de Tel Aviv, en Israel. Se inauguró en 2013 y tiene una capacidad de 324 000 m³/día [4].

La desaladora más grande de Europa se encuentra en Torrevieja, Alicante. Aún no está en funcionamiento, pero utilizará un proceso de osmosis inversa y llegará a producir 240 000 m³/día, de los cuales la mitad serán destinados a riego y la otra mitad para consumo de los municipios de Murcia y Alicante [4].

1.2.2. Desalinización en Arabia Saudí y Jeddah.

Debido al aumento de población y a las pocas precipitaciones que hay en la península arábiga, no hay reservas de acuíferos, las alternativas a una Planta Desaladora son casi inexistentes.

Se debe tener en cuenta que en la península arábiga existen 27 plantas desaladoras, 6 de las cuales se encuentran en la costa este de la península y 21 en la costa del mar Rojo. Estas 27 plantas de desalinización obtienen 3.3 millones de m³/día y se dividen en 3 tipos:

- 12 plantas de destilación súbita de múltiples etapas (MSF)
- 7 plantas de destilación multi-efecto (MED)
- 8 plantas de osmosis inversa (RO)

En la ciudad de Jeddah podemos encontrar dos plantas desaladoras y la próxima construcción de la tercera (Shuaiba III), las cuales funcionan con energías derivadas del petróleo, para abastecer a La Meca, Jeddah, Taif y Al-Baha.

1.3. Métodos de desalinización y justificación de la elección.

Seguidamente, se detallarán los distintos tipos de plantas desaladoras que se pueden encontrar y cuál será la elección para la realización de este proyecto.

1.3.1. *Destilación súbita por efecto flash (destilación Multietapa Súbita Flash).*

La destilación MSF necesita mucha energía, tanto eléctrica como térmica. El proceso calienta el agua, formando vapor a baja presión (1 a 3 bares), lo que hace que la evaporación sea súbita. Este proceso se repite durante una serie de etapas en las que la presión va disminuyendo según las distintas secciones de la unidad [5].

Está indicado para aguas con alta salinidad, altas temperaturas y contaminación. La capacidad de estas plantas desaladoras es mayor que la de otras plantas, pero su consumo de energía es de los más grandes de todos los procesos conocidos. Este proceso es el más utilizado sobre todo en Oriente Medio, ya que poseen grandes cantidades de petróleo, y así obtienen energía barata.

Se necesita energía eléctrica para las diversas bombas de la unidad tales como reciclaje, agua de enfriamiento, producto destilado, soplado de salmuera, condensado y bombas de dosificación química [5].

Este método de desalación tiene un rango caldeo de 10 000 a 35 000 m³/día y consiste en reducir súbitamente la presión del agua de mar, por debajo de su presión de vapor, produciéndose una evaporación súbita o ebullición explosiva de la misma. Como solo se evapora una pequeña parte del agua, hay que repetir la operación de forma sucesiva, reduciendo la presión sucesivamente. Normalmente se calienta previamente el agua de mar a la entrada, a temperatura de ebullición con el vapor de una fuente externa, en una cámara flash a través de un orificio de forma que provoca una caída de presión evaporando parte del agua salada [5].

Seguidamente el vapor producido se hace pasar a través de unas mallas (“demisters”) donde se quita parte de la salmuera. El vapor es condensado sobre una superficie de tubos que alimentan el agua de mar la planta, aprovechando el calor [5].

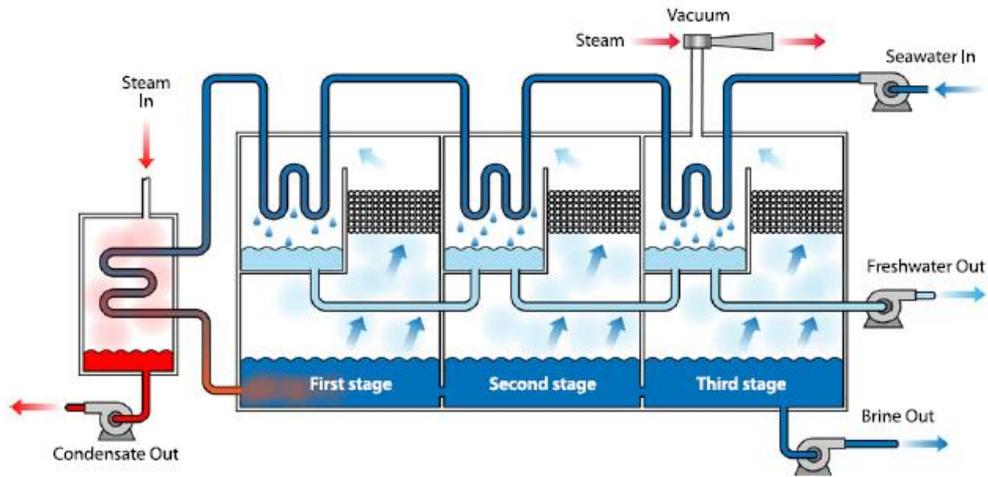


Figura 5. Diagrama del proceso MSF [5].

1.3.2. Destilación por Efecto Múltiple (MED).

El proceso MED consiste en pasar el agua a desalinizar por una serie de evaporadores. Utiliza el mismo proceso que el MFS. La principal diferencia radica en la forma en la que se evapora el agua, ya que en este proceso se usan varios evaporadores de película delgada (la evaporación transcurre en la cara del tubo del intercambiador, aprovechando el calor latente). De esta forma tiene mayor coeficiente de transferencia de calor que las plantas MFS [6].

Los evaporadores pueden ser: de tubo vertical con película ascendente, de tubo horizontal y vertical con película descendente, y de plato. Los evaporadores de plato están basados en el diseño de platos corrugados [6].

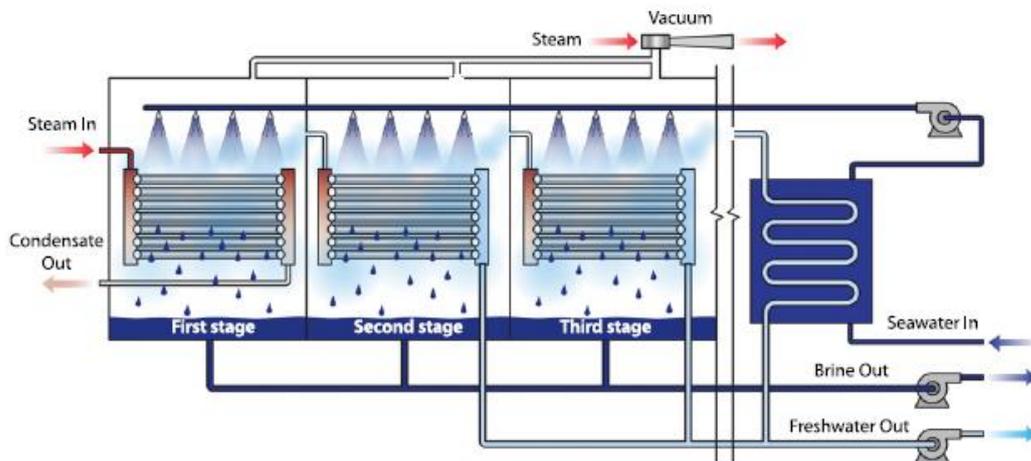


Figura 6. Diagrama del proceso MED [5].

1.3.4. Ósmosis inversa (RO).

La osmosis inversa (RO) es una forma de filtración a presión, en la cual el agua pasa por una membrana semipermeable que deja pasar el agua, pero no las sales.

El agua de mar entra al pretratamiento, en el cual se filtra, esteriliza y adicionan productos químicos para prevenir el ensuciamiento (fouling) de las membranas.

Seguidamente, se hace pasar el agua por una bomba de alta presión, que forzará el paso del agua a través de las membranas, pasando el agua producto (permeado) al post-tratamiento, donde se le ajustará el pH, se añadirá cloro y se equilibraran las sales necesarias para el consumo humano, según normativa.

Por otra parte, la salmuera pasará a una turbina para poder recuperar parte de la energía utilizada en la bomba a presión. A esta se adicionarán el agua de lavado de filtros y los productos de limpieza de las membranas para su posterior descarga en un punto lejos de la costa, diluyendo una proporción del vertido en cuatro de agua de alimentación de la planta (1:4), de esta forma afectará menos al medio marino.

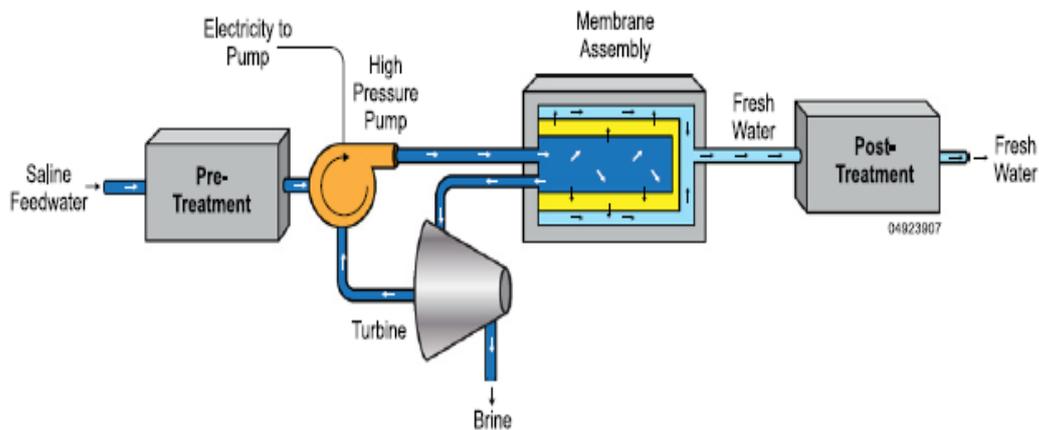


Figura 8. Diagrama del proceso RO [5].

1.3.5. Electrodialisis y reversión de electrodialisis (ED).

La electrodialisis (ED) está basada en el transporte de iones a través de membranas selectivas, mediante la influencia de un campo eléctrico. En una pila de electrodialisis convencional, se sitúan alternativamente membranas de intercambio aniónico y catiónico entre el ánodo y el cátodo. Cuando se aplica una diferencia de potencial entre ambos electrodos, los cationes se mueven hacia el cátodo y los aniones hacia el ánodo. Los cationes migran a través de las membranas de intercambio catiónicos (que tienen grupos negativos fijados) y son retenidos por las membranas de intercambio aniónico. Por otra parte los aniones migran a través de las membranas de intercambio aniónico (que tienen grupos positivos fijados) y son retenidos por las membranas de intercambio catiónico.

Estos movimientos producen el aumento en la concentración de iones en algunos compartimentos (celdas de concentración) y la disminución en los adyacentes (celdas de dilución).

La polaridad de la unidad de electrodialisis se conmuta periódicamente, invirtiendo el flujo, así aumenta la vida útil de los electrodos y ayuda a limpiar las membranas.

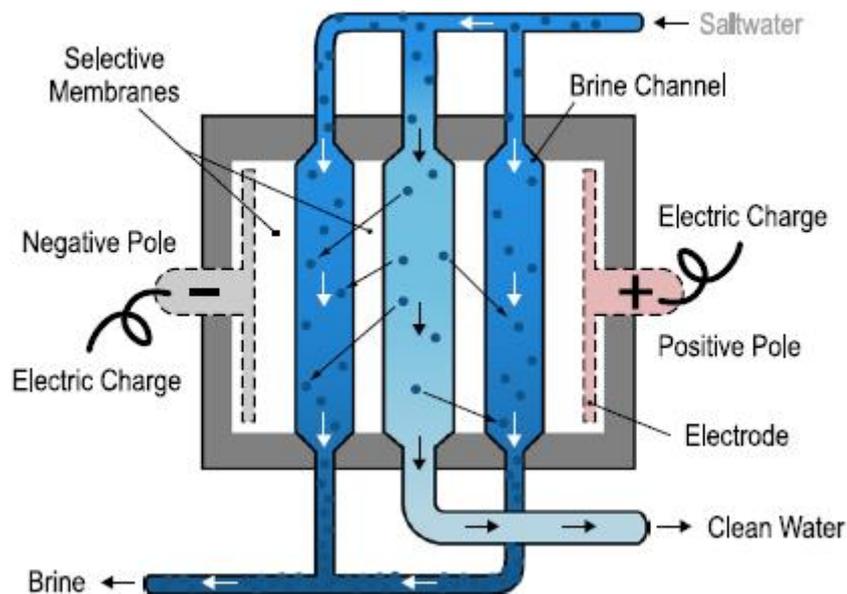


Figura 9. Diagrama del proceso ED[5].

1.3.6. Justificación de la elección.

Al necesitar una cantidad elevada de agua, solo se puede tener en cuenta los métodos de MSF, MED y osmosis inversa (RO).

En la planta desalinizadora que se va a diseñar, se optará por el sistema de osmosis inversa (RO). Este sistema permite una obtención elevada de agua y su consumo energético es bajo en relación a las otras dos posibilidades, por lo que se obtendrá un precio bajo por metro cubico de agua. A continuación se detallan las ventajas e inconvenientes del proceso seleccionado:

Como ventajas de este proceso:

- Consumo eléctrico menor que en los procesos de destilación.
- Es muy efectivo, creando agua de buena calidad para consumo.
- Es una solución efectiva para el problema de escasez de recursos hídricos.
- Los costes de inversión son inferiores.
- Es flexible en cuanto al tipo de cantidad y calidad del agua.
- Su estructura es modular.
- Tiene necesidades medias de espacio.

Por otra parte, también tiene una serie de inconvenientes:

- Requiere un buen pretratamiento del agua de alimento.
- Los costes de capital y operación son relativamente altos.
- Se necesitan presiones elevadas.
- Está limitada por la presencia de iones específicos.

2. Objetivo.

2.1. Objetivo general.

El objetivo de este proyecto consiste en diseñar una planta desaladora, para la obtención de agua apta para consumo humano y regadío, la cual tendrá un aporte de energía eléctrica por mediación de una instalación solar fotovoltaica (ISFV).

Esta planta será de osmosis inversa (RO) y se obtendrán 300 000m³/día de agua producto (permeado).

2.2. Objetivos particulares.

Los objetivos particulares del presente proyecto son:

- 1) Estudio de los diferentes métodos de desalinización de agua marina.
- 2) Descripción del proceso que seguirá la planta desaladora.
- 3) Posttratamiento del agua, para consumo humano.
- 4) Cálculo y diseño de los elementos que compondrán la planta.
- 5) Implantación de Instalación Solar Fotovoltaica (ISFV).
- 6) Estudio económico de la planta y del agua

3. Diseño de la planta desaladora.

3.1. Introducción del diseño.

El objetivo de este proyecto es alcanzar una producción de agua de 300 000 m³ al día de agua desalada. Por tanto, la planta desaladora trabajará en continuo, de forma que las membranas siempre se mantengan húmedas. Se podrá bajar la producción durante el invierno, cuando hay menos población, mientras se trabaje en continuo.

Se estimará el consumo medio por persona y día, para la población total de Arabia Saudí, ya que esta planta abastece a un conjunto de poblaciones, mediante camiones cuba y canalizaciones. En este caso se realizará el cálculo para aproximadamente un tercio de la población total de Jeddah, ya que esta población cuenta con 2 plantas de desalación y otra en obras.

Como en la península arábiga ya existen 27 plantas desalinizadoras de agua potable y teniendo en cuenta que el consumo de agua es de los más altos del mundo, ya que parte de este consumo por persona y día, se destina a cultivo, se calculará un caudal para 1 100 000 personas.

$$Q = 0.263 \text{ m}^3 / \text{per. por dia} \cdot 1\,100\,000 \text{ habitantes} = 289\,300 \text{ m}^3$$

Sobredimensionando el dato, se concluye que la planta tiene que alcanzar una producción de 300.000 m³.

Para el año 2020, el gobierno propuso un programa para restringir el consumo a 0,20 m³ por persona y día, y 0,15 m³ diarios para 2030.

3.2. Ubicación de la planta.

La planta desalinizadora se ubicará a las afueras de la población de Jeddah.

Para la nueva planta desaladora se debe tener en cuenta el cambio de obtención de energía para el funcionamiento de la misma a energía solar, disminuyendo así el consumo de petróleo para la generación de electricidad, y evitando así el daño a la atmósfera por la quema de los mismos.

Por tanto, ubicaremos la planta desaladora en la zona industrial de Jeddah, donde se encuentra un espacio suficientemente grande para la instalación (unos 70.000 m²). Este se encuentra cercano al Mar Rojo y lejos de los corales característicos de este mar.



Figura 10. Ubicación de la planta desaladora.

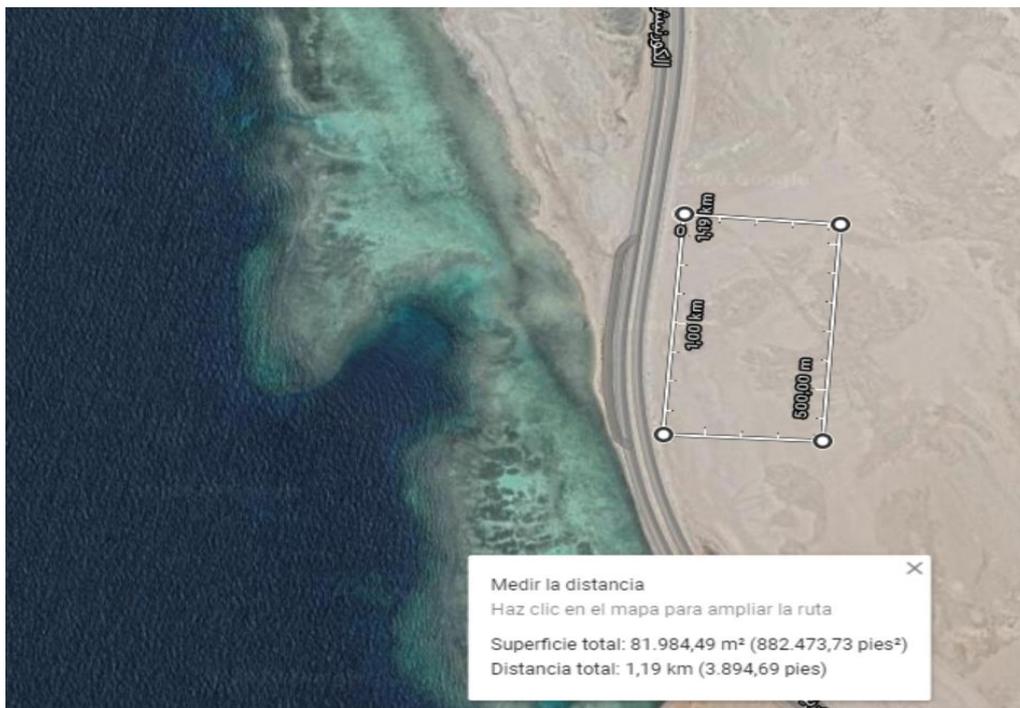


Figura 11. Ampliación de la ubicación de la planta desaladora [6].

El diseño de la planta se encuentra en el Anexo I, del presente proyecto.

3.3. Propiedades del agua del Mar Rojo.

3.3.1. Análisis del agua a la entrada.

El agua del Mar Rojo tiene un pH de 8, y su temperatura oscila entre los 25°C y los 31°C. En la siguiente tabla se puede observar los componentes que forman el agua de mar a la entrada de la planta.

Componente	Concentración Mar Rojo (mg/L)
Cloro (Cl ⁻)	22.219
Sodio (Na ⁺)	14.255
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	3.078
Magnesio (Mg ²⁺)	742
Calcio (Ca ²⁺)	225
Potasio (K ⁺)	210
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	146
Bromuro (Br ⁻)	72
Solidos Totales Disueltos(TDS)	41.000

Tabla 1. Composición del agua de mar en Jeddah [7].

3.3.2. Captación.

El método de captación de agua del mar elegido será un pozo playero convencional, ya que con este sistema el agua se filtra a través del terreno, lo que reduce la turbidez y contaminación del agua.

Así también, eliminaremos la actividad orgánica y biológica marina, la contaminación marítima y evitaremos el cambio brusco de temperatura del agua a la entrada de la planta desaladora.

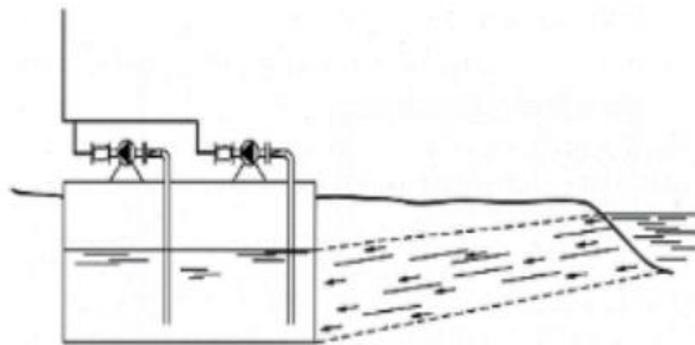


Figura 12. Imagen de captación por pozo playero [8].

Para calcular el caudal que se ha de captar para producir los 300 000 m³/d necesarios, se debe saber que la conversión que se obtiene utilizando el proceso de osmosis inversa se encuentra entre el 35-45%.

Para los cálculos se utilizará el valor más alto de conversión, para la obtención de los 300 000 m³/d, pudiendo variar para obtener menores cantidades de agua en épocas del año en las que se necesite menos agua.

A partir de la siguiente fórmula se obtiene el caudal de captación:

$$Q_c = \frac{Q_p}{R} \quad (1)$$

Siendo:

Q_c: Caudal de captación, m³/d

Q_p: Caudal de permeado, m³/d

R: Rendimiento, %

Se aplican los datos a la fórmula, se obtiene:

$$Q_c = \frac{300\,000}{0.45} = 666\,666.67 \text{ m}^3/\text{d}$$

Se deberá tener en cuenta para este tipo de captación, la realización de estudios previos de permeabilidad, las variaciones de la composición química del agua a lo largo del tiempo y la contaminación por nitratos, pesticidas, etc.

También es recomendable hacer un estudio hidrogeológico de la zona donde se construirá el pozo, con el fin de que el acuífero nos aporte la cantidad y calidad del agua necesaria, que no contenga sedimentos ni exista aportación de aguas salobres, de filtraciones no deseadas.

3.3.3. Pretratamiento.

Una vez se capta el agua, esta no tiene las condiciones óptimas para que pase por las membranas de ultrafiltración y osmosis inversa, por lo que las dañaría. Por tanto, se debe realizar un pretratamiento al agua con productos químicos, para prolongar la vida de las membranas y obtener una buena calidad de agua final.

A continuación, se puede observar un diagrama de bloques de las distintas fases de pretratamiento del agua, antes de su llegada a las membranas de osmosis inversa.

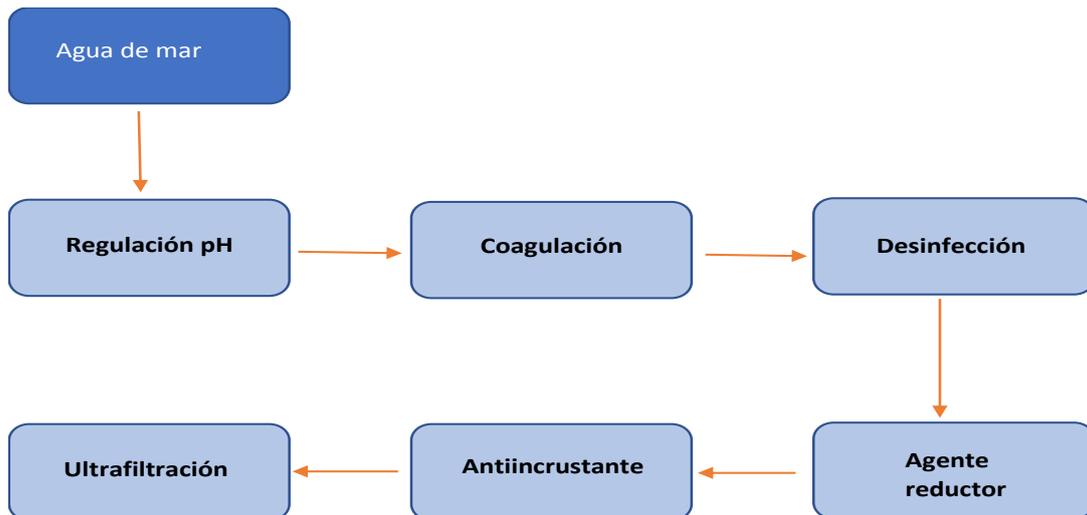


Figura 13. Diagrama de bloques del proceso de pretratamiento.

3.3.3.1. Regulación del pH.

Teniendo en cuenta que el Mar Rojo tiene un pH entre 7.5 y 8, y que el agua para consumo humano debe estar entre 6.5 y 7, se debe añadir al caudal ácido sulfúrico (H_2SO_4). El ácido sulfúrico es un compuesto altamente corrosivo. Generalmente se obtiene a partir del dióxido de azufre, por oxidación con otros óxidos de nitrógeno en disolución acuosa. [20]

Para calcular la dosis necesaria de reactivo y el tamaño del depósito para 15 días, tendremos en cuenta los siguientes datos:

Densidad (ρ)	1,83 g/cm ³
Riqueza (R)	98 %
Dosis máx. (Dmax)	20 mg/L
Caudal a tratar (Q)	27777,8 m ³ /h

Tabla 2. Datos del ácido sulfúrico.

$$\text{Caudal necesario} = \frac{Q \cdot D_{\max}}{\rho} \quad (2)$$

$$\text{Caudal necesario } (Q_N) = \frac{27\,777.8 \frac{m^3}{h} \cdot 20 \frac{mg}{l}}{1830 \frac{mg}{l}} = 303.58 \frac{l \text{ puros}}{h}$$

Como el ácido sulfúrico tiene una riqueza del 98%, se calcula la dosis de disolución que añadirá la bomba.

$$Dosis = \frac{Q_N}{Riqueza/100} \quad (3)$$

$$Dosis = \frac{303.58 \text{ l puros} \cdot 100 \text{ l disolución}}{98 \text{ l puros}} = 309.78 \text{ l/h}$$

Seguidamente, se calculará el volumen de ácido sulfúrico necesario durante 15 días para así saber el tamaño del tanque que se necesitará.

$$V_{tanque} = Dosis \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot n^{\circ} \text{ días} \quad (4)$$

$$V_{tanque} = 309.78 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot 15 \text{ d} = 111\,520.8 \text{ l}$$

Por último, calcularemos la cantidad anual de ácido sulfúrico:

$$V_{tanque} = Dosis \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{360 \text{ d}}{1 \text{ año}} \quad (5)$$

$$V_{anual} = 309.78 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{360 \text{ d}}{1 \text{ año}} = 2\,676\,499.2 \text{ l/año}$$

3.3.3.2. Coagulación.

El proceso de coagulación consiste en la adición de coloides para que generen una aglomeración de partículas pequeñas formando otras más grandes, y que así sea mejor su eliminación.

El coagulante que se utilizará es el cloruro de férrico (FeCl_3) y se dosificará en continuo mediante una bomba dosificadora. Como este compuesto genera acidez, también beneficiará la desinfección del agua a tratar.

Para calcular la dosis necesaria de reactivo y el tamaño del depósito para 15 días, tendremos en cuenta los siguientes datos:

Densidad (ρ)	1,38 g/cm ³
Riqueza (R)	40 %
Dosis máx. (Dmax)	2 mg/L
Caudal a tratar (Q)	27777,8 m ³ /h

Tabla 3. Datos del cloruro férrico.

$$\text{Caudal necesario} = \frac{Q \cdot D_{\max}}{\rho} \quad (2)$$

$$\text{Caudal necesario} = \frac{27\,777.8 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 2 \text{ mg}/\text{l}}{1380 \text{ mg}/\text{l}} = 40.26 \text{ l puros}/\text{h}$$

Como el cloruro férrico tiene una riqueza del 40%, se calcula la dosis de disolución que añadirá la bomba.

$$\text{Dosis} = \frac{Q_N}{\text{Riqueza}/100} \quad (3)$$

$$\text{Dosis} = \frac{40.26 \text{ l puros} \cdot 100 \text{ l disolución}}{40 \text{ l puros}} = 100.65 \text{ l}/\text{h}$$

Seguidamente, se calculará el volumen necesario durante 15 días para así saber el tamaño del tanque:

$$V_{\text{tanque}} = \text{Dosis} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot n^{\circ} \text{ días} \quad (4)$$

$$V_{\text{tanque}} = 100.65 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot 15 \text{ d} = 36\,234 \text{ l}$$

Por último, calcularemos la cantidad anual de cloruro férrico:

$$V_{\text{tanque}} = \text{Dosis} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{360 \text{ d}}{1 \text{ año}} \quad (5)$$

$$V_{\text{anual}} = 100.65 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{360 \text{ d}}{1 \text{ año}} = 869\,616 \text{ l}/\text{año}$$

3.3.3.3. Desinfección.

Seguidamente, se procede a la desinfección del agua para evitar el crecimiento de bacterias en las membranas, por lo que se añadirá hipoclorito de sodio (NaClO).

El hipoclorito de sodio es un compuesto fuertemente oxidante y económico. Contiene cloro en estado de oxidación +1, es un oxidante fuerte y económico. Por estas características se utiliza como desinfectante, además destruye muchos colorantes por lo que se utiliza como blanqueador. En disolución acuosa solo es estable a pH básico. Al acidular en presencia de cloruro libera cloro elemental que en condiciones normales se combina para formar el gas dicloro, que es tóxico. Por esto debe almacenarse alejado de cualquier ácido. Tampoco debe mezclarse con amoníaco, ya que puede formar cloramina, un gas muy tóxico [22].

Densidad (ρ)	1,2	g/cm ³
Riqueza (R)	15	%
Dosis máx. (Dmax)	5	mg/L
Caudal a tratar (Q)	27777,8	m ³ /h

Tabla 4. Datos del hipoclorito de sodio.

$$\text{Caudal necesario} = \frac{Q \cdot D_{\max}}{\rho} \quad (2)$$

$$\text{Caudal necesario} = \frac{27\,777.8 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 5 \text{ mg/l}}{1200 \text{ mg/l}} = 115.74 \text{ l puros/h}$$

Como el hipoclorito sódico tiene una riqueza del 15%, se calcula la dosis de disolución que se añadirá:

$$\text{Dosis} = \frac{Q_N}{\text{Riqueza}/100} \quad (3)$$

$$\text{Dosis} = \frac{115.74 \text{ l puros} \cdot 100 \text{ l disolución}}{15 \text{ l puros}} = 771.61 \text{ l/h}$$

Seguidamente, se calculará el volumen necesario durante 15 días para así saber el tamaño del tanque que se necesitará.

$$V_{\text{tanque}} = \text{Dosis} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot n^{\circ} \text{ días} \quad (4)$$

$$V_{\text{tanque}} = 771.61 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot 15 \text{ d} = 277\,779.6 \text{ l}$$

Por último, calcularemos la cantidad anual de:

$$V_{tanque} = Dosis \cdot \frac{24 h}{1 d} \cdot \frac{360 d}{1 año} \quad (5)$$

$$V_{anual} = 771.61 \frac{l}{h} \cdot \frac{24 h}{1 d} \cdot \frac{360 d}{1 año} = 6\,666\,671.4 \text{ l/año}$$

3.3.3.4. Agente reductor.

Debido a la presencia de cloro en la etapa anterior y que este puede dañar de forma irreversible las membranas de poliamida, será necesario reducirlo mediante bisulfito de sodio (NaHSO₃).

El bisulfito de sodio es una sal ácida muy inestable que al reaccionar con oxígeno se convierte en sulfato de sodio. Es un agente reductor que reducirá la cantidad de cloro y eliminará el oxígeno disuelto en el agua, para no dañar los sistemas de transporte de agua [23].

Densidad (ρ)	1345	g/cm ³
Riqueza (R)	38	%
Dosis máx. (Dmax)	10	mg/L
Caudal a tratar (Q)	27777,8	m ³ /h

Tabla 5. Datos del bisulfito de sodio.

$$Caudal\ necesario = \frac{Q \cdot D_{max}}{\rho} \quad (2)$$

$$Caudal\ necesario = \frac{27\,777.8 \text{ m}^3/h \cdot 10 \text{ mg/l}}{1345 \text{ mg/l}} = 206.53 \text{ l puros/h}$$

Como el bisulfito de sodio tiene una riqueza del 38%, se calcula la dosis de disolución que añadirá la bomba.

$$Dosis = \frac{Q_N}{Riqueza/100} \quad (3)$$

$$Dosis = \frac{206.53 \text{ l puros} \cdot 100 \text{ l disolución}}{38 \text{ l puros}} = 543.49 \text{ l/h}$$

Seguidamente, se calculará el volumen necesario durante 15 días para así saber el tamaño del tanque que se necesitará.

$$V_{tanque} = Dosis \cdot \frac{24 h}{1 d} \cdot n^{\circ} \text{ días} \quad (4)$$

$$V_{tanque} = 543.49 \frac{l}{h} \cdot \frac{24 h}{1 d} \cdot 15 d = 195\,656.4 l$$

Por último, calcularemos la cantidad anual de:

$$V_{tanque} = Dosis \cdot \frac{24 h}{1 d} \cdot \frac{360 d}{1 \text{ año}} \quad (5)$$

$$V_{anual} = 543.49 \frac{l}{h} \cdot \frac{24 h}{1 d} \cdot \frac{360 d}{1 \text{ año}} = 4\,695\,753.6 l/\text{año}$$

3.3.3.5. Antiincrustante.

Finalmente, debemos añadir HMP, para prevenir el ensuciamiento de membranas debido a la formación de incrustaciones, deteniendo así el proceso de precipitación y el crecimiento de cristales de sal.

Densidad (ρ)	2,58	g/cm ³
Riqueza (R)	40	%
Dosis máx. (Dmax)	1,5	mg/L
Caudal a tratar (Q)	27777,8	m ³ /h

Tabla 6. Datos del hexametáfosfato de sodio.

$$\text{Caudal necesario} = \frac{Q \cdot D_{max}}{\rho} \quad (2)$$

$$\text{Caudal necesario} = \frac{27\,777.8 \text{ m}^3/h \cdot 1.5 \text{ mg/l}}{2\,580 \text{ mg/l}} = 16.15 l \text{ puros}/h$$

Como el HMP tiene una riqueza del 38%, se calcula la dosis de disolución que añadirá la bomba.

$$Dosis = \frac{Q_N}{\text{Riqueza}/100} \quad (3)$$

$$Dosis = \frac{16.15 \text{ l puros} \cdot 100 \text{ l disolución}}{40 \text{ l puros}} = 40.38 \text{ l/h}$$

Seguidamente, se calculará el volumen necesario durante 15 días para así saber el tamaño del tanque que se necesitará.

$$V_{tanque} = Dosis \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot n^{\circ} \text{ días} \quad (4)$$

$$V_{tanque} = 40.38 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot 15 \text{ d} = 14\,536.8 \text{ l}$$

Por último, calcularemos la cantidad anual de:

$$V_{tanque} = Dosis \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{360 \text{ d}}{1 \text{ año}} \quad (5)$$

$$V_{anual} = 40.38 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{360 \text{ d}}{1 \text{ año}} = 348\,883.2 \text{ l/año}$$

3.3.3.6. Ultrafiltración.

El proceso de ultrafiltración utiliza la presión del agua de entrada del pretratamiento para forzar el paso del agua a través de una membrana semipermeable. Este tipo de membranas pueden eliminar partículas muy pequeñas, tales como bacterias, sedimentos, solutos de alto peso molécula, organismos resistentes al cloro y otros sólidos en suspensión.

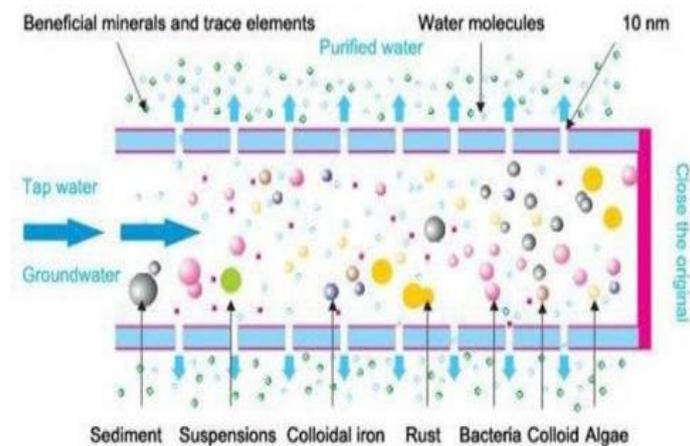


Figura 14. Funcionamiento de los filtros de ultrafiltración.



Figura 15. Filtro ultrafiltración industrial.

La ultrafiltración tiene un amplio campo de aplicación, en procesos donde es necesaria un agua de excelente calidad y también es parte fundamental de separaciones de emulsiones alimenticias como pueden ser: quesos, sueros, recuperación de almidón, clarificación de zumos, vinos y cerveza, etc.

El proceso de ultrafiltración no deja pasar partículas mayores de $0.1 \mu\text{m}$, por tanto, antes de entrar en las membranas el agua, colocaremos filtros de ultrafiltración HYDRAcap MAX. Con estos filtros evitaremos que entren partículas, minimizando el daño que estas puedan causar a la membrana, y alargando la vida útil de la misma. El agua entrará en las membranas a una presión máxima de 4 bares y requerirá de 1 a 3 limpiezas diarias de entre 23-30 min, como se indica en la hora de especificaciones el Anexo I.

3.4. Osmosis inversa.

El proceso de osmosis inversa consiste en impulsar agua de mar bruta por medio de bombas de alta presión. Estas bombas se utilizan para forzar el paso del agua de mar a través de las membranas selectivas, dejando las sales en una corriente concentrada.

Por un lado se obtiene el agua producto (permeado), que es el agua que atraviesa las membranas y no contiene sales, y por otro lado la salmuera o rechazo, que contiene una elevada cantidad de sales, las cuales no atraviesan la membrana.

El sistema de osmosis inversa (RO) se realizará con el programa "IMS Design", cuyas siglas significan "Integrated Membrane Solutions", que pertenece a la empresa HYDRANAUTICS del grupo Nitto. Esta empresa es líder en la fabricación de productos de membrana de alto rendimiento, Anexo II.

3.4.1. Consideraciones del diseño.

El proceso de osmosis se llevará a cabo en un solo paso y mediante una sola etapa. Para un caudal de permeado de 300 000 m³/día, sabiendo que el sistema de osmosis inversa solo convierte el 45% del caudal de entrada, este mismo debe ser de 666 666 m³/día. Para este caudal tan elevado se decide dividirlo en 5 trenes/líneas iguales entre sí, por lo que se detallará solo el diseño de una. Cada tren de permeado producirá 60 000 m³/día, por lo que su caudal de entrada será de 133 333.3 m³/día.

También se añadirá un sistema de recuperación de energía a la corriente de salmuera, con una eficiencia del 95-98%.

Los datos del agua que se utilizarán son los siguientes:



Figura 16. Análisis y captación en IMS Design [9].

3.4.2. Simulación en IMS Design

Como parámetros de diseño se tendrá en cuenta que el agua de entrada a las membranas debe tener un pH de 6.5, el cual se conseguirá en el pretratamiento con la adición de ácido sulfúrico. Para la simulación se pondrá como edad de la membrana 3 años, ya que estas son cambiadas a los 6-7 años, por tanto, realizamos un promedio.

Al ejecutar el programa IMS Design, se obtienen los datos que se pueden observar en la figura inferior (figura 15), en los cuales encontramos la concentración de permeado, la saturación del rechazo y sus parámetros, y los cálculos del sistema de recuperación de energía.

El permeado quedaría con una cantidad de solidos totales disueltos (TDS) inferior a 300ppm según la OMS.

Proyecto: Desaladora Jeddah Calculado por: Beatriz Temperatura: 25.0 °C Tipo de agua: Mar Pozo Convencional Fecha: 02/06/2020

Trenes		Paso1		Paso1	
pH alimentación		6,50		Producto químico	H2SO4
Conversión	%	45,00		Concentración de la solución,%	98
Flujo/tren de permeado,	m3/d	60000,0		Tasa de dosificación de productos químic	mg/l
Flujo promedio	lmh	12,5		Edad membrana	años
Caudal de alimentación,	m3/d	133333,3		Disminución Fluj por año	5,00
Caudal de rechazo	m3/d	73333,3		Pérdida de flujo, %	14,3
				Incremento de paso de sales/año, %	7,0

Resultados de Cálculo		(Flows are per vessel)						
Arreglo	Tubo de presión	Alimentación (bar)	Conc (bar)	Alimentación (m3/h)	Conc (m3/h)	Flujo (lmh)	Flujo máximo	Beta máximo
1-1	700	65,6	64,5	7,94	4,37	12,4	24,6	1,05

Concentración de permeado	
Calcio	0,305
Mg	1,006
Na	92,648
K	1,705
NH4	0,000
Ba	0,000
Sr	0,000
HCO3	1,564
SO4	4,992
Cl	142,945
NO3	0,000
F	0,000
Br	0,602
PO4	0,000
SiO2	0,000
B	0,000
S	0,000
CO2	20,944
CO3	0,000
pH	5,1
TDS	245,77 mg/l

Saturaciones del rechazo y parámetros	
CaSO4, %	27
BaSO4, %	0
Ca3(PO4)2	0,00
Si	0,00
SrSO4, %	0
SiO2, %	0
CaF2, %	0
Presión osmotica	56,6 bar
CCPP	34,85 mg/l
pH	6,9
TDS	76333,1 mg/l

Sistema	
Caudal total de permeado/Planta	m3/d 300000,00
Número de trenes	5

Cálculos ERD	
Intercambiador de presión	Turbo
Fuga	1,00 %
Mezcla volumétrica	6,00 %
H.P. diferencial	1,40 bar
Bomba booster	2,57 bar

Figura 17. Cálculo de membranas y recirculación energía [9].

Seguidamente, se puede observar el diagrama del montaje de un tren/línea:

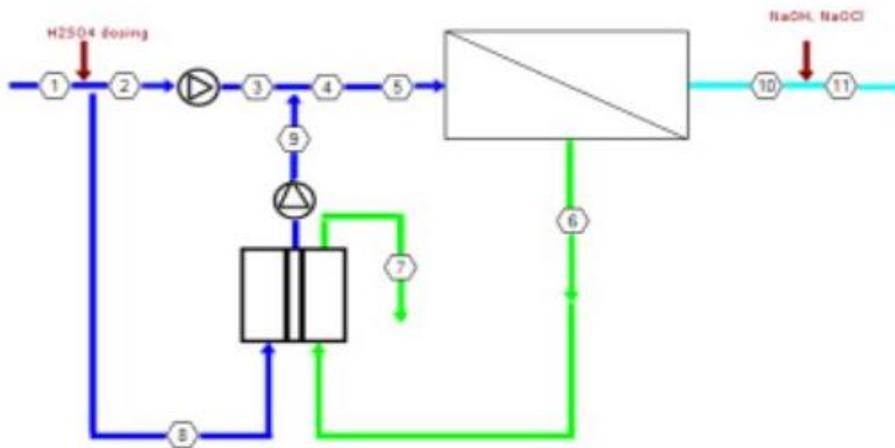


Figura 18. Diagrama del proceso [9].

Los principales parámetros obtenidos son los siguientes:

Caudal de entrada	666.666 m ³ /d
Caudal de permeado	300.000 m ³ /d
Líneas de tratamiento	5
Membranas	SWC4 MAX
Flujo promedio	12.4 Lmh
Total membranas	5600 ud
Tubos por bastidor	700
Temperatura agua alimentación	25 °C
pH del agua de alimentación	6.5

Tabla 7. Parámetros obtenidos en el IMS Design

3.4.3. Sistema ERD.

Al tener un alto consumo energético, se hace necesario instalar un recuperador de energía. Como se ha comentado anteriormente, se instalará un sistema de acumulación y restauración de presión en cámara.

En este caso usaremos turbochargers ERI o FEDCO, los cuales utilizan la corriente de concentrado para proporcionar presión a la bomba de alimentación, ahorrando energía. Se calculará el número necesario de recuperadores de energía a partir del programa que facilita la empresa que los fabrica, "Energy Recovery Inc." (ERI).

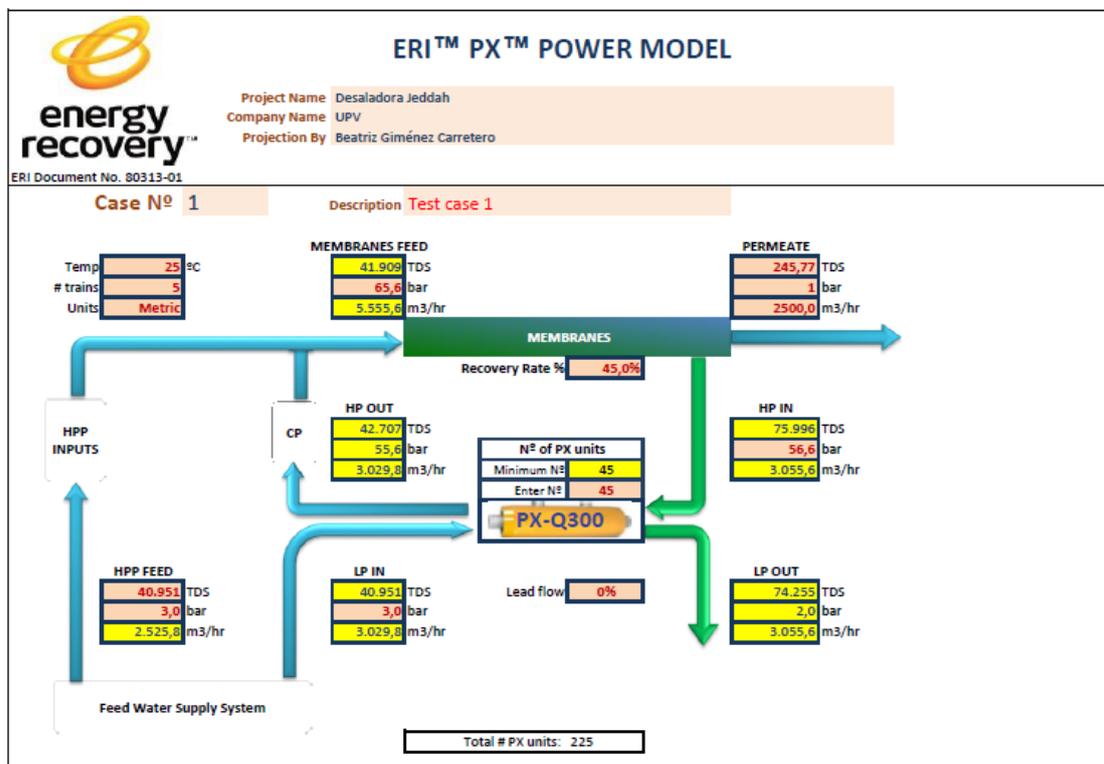


Figura 19. Simulación del programa ERI.

Como se puede observar en la imagen, se utilizará el intercambiador de presión "PX-Q300" y se necesitarán 50 para cada tren.

3.4.4. Limpieza de membranas.

Como se cita en apartados anteriores, las membranas de osmosis inversa son muy frágiles y al filtrar se produce un ensuciamiento (fouling) de las mismas. Este ensuciamiento, a lo largo del tiempo se traduce en un descenso gradual del flujo de permeado y de la salmuera. Este proceso termina originando una gran pérdida de productividad, por lo que tiene una influencia negativa en la economía de la planta [9].

Las principales causas de ensuciamiento son la abundancia de coloides, iones inorgánicos y material biológico en el agua de mar. Estos son capaces de superar los pretratamientos y depositarse en el interior de la membrana [9].

La compleja eliminación de depósitos de materia orgánica, coloides e incrustaciones salinas obliga a limpiezas periódicas, con el fin de mantener las mejores condiciones de funcionamiento. Se considera necesaria una limpieza cuando el flujo de permeado disminuye entre un 10 y un 15%, una disminución del 10% en la corriente de rechazo o un aumento del 15% en la presión diferencial [9].

Por la complejidad de la suciedad depositada, la limpieza se consigue mediante soluciones compuestas por mezclas de agentes limpiadores y diferentes secuencias de lavados. Como estrategia de limpieza se utilizan varios tipos y concentraciones de agentes limpiadores, el orden y la duración de las etapas de limpieza y los parámetros de operación del sistema durante el proceso [9].

Por precaución, se limpiarán las membranas una vez al año, evitando así en los primeros años los agentes limpiadores, haciendo pasar el agua en sentido inverso para eliminar las posibles incrustaciones.

3.5. Post-tratamiento.

En este punto debemos de aplicar un post-tratamiento tanto al caudal de permeado como al de salmuera.

Para el caudal de permeado debemos aplicar un post-tratamiento, ya que tras su paso por las membranas de osmosis inversa, el agua no tiene ninguna sal y sería perjudicial para los seres vivos. El agua desalada es corrosiva debido a su pH bajo y a la ausencia de las cualidades amortiguadoras que tienen las especies carbónicas [13].

Por tanto, para que sea apta para el consumo humano debemos aplicar un sistema de remineralización con el objetivo de aumentar su dureza cálcica, con CaCO_3 y CO_2 [13].

Seguidamente aplicaremos una adición de Cl_2 que eliminará el material biológico que haya podido pasar por las membranas, ajustando la misma a los estándares de agua potable requeridos por el servicio público.

Dichos estándares, según la Organización Mundial de la Salud son [10]:

- Aluminio < 0.1-0.2 mg/L
- Cloruros entre 200 y 300mg/L
- pH entre 6.5 y 8.5
- Turbidez: 1NTU
- Sulfuro entre 200 y 300mg/L
- TDS < 1000 mg/L
- Boro < 1 mg/L
- Conductividad < 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Para remineralizar la corriente de permeado se instalará un lecho de calcita con dosificación de dióxido de carbono, siendo económico y con muy buenos resultados.

3.5.1. Lecho de calcita.

El lecho de calcita tiene una celda llena de carbonato cálcico, a través del cual se hace pasar el agua de permeado. Esta agua entra por la parte inferior y atraviesa el lecho de carbonato cálcico, finalmente sale por la parte superior. Estas celdas llevan un sistema, el cual rellena automáticamente el lecho a medida que este se consume. Este sistema no necesita bombas de presión para su funcionamiento, ya que el agua de permeado tiene una presión residual con la que se impulsa [11].



Figura 20. Lecho de calcita con disolvente de CO_2 [11].

Este proceso permite cumplir con la normativa para el agua de consumo. Por una parte incrementa el pH, aumenta la concentración de calcio y de bicarbonato. También se le añade una corriente de CO_2 [11].

3.5.1.1. Dosificación de CO₂.

Al añadir CO₂ y carbonato cálcico, el agua disuelve solamente el reactivo necesario, por tanto no existe riesgo.

Seguidamente, se calculan los reactivos necesarios para el caudal de permeado de la planta sabiendo que la cantidad de carbonato cálcico necesario esta entre 60 y 100mg/L, por lo que se calculará como una dosis promedio de 80mg/L.

$$Q_P = 300\,000 \text{ m}^3/\text{día} = 12\,500 \text{ m}^3/\text{h}$$

El flujo másico de carbonato cálcico será:

$$\text{Flujo másico CaCO}_3 = \text{Dosis promedio} \cdot Q_P \quad (6)$$

Siendo:

Flujo másico, kg/h

Dosis promedio, Kg/m³

QP: Caudal permeado, m³/h

Se sustituye en la formula superior:

$$\text{Flujo másico CaCO}_3 = 80 \cdot 10^{-3} \cdot 12\,500 = 1\,000 \text{ kg/h}$$

Por cada mol de carbonato cálcico se utiliza un mol de dióxido de carbono, así que a partir de sus pesos moleculares se puede calcular la cantidad necesaria de dióxido de carbono que se ha de dosificar:

$$\text{Flujo másico CO}_2 = \frac{\text{Flujo másico CaCO}_3 \cdot \text{peso molecular CO}_2}{\text{peso molecular CaCO}_3} \quad (7)$$

Si se sustituyen los datos de la formula superior obtenemos:

$$\text{Flujo másico CO}_2 = \frac{1\,000 \cdot 44}{100} = 440 \text{ kg/h}$$

3.5.1.2. Diseño de los lechos de calcita.

Seguidamente se calculará el número de lechos y la altura, considerando los siguientes datos:

- $Q_P = 300\,000 \text{ m}^3/\text{día} = 12\,500 \text{ m}^3/\text{h}$
- Velocidad de filtrado (v_f) = entre 8 y 30 m/h (se utilizará el más limitante).
- Superficie unitaria de cada lecho (S_u)= 3m² (para unos filtros de 7x1).
- Tiempo de contacto = entre 8 y 12 min (se utilizará el más limitante).

El estado más limitante se dará con el caudal máximo, con una velocidad de filtración de 30m/h y el tiempo de contacto también será el máximo, 12 min. Seguidamente se calculará la superficie filtrante (SF):

$$S_F = \frac{Q_P}{v_f} \quad (8)$$

Sustituyendo:

$$S_F = \frac{12\,500}{30} = 416.67m^2$$

Con lo que se calcula el número de lechos:

$$N^{\circ} \text{ lechos} = \frac{S_F}{S_U} = 59.52 \approx 60 \text{ lechos} \quad (9)$$

Finalmente, se calcula la altura de cada lecho:

$$H = v_f \cdot \text{tiempo contacto} \quad (10)$$

$$H = 30 \cdot 0.2 = 6 \text{ m}$$

3.6. Vertido de salmuera.

En el Mar Rojo se pueden encontrar especies de corales y fauna única de la zona. En cuanto a la salmuera, se verterá en un tanque en el cual también se verterán todas las aguas de lavado químico utilizadas en planta, neutralizándose, para así minimizar el impacto sobre el fondo marino.

Por lo tanto, se realizarán una serie de acanaladuras en la tubería, una vez dentro del agua, cada 2m para una mayor dispersión de la salmuera. De esta forma se reducirá el impacto ambiental sobre la flora y fauna marina.

3.7. Bombas y conducciones.

3.7.1. Materiales.

Los materiales que se utilizarán deben tener unas características muy específicas [12]:

- Las conducciones marinas deben ser construidas con materiales que resistan la corrosión y cuyas propiedades no disminuyan al entrar en contacto con el agua salada
- Los materiales de la planta deben tener propiedades mecánicas específicas. En el caso de las conducciones, la dureza es buena propiedad mecánica.

Históricamente, se han empleado diferentes materiales para la ejecución de conducciones submarinas: hormigón, poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), acero, polietileno de alta densidad (PEAD), fundición, etc. A continuación nos centraremos en los que vamos a usar [12].

3.7.1.1. Polietileno de alta densidad (PEAD).

Se utilizará el polietileno de alta densidad en la conducción del pozo de captación a la planta y en la corriente de salmuera que sale de la planta al mar.

Este material es resistente a la corrosión, incluso mejor que el acero o fundición. También tiene baja rugosidad, es ligero y permite uniones con diferentes sistemas (soldaduras, uniones metálicas, bridas...).

3.7.1.2. Poliéster reforzado con fibras de vidrio (PRFV)

Se utilizará poliéster reforzado con fibras de vidrio dentro de la planta, ya que esta soporta muy bien las altas presiones, tiene alta resistencia a la corrosión y soporta bien tanto las fuerzas de compresión como de tracción.

También posee mucha estabilidad a la temperatura, la radiación UV, es ignífugo, respetuoso con el medio ambiente, altamente duradero y tiene una larga vida útil.

3.7.2. Explicación del proceso de cálculo.

Seguidamente calcularemos la sección y diámetro de las tuberías:

$$Sección = \frac{Q}{v} \quad (11)$$

En donde:

Sección, m²

Q: Caudal a tratar, m³/h

v: Velocidad del agua, m³/h

D: Diámetro, m

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Sección}{\pi}} \quad (12)$$

Para calcular la potencia de las bombas se necesita la siguiente ecuación:

$$P = \frac{Q \cdot H \cdot \rho}{367 \cdot \eta_b} \quad (13)$$

Además, se tendrá en cuenta que el rendimiento de los motores es de un 95%:

$$P_R = \frac{P}{\eta_m} \quad (14)$$

En donde:

P: Potencia de la bomba, kW

PR: Potencia a suministrar a la bomba, kW

Q: Caudal de agua a bombear, m³/h

H: Altura manométrica, m

ρ: Densidad, kg/m³; para el agua de mar *ρ*=1.033 kg/m³

η_b: Rendimiento de la bomba; en este caso 87%

η_m: Rendimiento del motor; en este caso 95%

De la ecuación de cálculo de potencia de las bombas solo falta conocer la altura manométrica (H). Ya que se conoce la densidad del agua de mar, y el rendimiento de la bomba es de un 87%, se procede a calcular la altura manométrica con la siguiente ecuación.

$$H = \Delta Z + \sum F \cdot \Delta P \quad (15)$$

En donde:

H: Altura manométrica, m

ΔZ: Diferencia de cotas, m

ΣF: Sumatorio de pérdidas de carga, m

ΔP: Diferencia de presión, m

El sumatorio de pérdidas de carga, se calcula sumando todas las pérdidas de carga debidas a equipos y a la circulación por conducciones. Para este cálculo se utilizará la ecuación de Fanning:

$$\sum F = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot D \cdot g} \quad (16)$$

En donde:

ΣF: Sumatorio de pérdidas de carga, m

f: Coeficiente de rozamiento

L: Longitud, m

v: Velocidad, m/s

D: Diámetro, m

g: Gravedad, m/s²

Seguidamente calcularemos el coeficiente de rozamiento con la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{K/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (17)$$

En donde:

f: Coeficiente de rozamiento

K: Rugosidad del material, m

D: Diámetro, m

Re: Número de Reynolds

Finalmente calcularemos el número de Reynolds con la siguiente formula:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (18)$$

En donde:

Re: Número de Reynolds

v: Velocidad máxima, m/s

ρ : Densidad del agua, kg/m³; para el agua de mar $\rho = 1\,033$ kg/m³

D: Diámetro, m

μ : Viscosidad, kg/m·s; para el agua de mar 0.001 kg/m·s

Todos los cálculos, se pueden encontrar realizados en Matlab en el Anexo II del presente proyecto.

Finalmente, se calcula todo en el Anexo II y obtenemos los datos que se detallan en la siguiente tabla resumen de las bombas necesarias para la planta:

Tipos de bomba	Caudal (m3/h)	Nº bombas	Consumo (kW)
Bombas de captación	27777,8	6+2	11865,72
Bombas de alta presión	12500	5+2	27582,5
Bomba Booster	15277,8	5+2	5823,15
Bombas de contralavado UF	12500	3+1	5183,41
Bombas de agua producto	12500	1+1	1295,22
Consumo total			51750

Tabla 8. Tabla resumen de las bombas necesarias.



High-pressure pump Multitec-RO

Figura 21. Bomba de alta presión [14].



Figura 22. Bomba booster [15].



Figura 23. Bomba de captación [16].

3.8. Tanques.

3.8.1. Tanque de captación.

Este tanque se instalará aguas arriba de la planta. A partir del mismo se abastecerá de agua a la planta, pasando de este tanque al pretratamiento. Para calcular el volumen del tanque a instalar, se calculará como un 10% del caudal necesario del bombeo a planta:

$$V = Q_c \cdot 0.10 \quad (19)$$

En donde:

Q_c : Caudal de captación, m^3/h

V : Volumen, m^3

Sustituyendo:

$$V = 27\,777.8 \cdot 0.10 = 2\,777.8 \, m^3$$

El volumen del tanque se sobredimensionará, instalando un tanque de volumen de 3 000 m^3 .

3.8.2. Tanque de agua producto.

Este tanque será para el almacenamiento del agua una vez ya haya sido tratada y se pueda bombear tanto al sistema de abastecimiento como para llenar camiones cuba. Para calcular el volumen del tanque a instalar, se calculará como un 10% de la producción total de la planta, por lo que la ecuación a aplicar será la siguiente:

$$V = Q_p \cdot 0.10 \quad (19)$$

En donde:

Q_p : Caudal de agua producto, m^3/d

V : Volumen, m^3

Sustituyendo:

$$V = 300\,000 \cdot 0.10 = 30\,000 \, m^3$$

Este tanque tiene que disponer de un filtro de aire de partículas de alta eficiencia (HEPA), para evitar que las partículas del aire contaminen el agua del interior del tanque.

3.8.3. Tanque de neutralización.

En este tanque se diluirá la corriente de salmuera con los productos químicos de las distintas limpiezas, con el fin de minimizar el impacto sobre el fondo marino. Para calcular el volumen del tanque a instalar, se calculará como un 10% del caudal necesario. Por lo que la ecuación a aplicar será la siguiente:

$$V = Q_c \cdot 0.10 \quad (19)$$

En donde:

V : Volumen, m^3

Q : Caudal del lavado, m^3/h ; $Q = Q_{UF} + Q_{sal}$

$Q_{UF} = (27\,777.8 \, m^3/h \cdot 30 \, min) / 60 \, min = 13\,888.9 \, m^3$

$Q_{sal} = 27\,777.8 \, m^3/h \cdot 0.55 = 15\,277.79 \, m^3/h$

Sustituyendo:

$$Q = 13\,888.9 + 15\,277.79 = 29\,166.69 \, m^3/h$$

$$V = 29\,166.69 \cdot 0.10 = 2\,916.67 \, m^3$$

El volumen del tanque se sobredimensionará, instalando un tanque de volumen de 3 000 m^3 .

3.8.4. Tanque intermedio.

El tanque intermedio, estará situado después de la membrana de ultrafiltración, y antes del sistema de osmosis inversa. Este tanque se utilizará para desviar una pequeña porción de agua para la limpieza del sistema de ultrafiltración y para abastecer el sistema de osmosis inversa. Se colocará un filtro de aire de partículas de alta eficiencia (HEPA), para así evitar la contaminación del agua en este punto, por cualquier partícula que pueda llevar el aire.

Para calcular el volumen del tanque a instalar, se calculará como un 10% del caudal necesario. Por lo que la ecuación a aplicar será la siguiente:

$$V = Q_c \cdot 0.10 \quad (19)$$

En donde:

V : Volumen, m^3

Q : Caudal del lavado, m^3/h ; $Q = Q_{UF} + Q_c$

$Q_{UF} = (27\,777.8 \, m^3/h \cdot 30 \, min) / 60 \, min = 13\,888.9 \, m^3$

Q_c : Caudal de captación, m^3/h

Sustituyendo:

$$Q = 13\,888.9 + 27\,777.8 = 41\,666.7 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V = 41\,666.7 \cdot 0.10 = 4\,166.67 \text{ m}^3$$

El volumen del tanque se sobredimensionará, instalando un tanque de volumen de 4 500 m³.

3.9. Diseño eléctrico de la Central Fotovoltaica.

Se instalará una central fotovoltaica con la que se cubrirán las necesidades de energía siguientes:

- Bombas de captación del agua de mar, con una potencia total aproximada de 12 000 kW.
- Bombas de agua producto, con una potencia total aproximada 1 300 kW.
- Oficinas de la Planta Desaladora, con una potencia total instalada de 100 kW.

Por lo tanto, la Central Fotovoltaica deberá de tener una capacidad de generación de energía de 13 400 kW.

Esta Central fotovoltaica se diseña como una instalación conectada a la red eléctrica. Debido a que realizar este tipo de instalaciones con una potencia tan elevada, resulta muy complicado realizar una instalación fotovoltaica aislada de la red eléctrica, por el elevado coste de los dispositivos de almacenaje de energía.

De tal forma que estas partes de la planta desaladora se abastecerán de energía renovable durante las horas de sol de la ISFV y de la red eléctrica el resto de las horas, por tanto, se reduce el consumo de energía producida con medios contaminantes.

3.9.1. Descripción y selección de los elementos de la Central Fotovoltaica

3.9.1.1. Módulos fotovoltaicos

Para la elección de los módulos fotovoltaicos a utilizar, se deben tener en cuenta varias consideraciones:

- Terreno a ocupar: debe estudiarse la cantidad de terreno de la que se dispone a la hora de dimensionar el campo de módulos fotovoltaicos, en nuestro caso, la situación del campo de módulos será sobre una superficie situada al lado de la planta Desaladora.
- Tecnología a utilizar: existen varios tipos de módulos fotovoltaicos dependiendo del tipo de célula solar del que estén compuestos (silicio monocristalino, silicio poli cristalino y silicio amorfo). Para el diseño de nuestra instalación se utilizarán paneles de tipo monocristalino que aunque son paneles más caros, su rendimiento es el más alto del mercado llegando hasta casi el 20%.

- Presupuesto: la última y más importante de todas, a la hora de diseñar este tipo de instalaciones, ya que este tipo de instalaciones tiene un coste alto y hay que comprobar cuál sería la amortización de la misma.

Con estas consideraciones hemos elegido el módulo fotovoltaico LR6-72PH 370M de LONGI SOLAR.

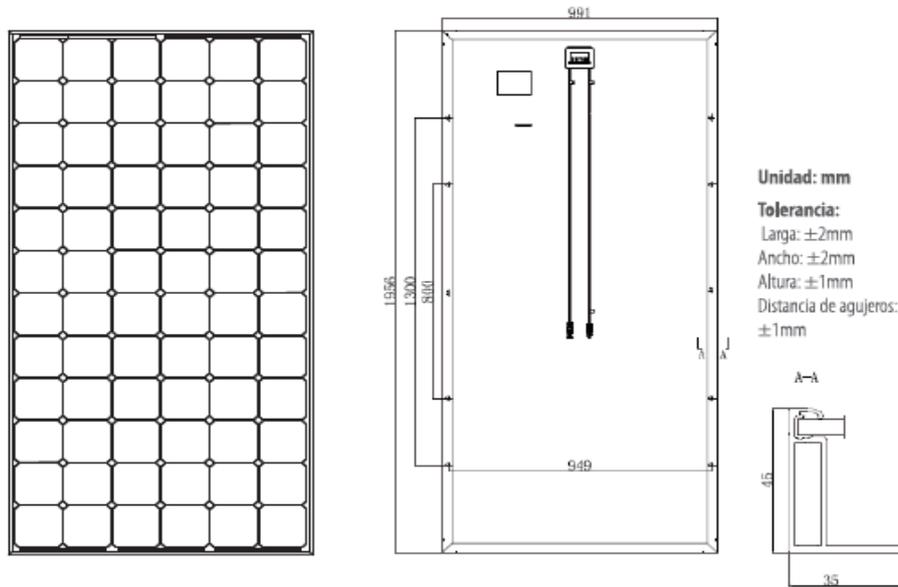


Figura 24. Módulo fotovoltaico [12].

LONGI SOLAR / LR6-72PH 370M	
Características eléctricas (STC: 1 kW/m², 25°C ±2°C y AM 1,5)	
Potencia máxima	370 W
Eficiencia del módulo (%)	19.1
Corriente pto. Max. Pot (Imp)	9.39 A
Tensión pto. Max. Pot. (Vmp)	39.4 V
Corr. en Cortocircuito (Isc)	6.48 A
Ten. de Circuito Abierto (Voc)	48.3 V
Tolerancia de Potencia	+3
Máxima serie de fusibles (A)	20
Máxima Tensión del Sistema	DC 1500 V
Características de temperatura	
Coeficiente de Temp. de Isc	0.057 %/°C
Coeficiente de Temp. de Voc	-0.286 %/°C
Coeficiente de Temp. de P	-0.380 %/°C
Temp. Func. Normal de la Célula	45±2°C
Temp. funcionamiento	-40°C a +85°C
Especificaciones mecánicas	
Dimensiones (mm ±2mm)	1956x991x45
Máx. carga estática, frontal	5400 Pa
Máx. carga estática, posterior	2400 Pa
Peso (+0,5kg)	26.5 kg
Materiales de construcción	
Células	Monocrystalina PERC
Cristal delantero	Templado ultra claro anti reflejante
Marco	Aleación de aluminio anodizado
Caja de conexiones	IP67
Cables	Cable solar 4mm ² 1 200mm
Conectores	MC4 compatible

Tabla 9. Características del módulo fotovoltaico LONGI SOLAR LR6-72PH 370M .

3.9.1.2. Inversor

El inversor constituye uno de los elementos más importantes en una instalación fotovoltaica, ya que permite transformar la energía eléctrica generada en los módulos fotovoltaicos en corriente continua (CC) a corriente alterna (CA) para poder conectarse a la red eléctrica.

A continuación detallamos las posibles formas con las que podemos integrar el inversor en nuestra instalación:

- Inversor central: se trata de un único inversor al que se conectan todas las ramas de los módulos fotovoltaicos, siendo por tanto la tensión de entrada la correspondiente a la tensión de cada serie y su corriente la correspondiente a la suma de las corrientes proporcionadas por cada rama.

- Múltiples inversores: se trata de una disposición en la que se cuenta con varios inversores de forma que una parte determinada de la instalación se conecta a un determinado inversor. Con ello se consigue no depender únicamente de un inversor, repartiendo la potencia total de la instalación en varios inversores. Esta disposición además permite en instalaciones grandes, poder tener zonas con diferentes niveles de irradiancia u orientación.
- Disposición maestro-esclavo: se trata de un concepto que busca como objetivo optimizar el rendimiento en el proceso de conversión de CC a CA. Para ello se disponen, múltiples inversores de menor potencia y se configura uno de ellos como maestro, siendo el resto esclavos. Así pues, en momentos de baja irradiancia como por ejemplo durante el amanecer, únicamente trabajará el inversor maestro, pudiendo lidiar con toda la potencia generada por la instalación en ese punto y por tanto, dado que se encontrará trabajando cerca del punto de potencia nominal del inversor, trabajará con un rendimiento muy alto. A medida que el día avanza y el nivel de irradiancia y por tanto de potencia generada aumenta, el inversor maestro ordenara entrar a trabajar en conjunto, siempre de forma que se disponga de rendimientos de conversión muy elevados.
- Inversores modulares: se trata de una disposición en la que cada módulo cuenta con su propio inversor de pequeña potencia, de forma que se independizan las condiciones de funcionamiento de cada módulo y se dota a la instalación de mayor estabilidad.

Una vez detalladas todas las posibilidades de instalación del inversor se debe seleccionar la forma de integrar el inversor en la instalación. Las desventajas de las configuraciones de Inversor Central y Maestro-Esclavo, es el hecho de que una posible avería en el inversor central o en el inversor maestro, implica la paralización completa de la instalación, lo cual no podría tolerarse.

La configuración de Inversores modulares se descarta debido a la potencia elevada de la instalación por lo tanto, se necesitaría instalar muchos puntos de conexión y cableado para poder centralizar toda la potencia hasta el transformador. Por eso finalmente se decide utilizar la configuración de Múltiples inversores, con una potencia elevada conectados en paralelo. En este caso se utilizarán tres estaciones de potencia modelo MW Power Station 5 000 SC-EV de la marca SMA, con las siguientes especificaciones:



Figura 25. Inversor fotovoltaico [13].

Datos Técnicos	MV Power Station 5000SC-EV
Entrada de CC	
Tensión de entrada máx.	1500 V
Rango de tensión MPP (a 25°C / a 50°C)	De 850 V a 1 425 V / 1 275 V
Número de entradas MPP independientes	2
Corriente máx. entrada (a 25°C / a 50°C)	2 x 3 000 A / 2 x 2 700 A
Número de entradas de CC	48
Tamaño fusibles disponibles	200 A, 250 A, 315 A, 350 A, 400 A
Salida (CA) lado de media tensión	
Potencia CA con $\cos\phi=1$ (a 25°C / a 50°C)	5 000 kVA / 4 500 kVA
Tensiones nominales CA	6.6 kV hasta 35 kV
Grupo de conexión del transformador	Dy11y11
Sistema refrigeración del transformador	Baño de aceite con refrig. forzada
Corriente máx. salida (a 33 kV)	88 A
Pérdidas en vacío del trafo (a 33 kV)	3.5 kW
Pérdidas de cortocircuito del trafo (a 33 kV)	40.5 kW
Coef. Distorsión máxima	< 3%
Factor de potencia a potencia asignada	1
Factor de desfase ajustable	0.8 inductivo a 0.8 capacitivo
Inversor de potencia	
Rendimiento máximo	98.4%
Tensión de salida del inversor	660 V
Dispositivo de desconexión en la entrada	Interruptor-seccionador CC
Punto de desconexión lado de salida	Interruptor de potencia de media
Protección contra sobretensión en CC	Descargador de sobretensión tipo I
Resistencia a arcos voltaicos	IAC 20 kA 1s
Datos generales	
Dimensiones del contenedor	12.2 m x 2.9 m x 2.4 m
Peso	< 26 T
Rango de temperatura de funcionamiento	-25°C a + 55°C
Autoconsumo (máx./carga parcial/avg)	< 16.2 kW / < 3.6 kW / < 4 kW
Autoconsumo (en espera)	< 600 W
Altitud máx. de funcionamiento	1 000 m
Equipamiento	
Conexión de CC	Terminal de anillo o barra colectora
Conexión CA, lado media tensión	Conector acodado de cono exterior
Protocolos de comunicación	Ethernet, Modbus

Tabla 10. Características técnicas de la estación de potencia MV Power Station 5000SC-EV de SMA.

3.9.1.3. Caja de conexiones

Las cajas de conexiones se utilizarán para realizar la conexión en paralelo de un conjunto de ramas de forma segura, mediante elementos de protección tales como fusibles e interruptores-seccionadores. Estos dispositivos también cuentan con un sistema de monitorización, que permite detectar avería y mejorar el rendimiento de la instalación. La caja de conexiones que utilizaremos es el modelo de String-Monitor SSM-U2415 de la marca SMA, con las siguientes características:

Datos Técnicos	SMA String-Monitor SSM-U2415
Carcasa	
Montaje exterior	En sombra
Características de combustión	Autoextinguible, libre de halógenos
Protección IP según IEC 60529	IP54
Resistencia rayos UV según IEC 61010-1	Sí
Datos mecánicos	
Anchura de la carcasa	600 mm
Altura de la carcasa incluyendo cables string	1 055 mm
Profundidad de la carcasa	30
Peso máximo según número de entradas	34 kg
Distancia mínima entre carcasa y suelo	800 mm
Datos eléctricos	
Tensión asignada	1 500VDC
Corriente asignada $I_{cc \text{ máx}}$ para 50°C	315 A
Corriente máxima por entrada de medición	17,5 A
Características de los fusibles	gPV integrados en el cableado
Número de entradas string	24
Interruptor-Seccionador de potencia CC	400 A
Activación Interruptor-Seccionador carga	Máximo 200 ciclos de conmutación
Descargador de sobretensión CC	Tipo II, $I_{nom}=20kA$, $I_{máx}=40kA$
Transferencia de datos	Fibra óptica
Condiciones ambientales	
Rango de temperatura funcionamiento	-40°C a +60°C
Humedad relativa del aire	0% a 95%
Altura máxima sobre nivel del mar	2000 m / 4000 m (derrateo)

Tabla 11. Características técnicas de la caja de conexiones String-Monitor SSM-U2415 de SMA.

Un string es un conjunto de módulos fotovoltaicos instalados en serie.

3.9.1.4. Estructura de soporte

Como los módulos fotovoltaicos aprovechan la radiación solar para producir energía eléctrica, es por ello importante el ángulo de incidencia de los rayos del sol sobre estos. La estructura ha de disponer de unos ángulos óptimos para maximizar la captación de la radiación solar.

Las estructuras soporte pueden clasificarse de dos formas distintas:

- Estructuras fijas: son las estructuras en las que la posición del módulo tiene un ángulo de acimut e inclinación fijos. Este tipo de estructuras se puede dividir en:
 - o Estructuras fijadas en la pared.
 - o Estructuras fijadas en mástil.
 - o Estructuras fijadas en el suelo.
 - o Estructuras fijadas en cubiertas planas o inclinadas.
- Estructuras móviles: son estructuras en las que nos permite, mediante la utilización de un sistema de seguimiento solar, ajustar el movimiento del módulo para conseguir la mayor captación de la radiación solar.

En esta instalación se seleccionarán las estructuras fijadas en el suelo.

3.9.2. Cálculos de la instalación fotovoltaica

3.9.2.1. Configuración y número de módulos fotovoltaicos

En este apartado se calculará el número de módulos necesarios para la instalación y la agrupación en serie máxima de los mismos, de manera que se obtenga la agrupación de strings óptima.

En primer lugar, se calculará el número total de módulos necesarios para alcanzar la potencia que necesitamos para la planta desaladora.

$$N^{\circ}_{total\ de\ módulos} = \frac{P_{Pico\ instalación}}{P_{Pico\ módulo}} \quad (20)$$

Como la potencia pico total de la instalación que necesitamos es de 14 000 kW_p, y la potencia del módulo fotovoltaico es 370 W_p, obtenemos el número total de módulos fotovoltaicos que formarán la central fotovoltaica, serán:

$$N^{\circ}_{total\ de\ módulos} = \frac{14\ 000\ kW_p}{370\ W_p} = 37\ 838\ módulos$$

Seguidamente se requiere conocer las temperaturas límite entre las que trabajan las células del módulo fotovoltaico. De modo conservador, se considera que la temperatura mínima de la célula será la misma que la temperatura ambiente mínima del lugar, ya que es la temperatura más desfavorable que las células del módulo podrían alcanzar en caso de que este permaneciera en sombra.

$$T_{mín\ célula} = T_{mín\ ambiente} \quad (21)$$

En Jeddah la temperatura mínima es:

$$T_{mín\ célula} = 18^{\circ}\text{C}$$

Para el cálculo de la temperatura máxima de la célula se considera el día más caluroso del año y un nivel de irradiancia máximo, mediante la siguiente expresión:

$$T_{máx\ célula} = T_{máx\ ambiente} + G \cdot (TONC - 20)/800 \quad (22)$$

Siendo:

- G = Irradiancia en la superficie, la cual podemos considerar de 1 000 W/m².
- TONC = Temperatura de operación nominal de la célula, la cual la encontramos en la hoja de características del módulo fotovoltaico y se da para un nivel de irradiancia de 800 w/m², una temperatura de 20°C y una velocidad del viento de 1 m/s.

Por tanto se obtiene una temperatura máxima de la célula de:

$$T_{máx\ célula} = 44 + 1\ 000 \cdot (45 - 20)/800 = 75^{\circ}\text{C}$$

Cabe destacar que las temperaturas máximas y mínimas ambiente han sido obtenidas de datos históricos de la ubicación de la instalación.

A continuación, previo a la definición del cálculo de la cantidad de módulos a conectar en serie en cada string, se debe tener en cuenta una serie de consideraciones:

- La tensión entregada por un módulo depende directamente de la temperatura de sus células, así pues, a mayor temperatura, menor tensión y viceversa. Dicho efectos se contabiliza en el parámetro "Coeficiente de temperatura de V_{oc} " proporcionado por el fabricante. En nuestro caso es -0.286 %/°C.
- Para que cada rama se encuentre trabajando en el punto de máxima potencia MPP gobernado por el inversor, se requiere que la tensión de operación de la string se encuentre dentro del rango de tensiones de MPP facilitador en las características del inversor.
- Para evitar peligros y daños constructivos, la tensión máxima del string ha de ser menor que la tensión máxima del sistema VDC del módulo. En este caso dicha tensión es de 1.500 V.

Las hipótesis de cálculo son las siguientes:

- La tensión máxima del string ha de ser inferior a la máxima tensión de MPP del inversor. La máxima tensión del string se da cuando los módulos se encuentran en circuito abierto con las células a temperatura mínima $V_{oc(T_{\min})}$.

$$V_{oc(T_{\min})} = V_{oc} + V_{oc} \cdot \frac{C_{coef\ temp\ Voc}}{100} \cdot (T_{\min\ célula} - 25) \quad (23)$$

$$N^{\circ}\text{ máximo módulos en serie} = V_{\max\ MPP\ (25^{\circ}C)} / V_{oc(T_{\min})} \quad (24)$$

Dado que se está trabajando con la hipótesis anterior de temperatura ambiente mínima, se toma el valor de la tensión máxima MPP del inversor para la temperatura más baja de las dos ofrecidas por el fabricante, en este caso de 25°C.

$$V_{oc(T_{\min})} = 48.3 + 48.3 \cdot \frac{-0.286}{100} \cdot (18 - 25) = 49.27\ V$$

$$N^{\circ}\text{ máximo módulos en serie} = \frac{1425}{49.27} = 28.93\ \text{módulos}$$

- La tensión mínima del string ha de ser superior a la mínima tensión de MPP del inversor. La mínima tensión del string se da cuando los módulos se encuentran trabajando en el punto de máxima potencia con las células a temperatura máxima $V_{mpp(T_{\max})}$.

$$V_{mpp(T_{\max})} = V_{mpp} + V_{mpp} \cdot \frac{C_{coef\ temp\ Voc}}{100} \cdot (T_{\max\ célula} - 25) \quad (25)$$

$$N^{\circ}\text{ mínimo módulos en serie} = V_{\min\ MPP\ (50^{\circ}C)} / V_{mpp(T_{\max})} \quad (26)$$

Dado que se está trabajando con la hipótesis anterior de temperatura ambiente máxima, se toma el valor de la tensión mínima MPP del inversor para la temperatura más alta de las dos ofrecidas por el fabricante, en este caso de 50°C.

$$V_{mpp(T_{\max})} = 39.4 + 39.4 \cdot \frac{-0.286}{100} \cdot (75 - 25) = 33.77\ V$$

$$N^{\circ}\text{ mínimo módulos en serie} = \frac{850}{33.77} = 25.17\ \text{módulos}$$

Por todo ello, se utilizarán strings de 26 módulos conectados en serie. Dado que la configuración de los strings es fija, se requiere calcular el número total de strings necesarios para alcanzar la potencia pico de la instalación.

$$N^{\circ} \text{ strings totales} = N^{\circ} \text{ total módulos} / N^{\circ} \text{ módulos string} \quad (27)$$

$$N^{\circ} \text{ strings totales} = \frac{37\,838}{26} = 1\,455.31 \text{ strings}$$

Por lo tanto, se toman 1 456 strings, obteniendo una potencia pico en la instalación de 14 006 720 Wp, valor por encima de los elementos descritos a alimentar de la planta desaladora.

Finalmente resulta necesario hacer una serie de comprobaciones:

- La corriente total de los strings conectados al inversor ha de ser menor que la corriente máxima de entrada del mismo. Para ser conservador, se ha supuesto la situación más desfavorable, la cual se da para la temperatura ambiente máxima del inversor (50°C) y la corriente de cortocircuito de los módulos I_{sc} .

$$C_{\text{total strings}} = N^{\circ} \text{ strings} \cdot I_{sc} < C_{\text{máx entr (50°C)}} \quad (28)$$

$$C_{\text{total strings}} = \frac{1\,456}{3} \cdot 6.48 = 3\,144.96 \text{ A} < 5\,400 \text{ A}$$

- La tensión máxima de entrada al inversor ha de ser menor a 1 500 V. Dicha comprobación se cumple forzosamente ya que el diseño de los strings se realiza para que no se supere la tensión máxima MPP del inversor en la situación más desfavorable, y dicha tensión es menor que 1 500 V.

3.9.2.2. Orientación e inclinación de los módulos fotovoltaicos.

3.9.2.2.1. Orientación de los módulos fotovoltaicos

A la hora de diseñar este tipo de instalaciones solares, es muy importante decidir la orientación de los paneles ya que interesara que capten la mayor cantidad de radiación solar.

La orientación se define por el ángulo (azimut α), que es el ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del módulo y el meridiano del lugar. Los valores típicos son 0° para los módulos al sur, -90° para módulos orientados al este y +90° para módulos orientados al oeste.

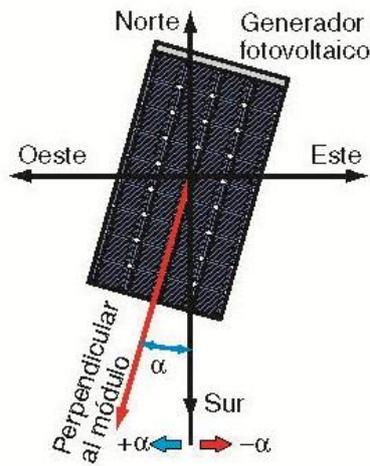


Figura 26. Orientación módulo fotovoltaico (ángulo azimut) [14].

Para hallar la orientación óptima de los módulos fotovoltaicos debe considerarse la ubicación de los mismos, en este caso, los módulos fotovoltaicos captarán la mayor cantidad de radiación solar si se orientan al *sur geográfico*, donde $\alpha=0^\circ$.

3.9.2.2.2. Inclinación de los módulos fotovoltaicos

Otro factor importante para realizar el diseño de estas instalaciones fotovoltaicas es la inclinación que deben tener los módulos para la mayor captación de radiación solar.

La inclinación de los módulos fotovoltaicos se define mediante el ángulo de inclinación β , que es el ángulo que forma la superficie de los módulos con el plano horizontal. Su valor es 0° para módulos horizontales y 90° para módulos verticales.

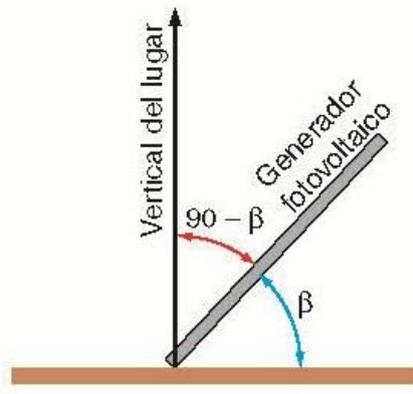


Figura 27. Ángulo inclinación módulo fotovoltaico [14].

Para obtener el valor de la inclinación con la que tenemos que instalar los módulos fotovoltaicos para obtener la mayor captación de radiación solar durante todo el año, lo obtenemos a través del software “Photovoltaic Geographical Information System” [15] que será de 22°.

3.9.2.3. Distancia mínima entre filas de módulos fotovoltaicos.

En este apartado se realizarán el cálculo de la distancia mínima de separación entre las distintas filas de módulos que componen la instalación fotovoltaica, para que no se produzcan sombras.

La distancia entre filas se calcula:

$$d = \frac{h}{\text{tag}(61^\circ - \text{latitud})} \quad (29)$$

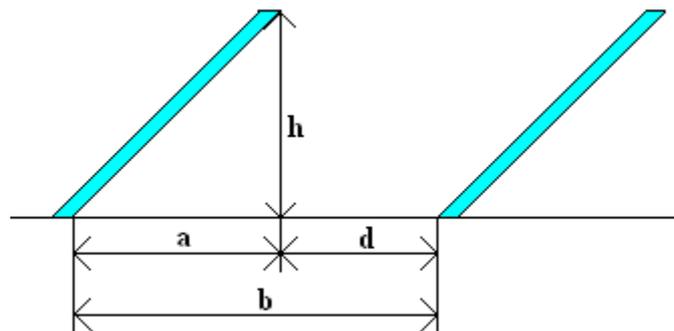


Figura 28. Distancia mínima entre filas de módulos fotovoltaicos.

La distancia de separación depende directamente del ángulo de inclinación, por lo tanto a mayor inclinación del módulo, mayor será la distancia entre filas.

En este caso, al tener los módulos dos inclinaciones distintas según la época del año, los tenemos que ubicar a una distancia aceptable para el caso más desfavorable (en la época en que los módulos tienen una mayor inclinación).

Por lo tanto, sabiendo que la longitud del panel es de 1 956 mm y el ángulo de inclinación es de 22°, la altura “h” de los paneles será:

$$h = \text{sen}22^\circ \cdot 1.956 = 0.74m \quad (30)$$

Una vez conocida la altura de los módulos en su máxima inclinación y la latitud del lugar (21,499°), la distancia “d” entre módulos será:

$$d = \frac{h}{\text{tag}(61^\circ - \text{latitud})} = \frac{0.74}{\text{tag}(61^\circ - 21.499^\circ)} = 0.90 m$$

Por lo tanto la distancia entre los extremos inferiores de filas consecutivas resultará de la suma de la distancia “d” y la proyección de la longitud del panel sobre el suelo “a”, que es:

$$a = \cos 22^\circ \cdot 1.956 = 1.81 \text{ m} \quad (31)$$

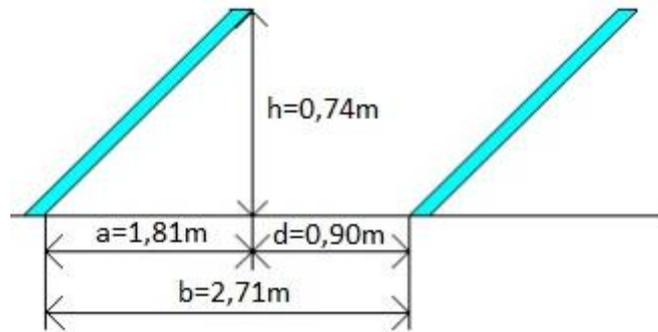


Figura 29. Valores obtenidos distancia mínima entre filas de módulos fotovoltaicos.

- Cálculo del número de módulos fotovoltaicos en cada fila.

En este apartado definiremos cuantas filas de módulos fotovoltaicos, y cuántos de ellos van instalados en cada fila. Teniendo en cuenta los siguientes datos ya calculados anteriormente:

- Nº de módulos fotovoltaicos: 37 838 módulos fotovoltaicos.
- Nº de módulos fotovoltaicos en cada string: 26 módulos fotovoltaicos.
- Nº de strings: 1 456 strings.
- Dimensiones del módulo fotovoltaico: 1 956 x 991 x 45mm.
- Separación mínima entre líneas: 2.71m.
- Superficie disponible para realizar la instalación fotovoltaica: 300m x 400m=120 000m².

Para así poder realizar la instalación lo menos compleja posible y así poder reducir los costes de la misma.

Primero se calculará la longitud total de un string:

$$Longitud_{string} = ancho_{módulo} \cdot n^{\circ}_{mód \ string} \quad (32)$$

$$Longitud_{string} = 0.991 \cdot 26 = 25.766 \approx 26 \text{ metros}$$

Ahora se calculará cuantas strings podemos poner en la misma fila, teniendo en cuenta dejar zonas de paso en el centro y dos en cada lado de la instalación, para poder realizar trabajos de mantenimiento lo más cómodo posible de 3 metros cada uno.

$$N^{\circ}_{strings\ fila} = ancho_{superficie}/Longitud_{string} \quad (33)$$

$$N^{\circ}_{strings\ fila} = (300 - 15)/26 = 10.96 \approx 10\ strings/fila$$

Una vez obtenido el número de strings por fila, vamos a calcular el número total de filas que necesitaremos para colocar todos los módulos fotovoltaicos.

$$N^{\circ}_{filas} = Longitud_{superficie}/b \quad (34)$$

Donde “b” es la distancia entre los extremos inferiores de filas consecutivas, que ya hemos calculado anteriormente, nos da un número de filas:

$$N^{\circ}_{filas} = 400/2.71 = 147.60 \approx 147\ filas$$

Este es el número máximo de filas que podríamos instalar en nuestra superficie, pero debemos comprobar cuantas filas necesitamos instalar en base al nº de strings que tenemos en la instalación.

$$N^{\circ}_{filas} = N^{\circ}_{strings}/N^{\circ}_{strings/fila} \quad (35)$$

Sustituyendo los valores, obtenemos:

$$N^{\circ}_{filas} = 1\ 456/10 = 145.6 \approx 146\ filas$$

Por lo tanto, la instalación estará compuesta por 146 filas con 260 módulos fotovoltaicos en cada una de ellas, teniendo en cuenta crear zonas de acceso y paso, y zona para la instalación de nuestros inversores a instalar.

3.9.2.4. Número y disposición de cajas de conexiones.

Se dispondrá de una caja de conexiones de forma que completemos todas las entradas de la misma, que son 24 entradas, por lo que se necesitarán un total de 61 cajas de conexiones.

Finalmente, el fabricante establece una ecuación de cálculo para comprobar si la caja de conexiones seleccionada es adecuada para los valores de corriente máximas en la planta proyectada:

$$I_{string\ máx} = I_{cc\ máx} / N_{entradas\ string} \leq 17.5A \quad (36)$$

Siendo:

$I_{cc\ máx} = 315\text{ A}$ para una temperatura ambiente de hasta 50°C.

En este caso será:

$$I_{string\ máx} = 315/24 = 13.125\text{ A} \leq 17.5A$$

3.9.2.5. Cableado instalación eléctrica.

Los cálculos del cableado (selección y sección) para la instalación fotovoltaica, tanto para la parte de Corriente Continúa, Corriente Alterna, en la parte de baja tensión se ha realizado basándose en las siguientes condiciones:

- Criterio de caída de tensión.
- Criterio de intensidad máxima admisible.
- Criterio de la corriente de cortocircuito.

También el cableado deberá cumplir con la normativa UL4703 y la UL44. Normativas americanas referentes al diseño y tolerancia.

4. Estudio económico.

4.1. Coste económico de la central fotovoltaica.

En la siguiente tabla se puede observar el cálculo del coste económico de la central fotovoltaica, a partir de los cálculos del apartado 3.9. del presente proyecto.

	precio por ud.	cantidad	TOTAL
Modulo fotovoltaico (Longi Solar LR6-72PH 370M)	185,53 €	37.838	7.020.084,14 €
Inversores (MW Power Station 5000SC-EV)	612.300,00 €	3	1.836.900,00 €
Estructura	34.941,60	1	34.941,60 €
Cajas Conexiones (SMA String-Monitor SSM-U2415)	2.459,75 €	61	150.044,75 €
Obra Civil	75.326,80 €	1	75.326,80 €
Instalación Eléctrica	329.857,60 €	1	329.857,60 €
Mano de obra Obra Civil	77.590,00 €	1	77.590,00 €
Mano de Obra Instalación eléctrica	90.780,00 €	1	90.780,00 €
			9.615.524,89 €

Tabla 12. Coste de la central fotovoltaica.

4.2. Coste económico de la planta desaladora.

En este punto se tendrá en cuenta todos los calculados y parámetros citados anteriormente en el proyecto.

1. Parámetros generales de diseño

Flujo de agua producido por bastidor de OI	2500,00	(m ³ /h)	300000	m ³ /día	108000000	m ³ /año
Conversión	0,45					
Numero de BASTIDORES	5					
Elementos por tubo	7					
Número de tubos de presión por BAST	700,00					
Número total de elementos por BAST	4900,00					
Vida media membranas (años)	7,00					
Grupo motor reserva (1 por 4-5 BAST)	2,00					
Potencia	51750	(kW)				
Consumo específico energía en OI (70%)	2,90	kWh/m ³				
Consumo específico energía total	4,14	kWh/m ³				
Caudal recuperador de energía	3026,20	(m ³ /h)				
Eficiencia del recuperador de energía	0,97					
Disponibilidad de la planta	8640	(horas/año)				

2. Variables económicas de Proyecto

Vida útil del proyecto (años)	20,00	
interés anual	0,06	
Coste energía eléctrica	0,12	(€/kWh)
Cotización moneda	1,09	\$/€

3. Amortización

$(1+i)^n$	3,2071
CRF (capital recovery factor): $[(1+i)^n - 1] / [i \cdot (1+i)^n]$	11,4699

4. Costes de Construcción

En este punto se tendrán en cuenta los costes relativos a las unidades de osmosis inversa.

Costes relativos a la unidad de OI

REF MEMBRANA	SWC4 MAX
Coste de cada Elemento (€/elemento)	886 €
	4.342.233 €
	21.711.165 €
REF. TUBO DE PRESION	Codeline 8 1000PSI Max
Coste de tubo de presión (€/TP)	2.135 €
Coste TP por bastidor	1.494.305 €
Coste total TP	7.471.525 €
REF. BOMBA Y MOTOR	
Coste Bomba	60.901 €
Coste Motor	87.001 €
Coste por BAST	147.901 €
Coste total BM	739.507 €
REF. RECUPERADOR ENERGIA	ERI PX-300
Coste Recuperador Energía	7.372.595 €
Coste Bomba Booster + Motor	234.577 €
Coste por BAST	7.607.172 €
Coste total ERD	38.035.860 €
GRUPO RESERVA	
Coste B+M+ERD	7.520.497 €

COSTE UNIDAD OI BASTIDOR	13.591.611 €
COSTE TOTAL UNIDADES OI	75.478.554 €

Factor Instalación	3,00
--------------------	------

COSTE TOTAL UNIDADES OI INSTALADO	226.435.661 €
--	----------------------

5. Reemplazo Membranas y Filtros

Tasa de reemplazo (%/año)	0,14
Coste anual de reemplazo membranas	3.101.595 €
Coste anual de reemplazo filtros (15%de membranas)	465.239 €
Coste total anual reemplazo	3.566.834 €

Seguidamente se puede observar la inversión final de la planta, teniendo en cuenta todos los costes directos e indirectos de la misma. De esta forma se obtendrá el coste total y el ratio por m3/día.

Costes de capital o Inversión total

Costes de capital directos (Construcción)

item	€	%
Preparación del terreno, accesos , parking...	7.547.855,35 €	1,50%
Captación de agua	27.675.469,63 €	5,50%
Pretratamiento	45.287.132,12 €	9,00%
Equipos para el Sistema de OI	226.435.660,59 €	45,00%
Post-tratamiento	10.063.807,14 €	2,00%
Gestión de Concentrados	17.611.662,49 €	3,50%
Gestión de residuos	15.095.710,71 €	3,00%
Sistemas Eléctricos e Instrumentación	15.095.710,71 €	3,00%
Instalaciones y equipos auxiliares	12.579.758,92 €	2,50%
Edificios	22.643.566,06 €	4,50%
Puesta en marcha y pruebas de aceptación	12.579.758,92 €	2,50%
Central fotovoltaica	12.579.758,92 €	2,50%
Subtotal de costes directos (construcción)	425.195.851,55 €	84,5%

Costes de capital indirectos (Construcción)		
Costes de Ingeniería del proyecto		
Ingeniería Preliminar	5.031.903,57 €	1,00%
Ensayos piloto	2.515.951,78 €	0,50%
Diseño de detalle	10.063.807,14 €	2,00%
Gestión y supervisión de la construcción	5.031.903,57 €	1,00%
Subtotal-servicios de ingeniería.	22.643.566,06 €	4,50%
Desarrollo del Proyecto		
Administración, contratación y gestión	5.031.903,57 €	1,00%
Permisos ambientales	10.063.807,14 €	2,00%
Servicios Legales	5.031.903,57 €	1,00%
Subtotal Desarrollo del proyecto.	20.127.614,27 €	4,00%
Costes financieros del proyecto		
Intereses durante la construcción	5.031.903,57 €	1,00%
Fondo de Reserva para el servicio de la deuda	10.063.807,14 €	2,00%
Otros costes financieros	5.031.903,57 €	1,00%
Subtotal-financiación del proyecto	20.127.614,27 €	4,00%
Contingencias	15.095.710,71 €	3,00%
Subtotal costes indirectos del capital	77.994.505,31 €	15,50%
Costes totales de capital	503.190.356,86 €	100,0%
Ratio Inversión/m3/día	1.677 €	

Finalmente se calculará el coste anual de operación y mantenimiento, tanto fijos como variables.

Costes anuales de Operación y Mantenimiento

	€	€/m ³	% del Total
Costes Variables			
energía	34.899.428,57 €	0,32 €	48,00%
Productos químicos	2.098.159,79 €	0,02 €	3,00%
Reemplazamiento de membranas y filtros de cartucho	3.566.834,25 €	0,03 €	7,00%
Gestión de la corrientes residuales	2.797.546,39 €	0,03 €	4,00%
Subtotal costes variables	43.361.969,00 €	0,40 €	62,00%

Costes Fijos			
Termino de potencia	3.496.932,98 €	0,03 €	5,00%
Personal	3.496.932,98 €	0,03 €	5,00%
Mantenimiento	1.410.120,91 €	0,01 €	5,00%
Vigilancia ambiental	1.398.773,19 €	0,01 €	2,00%
Costes indirectos	5.595.092,77 €	0,05 €	8,00%
Central fotovoltaica	9.092.025,76 €	0,08 €	13,00%
Subtotal costes fijos	11.900.919,86 €	0,14 €	38,00%
Total costes O&M	69.938.659,68 €	0,55 €	100,0%

Amortización de la inversión	43.870.428,34 €	0,41 €	
-------------------------------------	------------------------	---------------	--

4.3. Coste económico del agua obtenida

Finalmente, una vez se han calculado los costes totales de producción, se le añade el beneficio que se obtendrá y los impuestos para poder obtener el coste total del agua.

Costes del agua desalada € / m³	
Total costes producción	0,96 €
Beneficio industrial (10%)	0,10 €
IMPUESTOS (10%)	0,11 €
Total coste del agua desalada	1,159 €

Tabla 13. Coste final del agua.

4.4. Influencia de las variables

Como se puede observar en la tabla y el gráfico siguiente con respecto al flujo promedio, el coste y la cantidad de tubos, las líneas se cruzan en 700 tubos, por lo que será el más rentable para este proyecto.

TDS	Nº tubos	Flujo promedio	Coste (€)
191	550	15,8	2787400
246	700	12,4	3547600
283	800	10,9	4054400
302	850	10,2	4307800

Tabla 14. Comparativa número de tubos y flujo promedio respecto al coste.

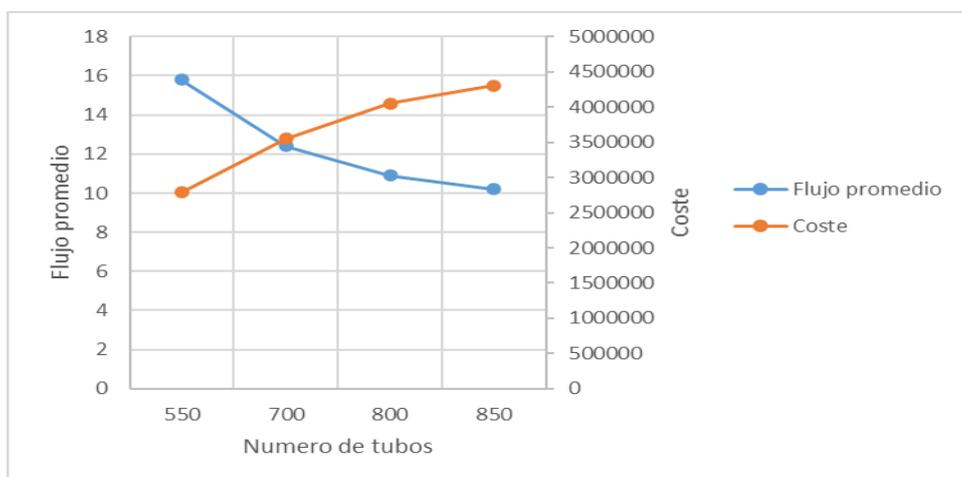


Figura 30. Representación gráfica de las variables.

5. Conclusiones.

La conclusión que se obtiene de este proyecto es que para la obtención de 300 000 m³/día de agua apta para el consumo será necesario la captación de 666 667 m³/día de agua de mar, ya que las plantas de ósmosis inversa tienen un rendimiento máximo del 45%. Esta planta contará con 5 bastidores, que estarán formados por un total de 4 900 elementos por bastidor, que se encargarán de realizar la filtración del agua por osmosis inversa a través de las membranas.

Una vez el agua se obtiene el agua de las membranas se la hará pasar por un post-tratamiento en el cual se le añadirá al flujo de agua una corriente de CO₂ y seguidamente pasará por un lecho de calcita. De esta forma, el agua tendrá las sales necesarias para que sea apta para consumo humano.

finalmente el agua se dejará en un tanque, para que a partir del mismo se pueda bombear tanto a la red de distribución de agua potable, como para camiones cisterna o regadío.

En este tipo de proyectos suele tener que realizar una importante inversión económica para aportar una solución a una necesidad básica como es el acceso al agua apta para consumo humano en zonas donde existe escasez de recursos hídricos.

Dada la importante inversión económica que se tiene que realizar, se ha optado por instalar un Central Fotovoltaica para reducir de forma considerable el consumo de energía de la red eléctrica.

La Central Fotovoltaica está compuesta por 3 inversores que convierten la corriente continua que ofrece los módulos fotovoltaicos en corriente alterna, 37 838 módulos fotovoltaicos con una potencia de 720 Wp, distribuidos en 26 módulos en cada string, y un total de 1 456 strings. Con la que se obtiene una potencia en la Central de 14 006 720 Wp.

El presente proyecto tendrá un coste de 503 190 356.86 euros, para amortizar la inversión económica realizada serán necesarios 11.5 años. El coste de producción de un litro de agua es de 0.96 euros, y su precio final de venta con el beneficio industrial y los impuestos será de 1.16 euros.

6. Bibliografía.

Referencias literarias:

- [1] Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. NO DEJAR A NADIE ATRÁS.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304>
- [2] Morton, MC (2019), Arid Arabian Peninsula is tapping into vast groundwater reserves, Eos, 100, <https://eos.org/articles/arid-arabian-peninsula-is-tapping-into-vast-groundwater-reserves>. Published on 05 November 2019
- [3] Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/y/101171/Clima-promedio-en-Jeddah-Arabia-Saud%C3%AD-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- [4] Desalinización en el mundo. Fundación AQUAE.
<https://www.fundacionaquae.org/desalinizacion-en-el-mundo/>
- [5] Ros Moreno, Antonio. Destilación súbita por efecto flash (destilación súbita multietapa, MSF). <http://www.mailxmail.com/curso-agua-desalacion-1-4/destilacion-subita-efecto-flash-destilacion-subita-multietapa-msf>
- [6] Ros Moreno, Antonio. Destilación por efecto múltiple (MED).
<http://www.mailxmail.com/curso-agua-desalacion-1-4/destilacion-8220-multiple-efecto-8221-med>
- [7] Diccionario de términos desalinización.
<https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?id=4235&termino=desalinizaci%C3%B3n+por+compresi%C3%B3n+de+vapor>
- [8] Universidad de Alicante. Desalinización de aguas salobres mediante sistemas de electrodiálisis alimentados con energía solar fotovoltaica.
<https://web.ua.es/es/leqa/documentos/oferta-tecnologica/desalinizacion-de-aguas-salobres-alimentada-por-energia-solar.pdf>
- [9] Santiago Gutiérrez Ruiz, Mohammed Hassani Zerrouk y José María Quiroga Alonso. Ensuciamiento y limpieza de membranas empleadas en desalación. Publicado en 2016.
- [10] Organización Mundial de la Salud. Guía para la calidad del agua potable, tercera edición: Volumen 1- Recomendaciones.
https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/gdwq3/es/
- [11] DrinTec, expertos en remineralización de aguas. Lechos de calcita ascendentes con altura constante para remineralización de aguas desaladas.
<https://drintec.com/documentos/general/Drintec-Lechos-de-calcita-folleto-tecnico.pdf>

- [12] Materiales para la conducción en desaladoras. <https://blog.ph-technology.net/materiales-para-conducciones-en-desaladoras>
- [13] OMS. Guía para la calidad del agua potable. https://www.who.int/water_sanitation_health/dwg/guidelines/es/
- [14] Sistema de información geográfica fotovoltaica. <https://re.jrc.ec.europa.eu/>
- [15] Calculo instalación solar. <http://calculationsolar.com/blog/?p=8>

Figuras:

- [1] ONU (2018a, pág. 72, basado en datos de AQUASTAT).
- [2] PBL Netherlands Environmental Assessment Agency (2018, pág. 23). Bajo licencia de Creative Commons Attribution 3.0 Unported (CC BY 3.0).
- [3] David Jerrasa, Arabia Saudí: relieve y clima. (17 de diciembre 2019) <https://geografia.laguia2000.com/geografia-regional/asia/arabia-saudi-relieve-clima>
- [4] Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/y/101171/Clima-promedio-en-Jeddah-Arabia-Saud%C3%AD-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- [5] Ali Al-Karaghoul, Lawrence L. Kazmerski. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Agosto 2013. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113000208?via%3Dihub>
- [6] Visor de Google maps con la ubicación exacta de la planta. <https://www.google.com/maps/place/Yidda+Arabia+Saudita/@21.1095611,39.195456,2782m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x15c3d01fb1137e59:0xe059579737b118db!8m2!3d21.485811!4d39.1925048>
- [7] Composición del agua de mar en Jeddah. <https://www.lenntech.com/composition-seawater.htm>
- [8] Ros Moreno, Antonio. Captación de agua. <http://www.mailxmail.com/curso-agua-desalacion-2-4/captacion-agua-1-2>
- [9] Software de simulación IMS Desing. <https://membranes.com/solutions/software-imsdesign/>
- [10] Imagen Excel software sistema ERD
- [11] Lecho de calcita con disolvedor de CO₂. <https://drintec.com/documentos/general/Drintec-Lechos-de-calcita-folleto-tecnico.pdf>

- [12] DJSC Solar. <http://www.djsc-energy.com/solar-panel/monocrystalline-solar-module/mono-perc-solar-panel-60pcs-310w-lr6-60pe.html>

- [13] SMA. <https://www.sma.de/es/productos/soluciones-de-sistema-y-paquetes/mv-power-station-4400-4950-5000-5500-6000.html>

- [14] KSB productos. https://www.ksb.com/ksb-cl-es/Productos_y_Servicios/Agua/Water_treatment/Multitec_RO/water-high-pressure-pump-multitec-ro/34056/

- [15] <https://www.depuradoras.es/accesorios-206/7626-bomba-booster-high-flow-incluye-transformador-7626-8432611166752.html>

- [16] Filtec. <https://www.indiamart.com/proddetail/marine-sea-water-pump-14559180230.html>

7. Anexos.

Anexo I: Módulo de ultrafiltración.

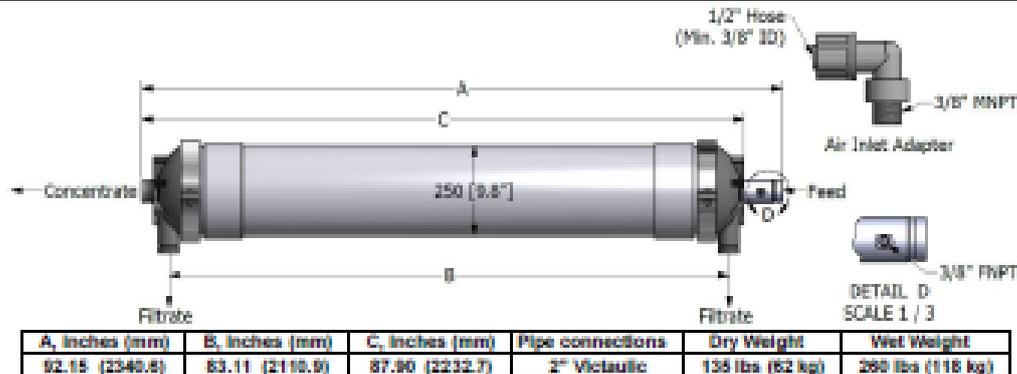
Capillary Ultrafiltration Module

HYDRAcap® MAX 80

Performance¹	Filtrate Flow: Filtrate Turbidity: Bacteria removal:	15.7 – 51.0 gpm (3.6 – 11.5 m ³ /h) ≤ 0.10 NTU ≥ 4 log
Type	Configuration: Membrane Polymer: Nominal Membrane Area: Fiber Dimensions: Pore size:	Capillary Ultrafiltration Module TIPS PVDF 1130 ft ² (105 m ²) ID 0.024" (0.6 mm), OD 0.047" (1.2 mm) 0.08 micron
Application Data²	Typical Filtrate Flux Range: Maximum Applied Feed Pressure: Maximum Transmembrane Pressure: Instantaneous Chlorine Tolerance: Maximum Chlorine Exposure: Maximum Feed Turbidity: Maximum Operating Temperature: pH Operating Range: Cleaning pH Range: Operating Mode:	20 – 65 gfd (34 – 110 l/m ² /h) 73 psig (5.0 bar) ³ 30 psig (2.0 bar) 5000 ppm ⁴ 1,000,000 ppm-hrs 300 NTU ⁵ 104 °F (40 °C) 2.0 – 11.0 1.0 – 13.0 Outside to Inside Filtration Dead End or Cross flow mode

Typical Process Conditions

Air Scour Rate:	7.3 – 9.1 acfm (12.3 – 15.4 m ³ /h)
Air Scour Duration:	120 – 240 seconds
Air Scour Frequency:	Once every 20 – 60 minutes
Maintenance Clean Frequency:	1 – 3 times per day
Maintenance Clean Duration:	20 – 30 minutes
Disinfection Chemicals:	NaOCl, ClO ₂ or NH ₂ Cl
Cleaning Chemicals:	NaOH, HCl, H ₂ SO ₄ , or Citric Acid



Certifications: NSF61, NSF419 (US LT2ESWTR – Public Drinking Water Compliance)

¹ Typical module performance for most feedwaters.

² The limitations shown here are for general use. The values may be more conservative for specific projects to ensure the best performance and longest life of the membrane.

³ At 20°C (68°F) (1 bar) between 21 – 30°C (68°F) (2 bar) between 31 – 40°C.

⁴ For 60 minutes or less.

⁵ Higher values can be treated. Consult Hydranautics' technical staff.



Notice: Hydranautics also offers HYDRAcap® MAX 80-NON, which is a dummy module with no piping or fiber.

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

30100019



SWC4 MAX

Specified Performance*

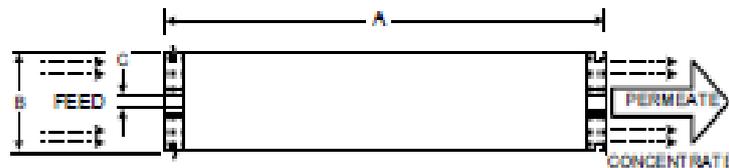
Permeate Flow:	7,200 gpd (27.3 m ³ /d)
Salt Rejection:	99.8% (99.7% minimum)
Test Conditions:	32000 ppm NaCl solution 800 psi (5.5 MPa) Applied Pressure 77 °F (25 °C) Operating Temperature 10% Permeate Recovery 6.5 - 7.0 pH Range

*The Specified Performance is based on data taken after approximately 30 minutes of operation. Actual testing of elements may be done at conditions which vary from these exact values; in which case, the performance is normalized back to these standard conditions. Permeate flow for individual elements may vary ±15 percent from the value specified.

General Product Description**

Configuration:	Spiral Wound
Membrane Polymer:	Composite Polyamide
Membrane Active Area**:	440 ft ² (40.9 m ²)

Packaging: All membrane elements are supplied with a brine seal, interconnector, and O-rings. Elements are enclosed in a sealed polyethylene bag containing less than 1.0% sodium meta-bisulfite solution, and then packaged in a cardboard box.



Element Details**

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)	Weight, lbs. (kg)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)	32.0 ± 2 (14.5 ± 1)

**Values listed are indicative, not specified. For more detailed specifications, see our Technical Service Bulletin documents or contact Hydranautics Technical Department. Element weight values are as shipped from factory. Elements that are used and then gravity drained may still contain at least an additional 2 lbs (1 kg) of liquid.

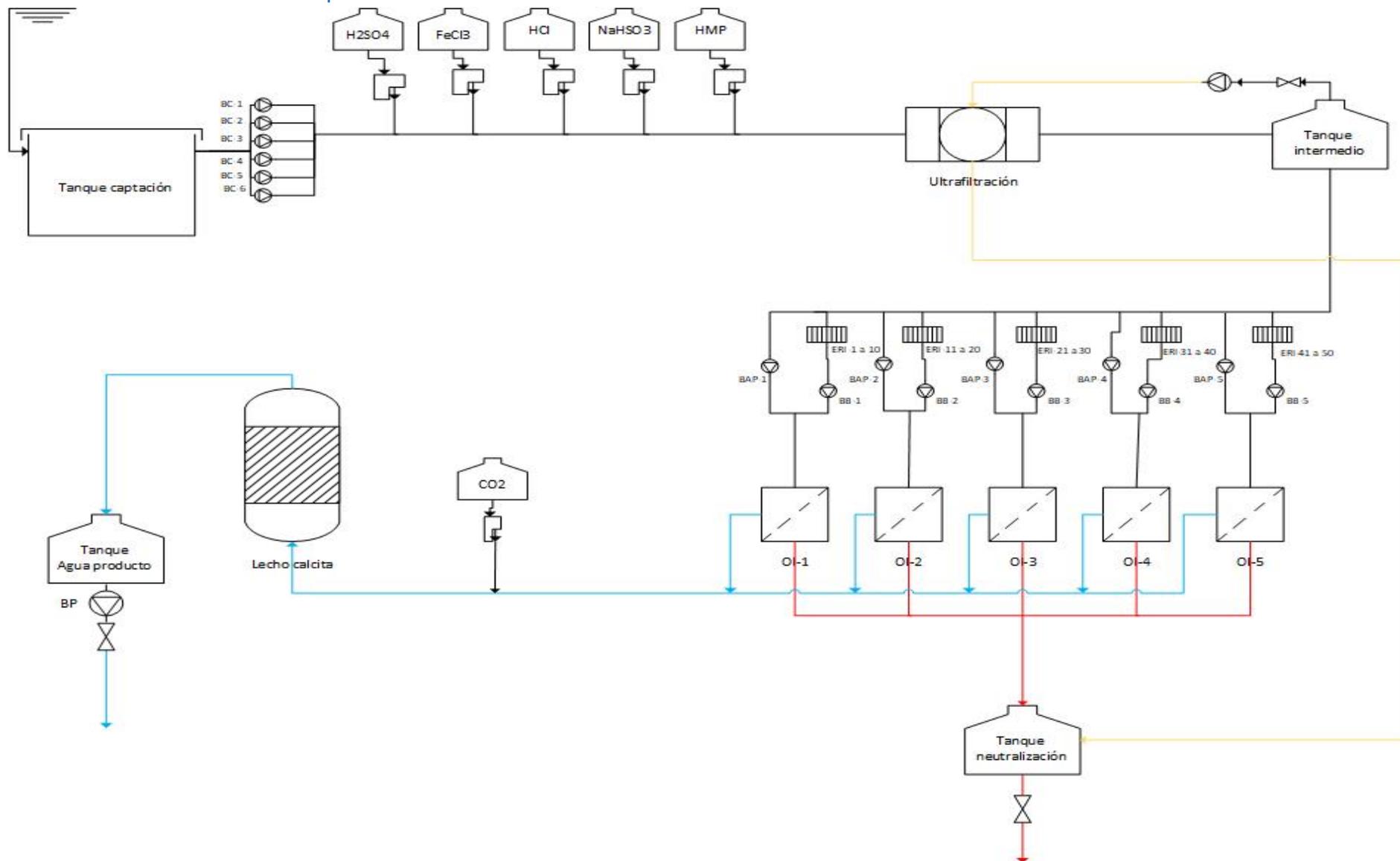
Product Use and Restrictions[^]

Maximum Applied Pressure:	1200 psig (8.27 MPa)
Maximum Chlorine Concentration:	< 0.1 ppm
Maximum Operating Temperature:	113 °F (45 °C)
pH Range, Continuous (Cleaning):	2-11 (1-13)
Maximum Feedwater Turbidity:	1.0 NTU
Maximum Feedwater SDI (15 mins):	5.0
Maximum Feed Flow:	75 gpm (17.0 m ³ /h)
Maximum Pressure Drop for Each Element:	15 psi (0.10 MPa)

[^] The limitations shown here are for general use. For specified projects, operation at more conservative values may ensure the best performance and longest life of the membrane. See Hydranautics Technical Bulletins for more details.

Disclaimer: The information and data are presented in good faith and in lieu of all warranties. All express or implied warranties, including the warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, are hereby disclaimed and excluded. Conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydranautics assumes no liability for results obtained or damage incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydranautics' products for the user's specific end uses. 2010010

Anexo III: Diseño de la planta.



CÁLCULOS BOMBAS

1. Bomba de captación.
2. Bomba de alta presión.
3. Bombas booster.
4. Bomba de contralavado sistema ultrafiltración.
5. Bomba de agua producto.

1. Bomba de captación.

Son las bombas que impulsan el agua desde el mar hasta el tanque de captación, atravesando la arena de la playa, haciendo esta de filtro.

```
clc
close all
clear all
syms f

%Datos
L=400; % m (Longitud, son 345.63m pero se sobredimensiona)
H_niv_mar=12; % m (Altura sobre el nivel del mar)
Prof=10; % m (Profundidad cámara, son 7m pero se sobredimensiona)
H=Prof+H_niv_mar; %m (Altura total)
g=9.8; %m/s2 (Gravedad)

P_inicial=1.003; % bar (Presion inicial)
P_final=10; % bar (Presion final)
incr_P=P_final-P_inicial; % bar
incr_Pf=incr_P*10.2; % m (se pasa de bares a metros de agua)

Q=666667/24; % m3/h
dens=1033; %kg/m3
K=0.000021; % (Rugosidad)
v_max=6480; % m/h (Velocidad maxima en m/h)
v_max_1=v_max/3600;% m/s (Velocidad maxima en m/s)
mu=0.001; %kg/m*s (viscosidad del agua de mar)
```

Dividiremos el caudal en 6 bombas:

$$Q_c = Q/6$$

$$Q_c = 4.6296e+03$$

Cálculo de la sección y diámetro:

$$S=Qc/v_{\max} \% m^2$$

$$S = 0.7144$$

$$D=\sqrt{((4*S)/\pi)} \% m$$

$$D = 0.9538$$

Cálculo del número de Reynolds:

$$Re=(\text{dens}*v_{\max_1}*D)/\mu$$

$$Re = 1.7734e+06$$

Cálculo del factor de rozamiento con la ecuación de Colebrook-White:

$$\begin{aligned} \text{epsr}&=K/D; \\ f&=\text{vpasolve}(1/\sqrt{f}+2*\log_{10}((\text{epsr}/3.71)+(2.51/(Re*\sqrt{f}))), f) \end{aligned}$$

$$f =$$

$$0.011246067081418095115854077975922$$

Se calculan las pérdidas con la ecuación de Fanning:

$$\text{sum_F}=(f*L*(v_{\max_1}^2))/(2*D*g) \% m$$

$$\text{sum_F} =$$

$$0.77966638553716119972335452457773$$

Se suman todas las pérdidas de carga:

$$\text{Sum_F}=\text{sum_F}+11 \% m$$

$$\text{Sum_F} =$$

$$11.779666385537161199723354524578$$

Cálculo de la altura manométrica:

$$H_{\text{man}}=H+\text{Sum_F}+\text{incr_Pf} \% m$$

$$H_{\text{man}} =$$

$$125.54906638553715151360478064289$$

Se calcula la potencia de la bomba:

$$P=((Qc/3600)*H_{\text{man}}*\text{dens}*g)/(0.87) \% W$$

P =

1878730.9820654416296709343997387

$$P_{\text{bomba}} = P / 1000 \text{ \% kW}$$

P_bomba =

1878.7309820654416296709343997387

Finalmente, se calcula el consumo de la bomba:

$$PR = P_{\text{bomba}} / 0.95 \text{ \% kW}$$

PR =

1977.6115600688859259694046313038

2. Bombas alta presión

Estas bombas son las encargadas de impulsar el agua desde el tanque intermedio al sistema de ósmosis inversa. Para el cálculo de la potencia de estas bombas se emplearán los siguientes datos:

```
clc
close all
clear all
syms f

%Datos
L=10; % m (Longitud)
P_inicial=3; % bar (Presion inicial)
P_final=65.6; % bar (Presion final)
incr_P=P_final-P_inicial; % bar
incr_Pf=incr_P*10.2; % m (se pasa de bares a metros de agua)
incr_Z=L; % m
g=9.8; %m/s2 (Gravedad)

Q=(666667/24)*0.45; % m3/h
dens=1033; %kg/m3
K=0.000021; % (Rugosidad)
v_max=6480; % m/h (Velocidad maxima en m/h)
v_max_1=v_max/3600;% m/s (Velocidad maxima en m/s)
mu=0.001; %kg/m*s (viscosidad del agua de mar)
```

Dividiremos el caudal en 5 bombas:

$$Q_a = Q / 5$$

Qa = 2.5000e+03

Cálculo de la sección y diámetro:

$$S=Qa/v_{\max} \% m^2$$

$$S = 0.3858$$

$$D=\text{sqrt}(((4*S)/\pi)) \% m$$

$$D = 0.7009$$

Cálculo del número de Reynolds:

$$Re=(\text{dens}*v_{\max_1}*D)/\mu$$

$$Re = 1.3032e+06$$

Cálculo del factor de rozamiento con la ecuación de Colebrook-White:

$$\begin{aligned} \text{epsr} &= K/D; \\ f &= \text{vpasolve}(1/\text{sqrt}(f)+2*\log_{10}((\text{epsr}/3.71)+(2.51/(Re*\text{sqrt}(f)))), f) \end{aligned}$$

$$f =$$

$$0.01187064345044093586888093982361$$

Se calculan las pérdidas con la ecuación de Fanning:

$$\text{sum}_F=(f*L*(v_{\max_1}^2))/(2*D*g) \% m$$

$$\text{sum}_F =$$

$$0.027997904650065554033834650696577$$

Cálculo de la altura manométrica:

$$H=L+\text{sum}_F+\text{incr}_P f \% m$$

$$H =$$

$$648.5479979046500655540338346507$$

Se calcula la potencia de la bomba:

$$P=((Qa/3600)*H*\text{dens}*g)/(0.87) \% W$$

$$P =$$

$$5240672.1621514495873888243523332$$

$$P_{\text{bomba}} = P / 1000 \text{ kW}$$

$P_{\text{bomba}} =$

5240.6721621514495873888243523332

Finalmente, se calcula el consumo de la bomba:

$$PR = P_{\text{bomba}} / 0.95 \text{ kW}$$

$PR =$

5516.4970127909995656724466866665

3. Bombas booster

Estas bombas son las encargadas de impulsar desde el recuperador de energía a la corriente de agua de entrada al sistema de osmosis inversa. Para el cálculo de la potencia de estas bombas se emplearán los siguientes datos:

```
clc
close all
clear all
syms f

%Datos
L=10; % m (Longitud)
P_inicial=55.6; % bar (Presion inicial)
P_final=65.6; % bar (Presion final)
incr_P=P_final-P_inicial; % bar
incr_Pf=incr_P*10.2; % m (se pasa de bares a metros de agua)
incr_Z=L; % m
g=9.8; %m/s2 (Gravedad)

Q=(666667/24)*0.55; % m3/h
dens=1033; %kg/m3
K=0.000021; % (Rugosidad)
v_max=6480; % m/h (Velocidad maxima en m/h)
v_max_1=v_max/3600;% m/s (Velocidad maxima en m/s)
mu=0.001; %kg/m*s (viscosidad del agua de mar)
```

Dividiremos el caudal en 5 bombas:

$$Q_b = Q / 5$$

$Q_b = 3.0556e+03$

Cálculo de la sección y diámetro:

$$S=Qb/v_{\max} \% m^2$$

$$S = 0.4715$$

$$D=\text{sqrt}(((4*S)/\pi)) \% m$$

$$D = 0.7748$$

Cálculo del número de Reynolds:

$$Re=(\text{dens}*v_{\max_1}*D)/\mu$$

$$Re = 1.4407e+06$$

Cálculo del factor de rozamiento con la ecuación de Colebrook-White:

$$\begin{aligned} \text{epsr} &= K/D; \\ f &= \text{vpasolve}(1/\text{sqrt}(f)+2*\log_{10}((\text{epsr}/3.71)+(2.51/(Re*\text{sqrt}(f)))), f) \end{aligned}$$

$$f =$$

$$0.01166172418183454831224225127265$$

Se calculan las pérdidas con la ecuación de Fanning:

$$\text{sum}_F=(f*L*(v_{\max_1}^2))/(2*D*g) \% m$$

$$\text{sum}_F =$$

$$0.024879345268336731039498239933679$$

Cálculo de la altura manométrica:

$$H=L+\text{sum}_F+\text{incr}_P f \% m$$

$$H =$$

$$112.02487934526833673103949823993$$

Se calcula la potencia de la bomba:

$$P=((Qb/3600)*H*\text{dens}*g)/(0.87) \% W$$

$$P =$$

$$1106393.2823011953237038397254138$$

$$P_{\text{bomba}} = P / 1000 \text{ kW}$$

$P_{\text{bomba}} =$

1106.3932823011953237038397254138

Finalmente, se calcula el consumo de la bomba:

$$PR = P_{\text{bomba}} / 0.95 \text{ kW}$$

$PR =$

1164.6245076854687617935155004356

4. Bomba de contralavado sistema ultrafiltración.

Estas bombas son las encargadas de impulsar el agua a contracorriente, para la limpieza de los filtros de ultrafiltración (1 a 3 veces diarias). Para el cálculo de la potencia de estas bombas se emplearán los siguientes datos:

```
clc
close all
clear all
syms f

%Datos
L=20; % m (Longitud)
P_inicial=3; % bar (Presion inicial)
P_final=5; % bar (Presion final)
incr_P=P_final-P_inicial; % bar
incr_Pf=incr_P*10.2; % m (se pasa de bares a metros de agua)
incr_Z=1; % m
g=9.8; %m/s2 (Gravedad)

Q=(666667/24)*0.45; % m3/h
dens=1033; %kg/m3
K=0.000021; % (Rugosidad)
v_max=6480; % m/h (Velocidad maxima en m/h)
v_max_1=v_max/3600;% m/s (Velocidad maxima en m/s)
mu=0.001; %kg/m*s (viscosidad del agua de mar)
```

Cálculo de la sección y diámetro:

$$S = Q / v_{\text{max}} \text{ m}^2$$

$S = 1.9290$

$$D = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot S}{\pi}\right)} \text{ m}$$

$D = 1.5672$

Cálculo del número de Reynolds:

$$Re = (\text{dens} * v_{\text{max}_1} * D) / \mu$$

$$Re = 2.9140e+06$$

Cálculo del factor de rozamiento con la ecuación de Colebrook-White:

$$\begin{aligned} \text{epsr} &= K/D; \\ f &= \text{vpasolve}(1/\sqrt{f} + 2 * \log_{10}((\text{epsr}/3.71) + (2.51/(Re * \sqrt{f}))), f) \end{aligned}$$

$$f =$$

$$0.010337083420045166003903999033426$$

Se calculan las pérdidas con la ecuación de Fanning:

$$\text{sum}_F = (f * L * (v_{\text{max}_1}^2)) / (2 * D * g) \quad \% \text{ m}$$

$$\text{sum}_F =$$

$$0.021806917677460090829768506229771$$

Cálculo de la altura manométrica:

$$H = \text{incr}_Z + \text{sum}_F + \text{incr}_{Pf} \quad \% \text{ m}$$

$$H =$$

$$21.42180691767746009082976850623$$

Se calcula la potencia de la bomba:

$$P = ((Q/3600) * H * \text{dens} * g) / (0.87) \quad \% \text{ W}$$

$$P =$$

$$865507.77690443843271061409139111$$

$$P_{\text{bomba}} = P / 1000 \quad \% \text{ kW}$$

$$P_{\text{bomba}} =$$

$$865.50777690443843271061409139111$$

Finalmente, se calcula el consumo de la bomba:

$$PR = P_{\text{bomba}} / 0.95 \quad \% \text{ kW}$$

PR =

911.06081779414571864275167514854

5. Bomba de agua producto.

Estas bombas son las encargadas de impulsar el agua desde el tanque de agua producto hasta la red de abastecimiento o hasta los camiones cuba. Para el cálculo de la potencia de estas bombas se emplearán los siguientes datos:

```
clc
close all
clear all
syms f

%Datos
L=50; % m (Longitud)
P_inicial=1; % bar (Presion inicial)
P_final=3; % bar (Presion final)
incr_P=P_final-P_inicial; % bar
incr_Pf=incr_P*10.2; % m (se pasa de bares a metros de agua)
incr_Z=10; % m
g=9.8; %m/s2 (Gravedad)

Qp=300000/24; % m3/h
dens=1033; %kg/m3
K=0.000021; % (Rugosidad)
v_max=6480; % m/h (Velocidad maxima en m/h)
v_max_1=v_max/3600;% m/s (Velocidad maxima en m/s)
mu=0.001; %kg/m*s (viscosidad del agua de mar)
```

Cálculo de la sección y diámetro:

```
S=Qp/v_max % m2
```

S = 1.9290

```
D=sqrt(((4*S)/pi)) % m
```

D = 1.5672

Cálculo del número de Reynolds:

```
Re=(dens*v_max_1*D)/mu
```

Re = 2.9140e+06

Cálculo del factor de rozamiento con la ecuación de Colebrook-White:

```
epsr=K/D;
f=vpsolve(1/sqrt(f)+2*log10((epsr/3.71)+(2.51/(Re*sqrt(f)))),f)
```

f =

0.010337083849870095617625711964344

Se calculan las pérdidas con la ecuación de Fanning:

$$\text{sum_F}=(f*L*(v_max_1^2))/(2*D*g) \% m$$

sum_F =

0.054517310089849201477558538175179

Cálculo de la altura manométrica:

$$H=\text{incr_Z}+\text{sum_F}+\text{incr_Pf} \% m$$

H =

30.454517310089849201477558538175

Se calcula la potencia de la bomba:

$$P=((Qp/3600)*H*dens*g)/(0.87) \% W$$

P =

1230456.8188735775040159559231536

$$P_bomba=P/1000 \%kW$$

P_bomba =

1230.4568188735775040159559231536

Finalmente, se calcula el consumo de la bomba:

$$PR=P_bomba/0.95 \% kW$$

PR =

1295.2177040774500042273220243722