

Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías  
Industriales

Desalación de agua de mar basado en microturbina de  
gas solar: Evaluación de costes

Autor: Santiago Benítez Cortijo

Tutores: Lourdes García Rodríguez y Germán López Lara

Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019





Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Desalación de agua de mar basado en microturbina de gas  
solar: Evaluación de costes

Autor:

Santiago Benítez Cortijo

Tutores:

Lourdes García Rodríguez y Germán López Lara  
Catedrática de Máquinas y Motores Térmicos

Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2020

Trabajo de Fin de Grado: Estudio económico de plantas de desalación de ósmosis  
inversa mediante microturbina de gas solar

Autor: Santiago Benítez Cortijo

Tutores: Lourdes García Rodríguez y Germán López Lara

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

*A mis padres.*

En este proyecto se trata el estudio de la viabilidad económica de las plantas de desalación mediante empleo de microturbina solar y su posible acoplamiento a un sistema de ósmosis inversa para desalación de agua de mar, además de empleo de otros tipos de energía para su uso.

En el estudio de los costes de agua nos dan valores de alrededor de 4,4 €/m<sup>3</sup> que es razonable y lo que se estima esperado ya que los valores mínimos obtenidos en aplicaciones eólicas de gran capacidad en lugares muy favorables son de 1,2-1,8 €/m<sup>3</sup> que hace viable nuestro proyecto de planta en cada una de las Ubicaciones, como veremos en nuestro proyecto.

Aunque la OI está muy desarrollada, todavía hay oportunidades para reducir aún más el consumo de energía. Estas oportunidades incluyen: reducción de la incrustación a través del tratamiento previo. El desarrollo de membranas más resistentes al ensuciamiento y a los depósitos de sales; el desarrollo de membranas de alto flujo, es decir, alta permeabilidad que permitan reducir la presión de operación; el desarrollo de membranas resistentes a los oxidantes; la mejora de la configuración mecánica de los módulos de membrana y el diseño de su sistema. Desarrollo de diseños de sistemas.

Para el desarrollo del proyecto se ha realizado un modelo matemático con la herramienta Excel, la cual hemos realizado nuestro estudio en función de la localización y los casos que hemos realizado para determinar el coste del agua que podríamos tener para esta tecnología para ver su viabilidad.

## Índice de tablas

## Índice de figuras

### 1. Introducción

#### 2. Generalidades desalación

##### 2.1 Evolución de las tecnologías de desalación

###### 2.1.1 Procesos térmicos

###### 2.1.2 Tecnologías de membranas (Ósmosis inversa)

###### 2.1.3 Desalación solar

##### 2.2 Uso de la desalación a nivel mundial

### 3. Tecnologías de ósmosis inversa

#### 3.1 Proceso de ósmosis inversa

#### 3.2. Configuraciones de membrana: Configuración de arrollamiento en espiral

#### 3.3 Dispositivos recuperadores de la energía del concentrado

#### 3.4 Energía aportada mediante microturbina de gas solar

#### 3.5 Parámetros de operación del bastidor de membranas de OI (Flujo de agua)

#### 3.6. Sistemas de tratamiento físico

##### 3.6.1 Sistemas de desbaste y tamizado

##### 3.6.2. Sistemas de filtración sobre cartuchos

##### 3.6.3. Sistemas de ultrafiltración

### **3.7 Sistemas de tratamientos químicos**

#### **3.7.1 Coagulación**

#### **3.7.2 Floculación**

#### **3.7.3 Pretratamiento coagulación-floculación en ósmosis inversa**

#### **3.7.4 Desinfección**

#### **3.7.5 Regulación del pH**

#### **3.7.6 Antiincrustantes**

### **3.8 Parámetros que afectan a los procesos de ósmosis inversa**

#### **3.8.1. Polarización**

#### **3.8.2 Ensuciamiento de la membrana**

##### **3.8.2.1 Ensuciamiento coloidal**

##### **3.8.2.2 Ensuciamiento orgánico y biológico**

### **4. Membranas de ósmosis inversa**

#### **4.1 Membranas LG NanoH2O**

##### **4.1.1 LG Chem lidera el camino en tecnología de membrana**

##### **4.1.2 Ventajas membranas LG NanoH2O**

#### **4.2 Toray (TM280A-370)**

#### **4.3 SWC6 – 4040**

#### **4.4 Dow-Filmtec-SW30HRLE-440i**

### **5. Cálculo de costes de la desalación por ósmosis inversa mediante SMTG**

#### **5.1 Análisis costos desalación por ósmosis inversa**

##### **5.1.1 Literatura sobre revisiones de costos de desalación y correlaciones.**

###### **5.1.1.1. Metodologías para el cálculo de los costos de desalación**

*- Indicadores de evaluación de inversiones*

*- Revisión de metodologías utilizadas para calcular los costos de desalación.*

*- Ejemplo de caso práctico: Aplicación a Brasil*

###### **5.1.1.2. Costos de equipos**

###### **5.1.1.3. Otros costos de capital**

###### **5.1.1.4. Energía**

###### **5.1.1.5. Otros costos operativos**

###### **5.1.1.6. Producción de agua ( $M_w$ , t)**

###### **5.1.1.7. Tasa de descuento (i)**

### **5.2 Cálculo del consumo energético del sistema de desalación: RESULTADOS DEL SOFTWARE (LG NanoH2O)**

**5.3. Escenario de diversos países en cuanto a salarios y costes financieros**

**5.4 Comportamiento de la microturbina de gas solar (SMGT)**

**5.5 Evaluación de costes de la desalación de agua de mar mediante SMGT**

**5.5.1. Costes de capital**

**5.5.2. Costes de operación**

**5.5.3. Costes de agua**

**6. Conclusiones**

**Referencias**

## Índice de tablas

---

Tabla 3.1 Valores referenciales y modelos iSave

Tabla 3.2 Coste de electricidad para varias localización y tecnologías SR, IRC, ICRR, PV, Dish Stirling)

Tabla 3.3 Valores TDS para distintos tipos de agua

Tabla 4.1 Categorías/usos para LG NanoH<sub>2</sub>O

Tabla 4.2 Tecnología membranas TORAY

Tabla 4.3 Valores límites de operación TORAY

Tabla 4.4 Valores tecnología membranas SWC6-4040

Tabla 4.5 Especificaciones producto DOW™ FILMTEC™ SW30HRLE-440i

Tabla 4.6 Valores límites de operación DOW™ FILMTEC™ SW30HRLE-440i

Tabla 5.1 Análisis de costes de mantenimiento en desalación

Tabla 5.2 Análisis de disponibilidad (porcentaje de tiempo operación anual) en desalación

Tabla 5.3 Dato de casos de agua de mar en las diferentes localizaciones de las plantas

Tabla 5.4 Coeficiente de Coeficiente salarios/costes financieros

Tabla 5.5 Coeficiente de equivalencia de salarios.

Tabla 5.6 Resultados del trabajo de M. Rollán: Caracterización de captador, receptor y mGT para distintos diámetros del disco parabólico.

Tabla 5.7 Resultados del trabajo de M. Rollán: Caracterización de captador, receptor y mGT para distintos diámetros del disco parabólico.

Tabla 5.8 Datos de referencia de costes de una planta de desalación de agua de mar a gran escala [Wilf, 2007].

Tabla 5.9 Datos de referencia de costes de una planta de desalación de agua de mar a gran escala [Wilf, 2007].

Tabla 5.10 . Cálculo parcial de costes de capital en Canarias y Fortaleza.

Tabla 5.11 . Cálculo del total de costes de capital en Canarias y Fortaleza.

Tabla 5.12 . Cálculo parcial de costes de capital en Casablanca y Hong Kong.

Tabla 5.13. Cálculo del total de costes de capital en Casablanca y Hong Kong.

Tabla 5.14. Cálculo parcial de costes de capital en Durban.

Tabla 5.15. Cálculo del total de costes de capital en Durban.

Tabla 5.16. Cálculo del coste variable de operación y mantenimiento.

Tabla 5.17. Cálculo del coste fijo y total de operación y mantenimiento.

Tabla 5.18. Cálculo del coste variable de operación y mantenimiento para  $DIN > 700 \text{ W/m}^2$ .

Tabla 5.19. Cálculo del coste fijo y total de operación y mantenimiento para  $DIN > 700 \text{ W/m}^2$ .

Tabla 5.20. Cálculo del coste variable de operación y mantenimiento para  $DIN > 600 \text{ W/m}^2$ .

Tabla 5.21. Cálculo del coste fijo y total de operación y mantenimiento para  $DIN > 600 \text{ W/m}^2$ .

Tabla 5.22. Cálculo del coste variable de operación y mantenimiento para  $DIN > 500 \text{ W/m}^2$ .

Tabla 5.23. Cálculo del coste fijo y total de operación y mantenimiento para  $DIN > 500 \text{ W/m}^2$ .

Tabla 5.24. Cálculo del coste fijo de agua.

Tabla 5.23. Cálculo del coste variable y total de agua.

Tabla 5.25. Cálculo del coste fijo de agua en Canarias y Fortaleza.

Tabla 5.26. Cálculo del coste variable y total de agua en Canarias y Fortaleza.

Tabla 5.27. Cálculo del coste fijo de agua en Durban, Casablanca y Hong Kong.

Tabla 5.28. Cálculo del coste variable y total de agua en Durban, Casablanca y Hong Kong.

## Índice de figuras

---

Figura 2.1 Capacidad instalada mundial de desalación.

Figura 2.2 Contenido en sales agua alimentación (mg/l).

Figura 2.3 Capacidad de desalación de agua de mar instalada

Figura 2.4 Capacidad/Números plantas de desalación de agua de mar instaladas

Figura 3.1 Flujo disolvente sistema ósmosis inversa

Figura 3.2 Situaciones iniciales/finales ósmosis directa

Figura 3.3 Configuración arrollamiento en espiral

Figura 3.4 Tecnología de ósmosis inversa con recuperación energética basada en cámara isobárica (ERI PX)

Figura 3.5 Etapas procesos energéticos/alta presión en bomba/turbocharger.

Figura 3.6 Gráfica funcionamiento tecnología iSave Danfoss

Figura 3.7 Esquema del sistema y de la microturbina de gas en detalle

Figura 3.8 Proceso flujo de agua

Figura 3.9 Sistemas de filtración sobre cartuchos

Figura 3.10 Sistemas de ultrafiltración

Figura 3.11 Gráfico tratamiento ósmosis inversa

Figura 3.12 Proceso polarización

Figura 3.13 Limpieza de membranas

Figura 4.1 Tecnología ósmosis inversa

Figura 4.2 Uso para diferentes sectores de Membranas LG NanoH<sub>2</sub>O

Figura 5.1 Precios industria eléctrica en sudeste Europa

Figura 5.2 Resultados obtenidos con software LG NanoH<sub>2</sub>O: Islas Canarias

Figura 5.3 Resultados obtenidos con software LG NanoH<sub>2</sub>O: Mediterráneo

Figura 5.4 Esquema conceptual de una microturbina de gas solar.

Figura 5.5 Eficiencia del concentrador (dish), del receptor (rcv) y del captador solar en su conjunto (producto de ambas).

## Notación

---

OI	Ósmosis inversa
ppm	Partes por millón
$J_w$	Caudal de solvente, litros por hora
A	Coficiente de permeabilidad de la membrana
$\Delta P$	Presión diferencial transmembrana
$\Delta \pi$	Presión osmótica diferencial
VPN	Valor Presente Neto
PIR	Tasa Interna de Retorno
PD	Período de Devolución
$R_t$	Ingresos de la venta de agua producida
LCOE	Costo de electricidad nivelado
LCOW	Costo nivelado del Agua
$C_t$	Costo anual de operación
$M_w$	Cantidad de agua producida en el año
CF	Costes fijos anuales
CV	Costes variables
SCOW	Costo simplificado del agua
$C_p$	Costo del agua
r	Aumento anual
$C_{E,t}$	Consumo específico de energía
$P_{el} / P_{th}$	Costo de la energía
i	Tasa de descuento
$Q_p$	Caudal de producción

$Q_{inhab}$	Agua diaria
$Q_{cap}$	Captura de tasa de flujo en m
$A_{rec}$	Recuperación de agua
$C_e$	Consumo de energía en kWh
$C_{ee}$	Consumo típico de energía eléctrica
$C_F$	Factor de capacidad
$C_{ce}$	Costo energético en USD/año.
$C_{om}$	Costo de operación y mantenimiento
$C_{labor}$	Costos laborales
$C_{chem}$	Costo de productos químicos
$C_{ce}$	Costos de energía
$Q_n$	Flujo producido cada año
$\eta_{mGT}$	Eficiencia Microturbina
$\dot{m}_{air}$	Flujo de aire

# 1. INTRODUCCIÓN

---

**E**ste trabajo aborda una tecnología novedosa, de la cual no existe aún ningún prototipo completo implementado con la finalidad de realizar una primera valoración de costes. Se trata de un sistema de desalación por ósmosis inversa alimentado por la electricidad producida por una microturbina de gas solar.

El principal objetivo del trabajo es realizar un estudio económico preliminar en distintas localizaciones geográficas.

La metodología aplicada es la siguiente:

- Se utiliza la base de datos de recursos solares METEONORM para obtener archivos Excel que permitirán el cálculo de horas anuales de operación de la microturbina de gas solar.
- Una vez comprendida y descritas las tecnologías que se tratan en esta memoria, se realiza una revisión bibliográfica de los procedimientos utilizados en la literatura para valorar los costes del agua desalada.
- Finalmente se implementa la herramienta de cálculo, se aplican a diversas localizaciones geográficas y se obtienen resultados y conclusiones útiles para valorar el uso de la desalación mediante microturbina de gas solar en sistemas de pequeña potencia conectados a red.

## 2. GENERALIDADES DESALACIÓN

---

La desalación debe ser considerada como una opción más de la planificación hidrológica, se trata la desalación de una tecnología de tratamiento de aguas que permite incorporar como agua potable recursos no aprovechables de otro modo (aguas salobres o de mar)

### 2.1 Evolución de las tecnologías de desalación

#### 2.1.1 Procesos térmicos

Los procesos térmicos llevan en uso desde hace miles de años; se realizaba por medio de la evaporación del agua de mar y su posterior condensación para obtener agua dulce. Las tecnologías térmicas de desalación eran las que mayor capacidad instalada poseían hace décadas.

Algunas de las ventajas que presentaban los procesos térmicos eran los siguientes:

- Tecnologías adecuadas para alimentaciones con alto contenido en sales
- Presentan robustez en su operación
- Permiten un fácil acoplamiento con plantas de potencia, dando lugar a la cogeneración.

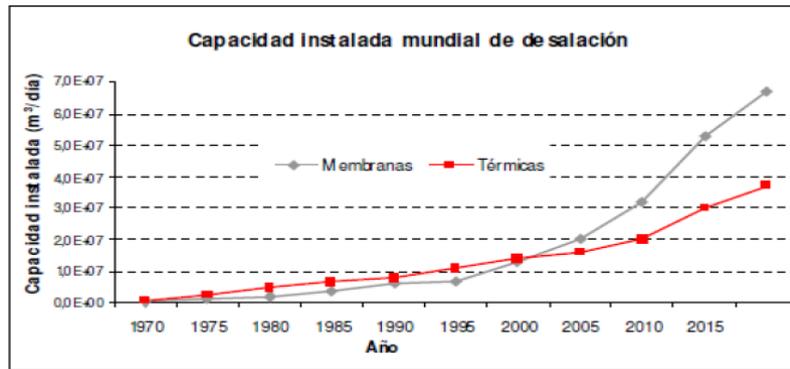
#### 2.1.2 Tecnologías de membranas (Ósmosis inversa)

En 1886, fue van't Hoff quien desarrolló e investigó sobre el uso de la ósmosis inversa (OI). Sin embargo, este tipo de fenómeno apenas tiene relativamente poco tiempo de uso, ya que fue en los años 50 del siglo XX cuando se desarrollaron los primeros ensayos de ósmosis inversa con membranas de acetato de celulosa.

La primera planta de gran escala con este tipo de tecnología fue en la década de los 80. Actualmente, lo que se busca es la optimización y la reducción de costes en las plantas implementadas con ósmosis inversa. Emplean este tipo de tecnología, basada en la separación del disolvente a través de una membrana semipermeable.

El diseño específico de cada planta se ajusta a la calidad del agua de alimentación y a la calidad exigida por el uso al que se vaya a destinar. Uno de los puntos clave de la ósmosis inversa es que necesita un pretratamiento adecuado para maximizar la vida útil de las membranas. Se han obtenido grandes avances en la reducción de los consumos energéticos en estos años, siendo actualmente el consumo principal aproximadamente de 2 kWh/m<sup>3</sup> producido para el agua de mar en condiciones de Canarias.

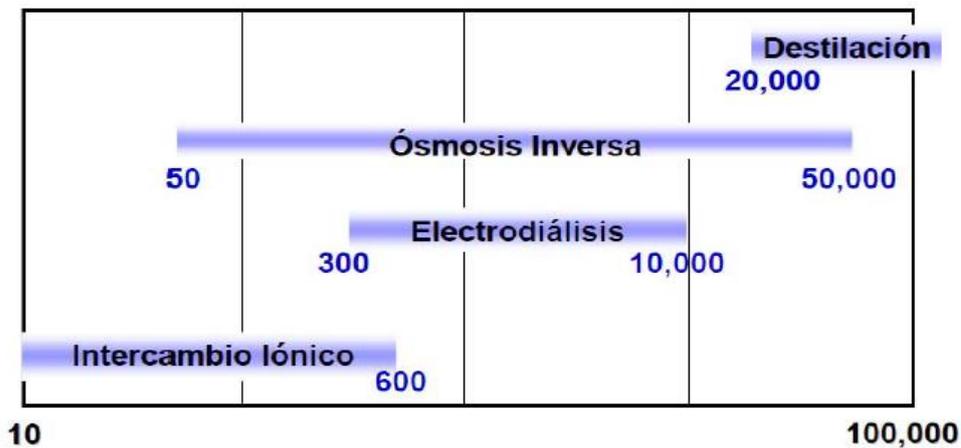
En la siguiente gráfica (Figura 2.1) vemos la evolución de las tecnologías de desalación de agua de mar implementada, donde podemos contemplar la tendencia en los últimos años (esta gráfica llega hasta el año 2015).



**Figura 2.1 Capacidad instalada mundial de desalación.**

La ósmosis inversa ha superado a los procesos térmicos, incluso tomando un repunte mucho mayor en la última década hasta la actualidad.

En la siguiente gráfica (Figura 2.2) podemos ver los distintos sistemas de desalación que se emplean según el contenido de sales del agua de alimentación para aplicar estas tecnologías.



**Figura 2.2 Contenido en sales agua alimentación (mg/l).**

En este apartado hemos tomado de referencia las diapositivas que tenemos de la asignatura de 4º de Tratamiento de aguas (GITI).

### 2.1.3 Desalación solar

Esta sección analiza la desalación solar, siendo la tecnología solar fotovoltaica / OI la tecnología competidora de la desalación mediante microturbina de gas solar, analizada en este trabajo. En este apartado se resumen los aspectos más relevantes del trabajo de revisión publicado por Buenaventura y García-Rodríguez (2018).

La tecnología fotovoltaica conectada a un sistema de OI es comercial desde los años 90 del siglo XX. Como ejemplo, el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC, España) desarrolló un sistema aislado de la red, disponible hasta 100 m³/d de capacidad nominal. La energía fotovoltaica podría competir con la energía convencional en casos específicos debido a la larga distancia a la red eléctrica. Los sistemas de OI alimentados por campos fotovoltaicos normalmente incluyen baterías. Este concepto consiste en diseñar la planta de OI con la capacidad de ajustar la entrada de energía variable, minimizando así los requisitos de la batería para su uso.

La desalación de agua solar a la menor escala de la demanda de agua dulce más adecuada en casos de baja concentración de agua salobre es la electrodiálisis solar fotovoltaica (ED). Se han implementado varias plantas piloto de sistemas ED conectados a células fotovoltaicas mediante baterías. En las áreas remotas, los requisitos de mantenimiento y suministro de productos químicos se deben tener en cuenta en la primera etapa de la selección del proceso, siendo la tecnología solar de ED más adecuada para el agua salobre que la OI solar. Este tipo de plantas incluso podrían operarse de forma discontinua, permitiendo así una operación simple sin baterías. Esta es una importante ventaja en comparación con el agua salobre OI en caso de pequeñas demandas de agua dulce que hemos obtenido en [3].

Cuando se piensa en una planta de OI alimentada por una planta solar, la demanda de energía se define por la planta de desalación. Las plantas de desalación están diseñadas típicamente para funcionar al 100% de su capacidad las 24 horas del día y tratando de maximizar la disponibilidad de la planta para reducir el costo por  $m^3$  de agua de producto. Por lo tanto, el perfil de producción de energía discontinua de una planta de energía solar no coincide con el funcionamiento óptimo de una planta de desalación durante las 24 horas del día. En este punto es necesario tomar una decisión sobre el concepto de desalación solar.

En desalación a gran escala, otro concepto relacionado es la producción de agua distribuida, que es inherente a la gestión del suministro de agua. A veces la población se distribuye a lo largo de la costa con un patrón y una orografía que hacen la opción más adecuada para implementar dos plantas de desalación diferentes en lugar de una. Además, hay que tener en cuenta que a veces la mejor ubicación de la nueva planta de OI estará junto a la planta de producción de energía convencional existente.

Con carácter general, las principales conclusiones señaladas con respecto a las soluciones viables para un mercado potencial de desalación con energía solar térmica a partir del análisis realizado son las siguientes según [3]:

- Los sistemas de destilación por membrana, cuando estén completamente desarrollados, tendrán oportunidades de mercado en sistemas de desalación de agua de mar de muy pequeña capacidad. El principal inconveniente son los requisitos del uso de un cierto caudal adicional de agua de mar de refrigeración como cualquier otra tecnología de destilación. De lo contrario, se obtiene un bajo porcentaje de extracción de disolvente en el proceso de desalación.
- Los procesos de destilación convencionales, la destilación multiefecto y la destilación flas multietapa muestran un consumo de energía solar demasiado alto como para competir con la ósmosis inversa solar para la desalación del agua de mar. Por lo tanto, también se rechaza la integración de procesos de destilación en plantas de potencia solares basadas en ciclos de Rankine.
- Los únicos sistemas independientes con oportunidades de mercado de hasta 20.000  $m^3/d$  se basan en ósmosis inversa consumiendo electricidad aportada por:
  - Ciclos orgánicos de Rankine alimentados por captadores solares de concentración.
  - Discos parabólicos con microturbina de gas, que son concentradores solares en forma de paraboloide de revolución en cuyo foco puntual se coloca una micro turbina de gas. Son útiles en caso de una demanda limitada de agua. Una sola unidad podría producir aproximadamente 10  $m^3/h$  de agua dulce a partir de agua de mar.

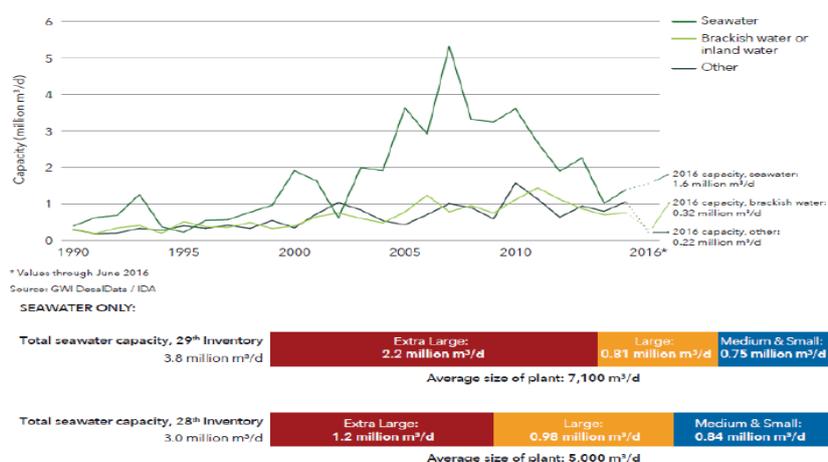
En plantas de energía solar térmica autónomas, en comparación con las plantas de desalación solar con respaldo de energía convencional, se requiere aproximadamente el doble tamaño del campo solar que la demanda nominal de la planta de desalación. Además se precisaría aproximadamente capacidad nominal de la planta de desalación doble de la demanda de agua diaria, dado que operaría aproximadamente 12 h / d. Por lo tanto, el diseño de la planta de desalación solar sin respaldo de energía convencional resulta en un aumento significativo del costo de capital. Además, la operación y el mantenimiento también se incrementan debido a la operación discontinua de la planta de desalación.

La principal ventaja de ambas opciones, uso de solar térmica en comparación con la desalación PV-OI es el posible uso del almacenamiento térmico en lugar de las baterías. Si es posible, se recomienda utilizar la red eléctrica como respaldo de energía. Las calderas alimentadas con combustibles fósiles no se recomiendan como respaldo energético de los ciclos de Rankine orgánicos. Debe también considerarse que las micro turbinas de gas solares tienen la ventaja de la disponibilidad de rechazo de calor, que permite el concepto evaporar el

concentrado logrando descarga de líquido nula (ZLD). Esta característica singular puede aportar un valor económico adicional a esta tecnología [3].

## 2.2 Uso de la desalación a nivel mundial

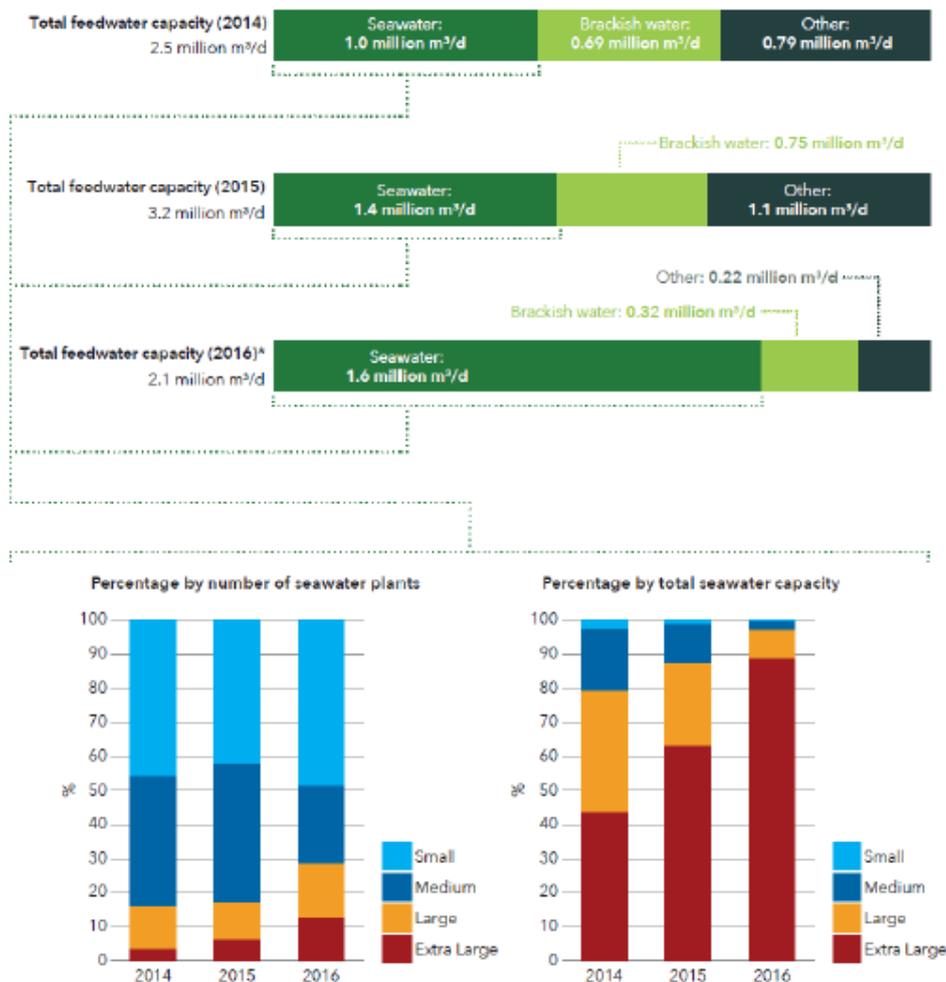
En la presentación de Francisco Virgili (2016) podemos ver en la figura 2.3 la mayor parte de esta capacidad mundial de desalación instalada va enfocada al agua de mar, suponiendo en este caso cerca del 75% para este tipo de aguas. Viendo que la mayor parte de los esfuerzos va orientada a ello, abajo de la gráfica vemos los distintos tamaños que podemos emplear en función de las capacidades que puedan trabajar.



**Figura 2.3 Capacidad de desalación de agua de mar instalada**

Con respecto al inventario mundial de plantas de 2016 y 2015 de la IDA (*International Desalination Association*) (29<sup>th</sup> Inventory con 28<sup>th</sup> Inventory de la figura 2.3), el tamaño aumenta más de un 40% en así como la capacidad que ha aumentado más de un 20%. Todos estos datos se obtienen a partir de valores del año 2016.

En [2] podemos ver en la figura 2.4, el porcentaje de los últimos años de las plantas para agua de mar supone algo más del 50% formadas por las pequeñas aunque su capacidad es más pequeña comparadas con las de mayor tamaño.



**Figura 2.4 Capacidad/Números plantas de desalación de agua de mar instaladas**

De hecho las de mayor tamaño va aumentando su presencia con algo más del 10%, dando lugar a una capacidad de cerca del 90% del agua que estamos tratando, tanto es así que su capacidad acapara la del resto de plantas.

Entre las fuentes de energía analizadas en [2], el gas natural se destaca como la fuente más viable para los procesos de desalación. Su costo para satisfacer las necesidades energéticas de la planta de OI fue el más bajo. Además, se considera una fuente de bajo impacto ambiental; Sus reservas están ubicadas en la costa donde se encuentra una mayor demanda de agua potable, lo que representa una mayor facilidad para utilizar el agua de mar.

La desalación puede llegar a ser de gran importancia para el desarrollo de la matriz hídrica del país que vayamos a tratar, ya que presenta el potencial para suministrar agua a poblaciones y diversos sectores que actualmente enfrentan problemas relacionados con la disponibilidad de agua, apoyando el desarrollo más sostenible.

# 3. TECNOLOGÍA DE ÓSMOSIS INVERSA

## 3.1 Proceso de ósmosis inversa

A partir de la información proporcionada por Lourdes García-Rodríguez sobre ecuaciones de transporte, en el proceso de ósmosis inversa funciona de forma que el flujo de disolvente contrario al sentido espontáneo debido a la aplicación de una presión externa, tal como se observa en la siguiente figura:

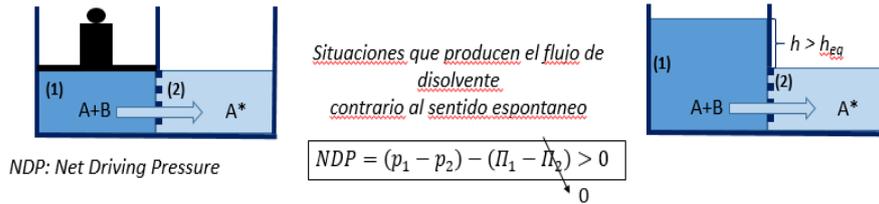


Figura 3.1 Flujo disolvente sistema ósmosis inversa

Según [4] el proceso se inicia debido a que inicialmente la fuerza motriz del proceso (NDP, Net Driving Pressure) es positivo – ver la correspondiente expresión en la anterior figura. La situación final de la figura 3.1 donde el disolvente puro y disolución están separados por una membrana semipermeable al disolvente A con diferencia de presiones manifestada por una diferencia de alturas menor que la inicial, así tiene lugar el equilibrio osmótico.

Pudiendo ver en la siguiente figura 3.2 las situaciones iniciales y finales con las que nos encontramos en el proceso espontáneo de transferencia de disolvente, llamado ósmosis directa, correspondiente al valor de la definición de NDP negativa.

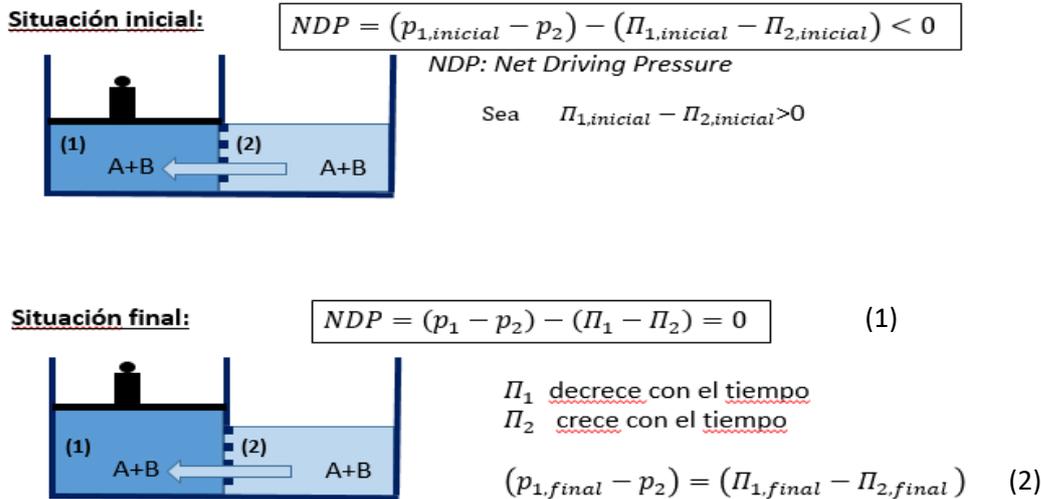


Figura 3.2 Situaciones iniciales/finales ósmosis directa

Los siguientes subapartados describen los principales elementos del núcleo productivo de una planta de OI. La alimentación es presurizada para lograr que se produzca el proceso de OI en las membranas. A su salida se forma el permeado (producto) y queda un flujo de concentrado que no ha atravesado la membrana. La presión del concentrado es algo inferior a la de la alimentación a la entrada del llamado bastidor de membranas. Por tanto, en desalación de agua de mar siempre se utilizan dispositivos de recuperación de la energía del concentrado con el objetivo de minimizar el consumo energético de la planta.

### 3.2. Configuraciones de membrana: Configuración de arrollamiento en espiral

La configuración más empleada según [1] para los módulos de membranas del proceso de ósmosis inversa es el de arrollamiento en espiral (ver figura 3.3), ya que otras que hemos buscado e investigado están en desuso, y esta es la única empleada actualmente. Varios de estos módulos 7-8 se instalan en serie ensamblados en el interior de un cilindro denominado tubo de presión.

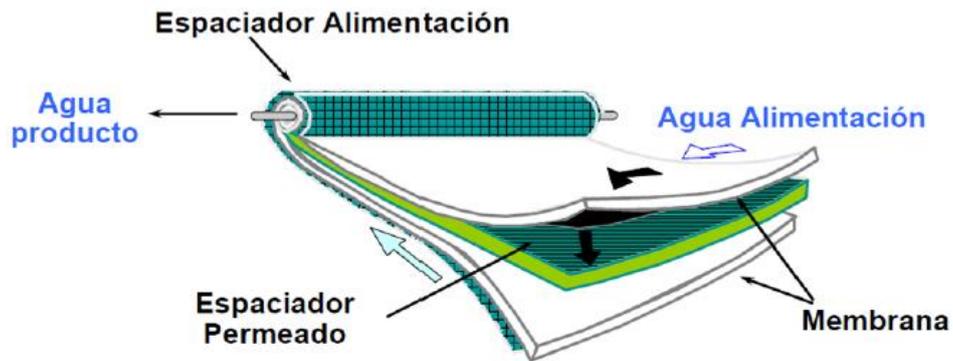


Figura 3.3 Configuración arrollamiento en espiral

### 3.3 Dispositivos recuperadores de la energía del concentrado

Algunos ejemplos representativos de los que nos podemos encontrar en el mercado de los dispositivos que aprovechan la energía del concentrado a la salida del bastidor de membranas de ósmosis inversa son:

- **AT Turbocharger (Advanced Turbo):** Según [5] es una solución flexible que simplifica el sistema de desalación OI y mantiene su fiabilidad operativa. Se instalan en serie con la bomba de alta presión, a la salida de esta, reduciendo así la presión de salida de esta bomba.
- **ERI-PX – ver figura 3.4 -:** Según [5] es una solución de recuperación de energía de bajo costo y alto rendimiento para sistemas de desalación de OI que reduce el caudal que atraviesa las bombas de alta presión, minimizando el consumo de energía. Se instalan en paralelo con la bomba de alta presión y requieren la instalación de una pequeña bomba de circulación a la salida. Este tipo de dispositivos se denominan cámaras isobáricas y se instalan varias unidades en paralelo según se aprecia en la figura para evitar pulsación.

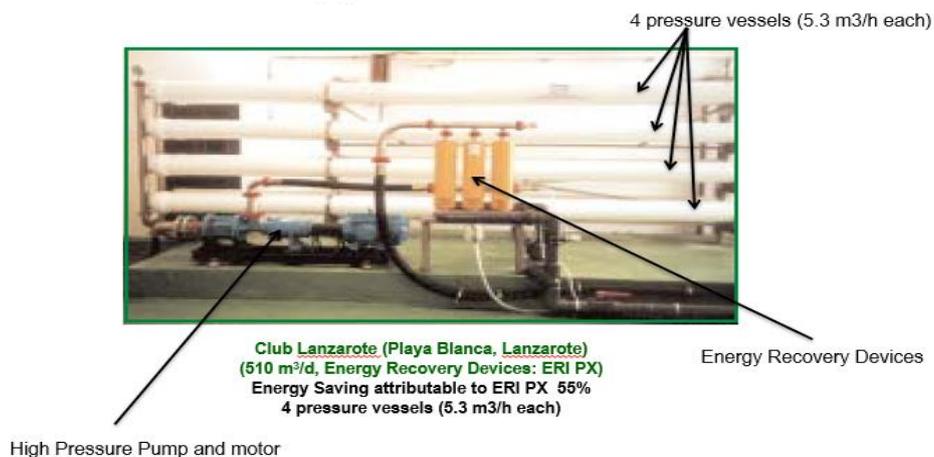


Figura 3.4 Tecnología de ósmosis inversa con recuperación energética basada en cámara isobárica (ERI PX)

- **Turbocharger ERI (LPT):** Según [5] es una solución de recuperación de energía de bajo costo y alto rendimiento para sistemas de desalación de OI de baja presión utilizados en el caso de desalación de agua salobre, minimizando el consumo de energía. Este dispositivo ofrece muchos beneficios, que incluyen un tamaño compacto, fiabilidad y durabilidad a largo plazo. El turbocharger LPT ofrece a los operadores las ventajas del aumento de presión de baja presión entre etapas para equilibrar el flujo entre etapas. Se instala como [5] muestra la figura 3.5 en los sistemas de ósmosis inversa de múltiples etapas, logrando la recuperación de energía a un precio asequible.

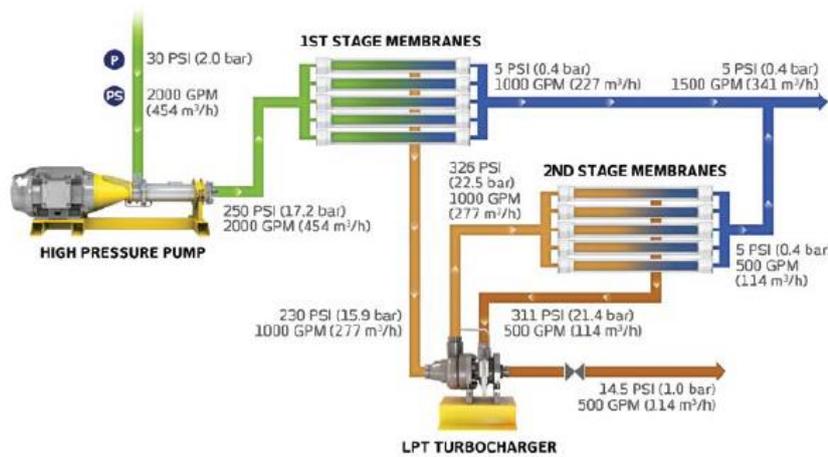


Figura 3.5 Etapas procesos energéticos/alta presión en bomba/turbocharger.

- **DANFOSS i-Save:** Según [6] el i-Save de Danfoss es un dispositivo de recuperación de energía (ERD, por sus siglas en inglés) patentado y sumamente eficiente que garantiza la alimentación de membrana en los sistemas de ósmosis inversa de agua de mar de cualquier tamaño, ya sea en aplicaciones en tierra, mar o portátiles. Con una eficiencia de hasta el 92 %, el i-Save de Danfoss recupera la energía de presión del caudal de rechazo de la membrana y la transfiere directamente al caudal de alimentación de la membrana.

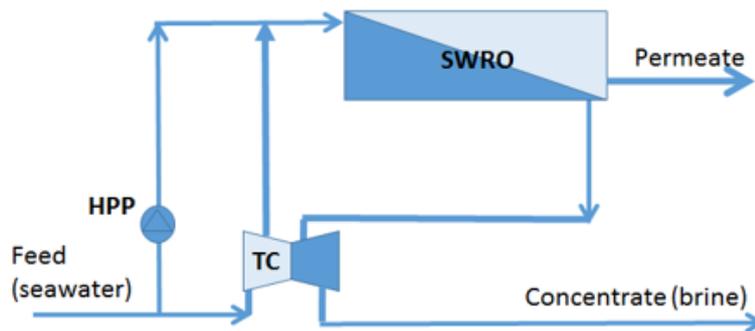


Figura 3.6 Gráfica funcionamiento tecnología i-Save Danfoss según [4]

Disponibles en tamaños que van de los 21 m<sup>3</sup>/h a los 70 m<sup>3</sup>/h, el i-Save de Danfoss es el primer dispositivo de recuperación energética del mercado que combina el dispositivo rotativo, una bomba *booster* de alta presión y un motor eléctrico en una única solución 3 en 1 completamente integrada y de fácil manejo.

La bomba APP (*Axial Piston Pump*) de Danfoss es el complemento perfecto para el iSave de Danfoss. Las ligeras y compactas bombas de pistones axiales están especialmente diseñadas para trabajar con líquidos corrosivos de baja viscosidad a alta presión. Autolubricadas y fabricadas íntegramente con materiales no corrosivos (acero inoxidable dúplex/superdúplex, PEEK reforzado con fibra de carbono), las bombas APP de Danfoss ofrecen un caudal constante a lo largo de toda su dilatada vida útil, sin ruido, ni preocupaciones ni mantenimientos innecesarios.

iSave de Danfoss nos permite obtener un casi perfecto índice de transferencia energética garantizando un ahorro energético de hasta un 60 % superior al de los sistemas sin recuperación de energía. El innovador diseño 3 en 1 del iSave cuenta con las dimensiones más compactas de toda la categoría ERD, lo que permite aumentar la producción de agua potable en menos espacio.

Los diseñadores de sistemas disfrutan de mayor libertad de movimiento con el iSave de Danfoss. El compacto iSave ofrece mayor flexibilidad en el diseño gracias a que reduce la necesidad de tuberías y dispone de una amplia gama de opciones de caudal, que pueden llegar a ampliarse de forma segura mediante la instalación de dos o más dispositivos iSave en paralelo.

En [6] la unidad iSave de Danfoss ha sido diseñada para funcionar de forma automática y prácticamente sin incidencias. El giro del rotor está controlado por un motor eléctrico, lo que elimina por completo el riesgo de desbordamiento/exceso de revoluciones durante su puesta en marcha y funcionamiento. Esta característica convierte al dispositivo iSave en la solución ideal si su sistema de ósmosis inversa de agua de mar depende de personas con diferentes niveles de conocimientos y de las circunstancias con las que estemos trabajando.

Este dispositivo de Danfoss nos ofrece una gran fiabilidad y un escaso nivel de mantenimiento. Debido a su motor eléctrico de transmisión directa y su diseño 3 en 1 autolubricado y sin tuberías, el mantenimiento del iSave no solo es muy sencillo, sino que se puede realizar *in situ*.

Los componentes del dispositivo iSave de Danfoss, que se basa en el principio demostrado de la recuperación de energía, son de polímeros o de acero inoxidable dúplex/superdúplex resistente a la corrosión. Su diseño, que utiliza una única junta mecánica de baja presión, también elimina la necesidad de contar con una junta del eje de alta presión.

El uso de una bomba de desplazamiento positivo como bomba *booster* ofrece la garantía de que el iSave suministrará un caudal constante en todo momento, independientemente de los cambios de presión. Donde otros ERD isobáricos sufrirían para producir flujos uniformes en la línea de concentrado si la presión diferencial presentase alteraciones, el iSave continúa suministrando la cantidad idónea de alimentación a membrana.

iSave 21 Plus	iSave 40	iSave 50	iSave 70
Caudal: 6-22 m <sup>3</sup> /h 26-96 gpm	Caudal: 21-41 m <sup>3</sup> /h 92-181 gpm	Caudal: 42-52 m <sup>3</sup> /h 184-228 gpm	Caudal: 50-70 m <sup>3</sup> /h 220-308 gpm
Presión máx. de salida: 83 barg (1203 psig)	Presión máx. de salida: 83 barg (1203 psig)	Presión máx. de salida: 83 barg (1203 psig)	Presión máx. de salida: 70 barg (1015 psig)
Presión diferencial máx.: 5 barg (72 psig)			
Velocidad: 500-1500 rpm	Velocidad: 600-1200 rpm	Velocidad: 525-650 rpm	Velocidad: 625-875 rpm

**Tabla 3.1 Valores referenciales y modelos iSave – se indican presiones manométricas (gauge pressure) -.**

En la tabla 3.1 de [6] se nos dan valores referenciales y de los distintos modelos que podemos tener a nuestro alcance de iSave según el tipo de caudal y presiones diferenciales en función de las condiciones que nos encontremos para la variedad de velocidades que podemos trabajar con esta tecnología.

### 3.4 Energía aportada mediante microturbina de gas solar

La microturbina de gas es la máquina encargada de transformar la potencia térmica aportada en el receptor solar en potencia eléctrica. Es una pequeña turbina regenerativa constituida por un compresor y una turbina, un recuperador y un alternador de alta velocidad, así como una cámara de combustión si se desea instalar energía convencional de respaldo. Tanto el compresor como la turbina son del tipo centrífugo debido a que el gasto másico es muy pequeño al igual que el tamaño de estos dos componentes. El compresor y la turbina están montados en el mismo eje de forma que giran a la misma velocidad. El generador eléctrico convierte la potencia mecánica del eje en potencia eléctrica. La microturbina de gas incluye además un recuperador que permite realizar un intercambio de calor entre los gases de escape calientes de la turbina y la entrada de aire al receptor solar, de forma que aumenta notablemente el rendimiento del ciclo tomando como referencia en este texto [14].

Se considera además en [14] que la microturbina de gas incluye una cámara de combustión que convierte el sistema en híbrido solar-convencional. Sin embargo, el sistema se diseña para hacer uso solo de la energía del sol en el punto de diseño. El fluido de trabajo considerado es aire. Los distintos estados por los que pasa el gas son representados en la figura 3.7.

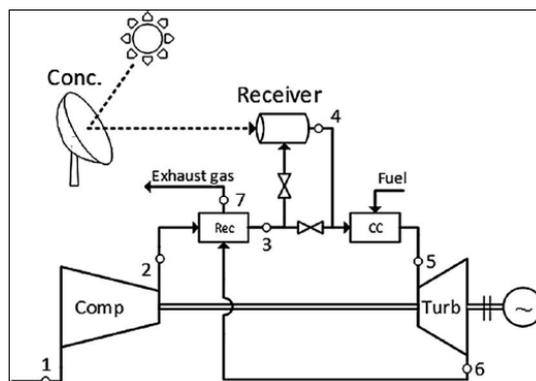


Figura 3.7 Esquema del sistema y de la microturbina de gas solar en detalle

El análisis de costo normalizado de la electricidad según [15] reveló que los discos parabólicos/mGT son más rentables que la tecnología de discos parabólicos con motor Stirling y, en ciertas ubicaciones, incluso podrían llegar a ser competitivos en costos contra los paneles fotovoltaicos. Esto se muestra en la tabla 3.1, donde se compara el costo de la electricidad de los sistemas Disco-mGT con diferentes diseños de motores con el de la energía fotovoltaica y tecnología Disco-Stirling, considerando la venta a la red de la electricidad producida. Se observa que estos costos se aplican a los sistemas de energía solar solamente (sin respaldo de combustible) con salidas eléctricas en el rango entre 15 y 25 kWe y para el año meteorológico típico en el sitio. Se hace visible que, a pequeña escala, los sistemas Dish-mGT pueden potencialmente superar a PV en [15].

LCoE [c€/kWh]	SR	ICR	ICRR	PV	Dish Stirling
South Africa	7.8	7.7	7.5	9.2	12
Morocco	10.4	10.4	10.1	10.9	15.5
China	18.3	18.3	17.5	13.4	27.0

Tabla 3.2 Coste de electricidad para varias localización y tecnologías SR, IRC, ICRR, PV, Dish Stirling)

### 3.5 Parámetros de operación del bastidor de membranas de OI (Flujo de agua)

La siguiente figura que vemos en [1] describe el proceso de separación en el bastidor de membranas de un sistema de ósmosis inversa.

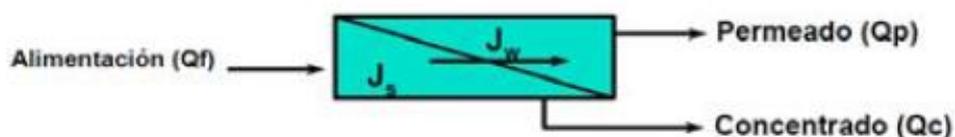


Figura 3.8 Proceso flujo de agua

La siguiente ecuación describe el transporte de disolvente a través de las membranas de ósmosis inversa.

$$J_w = A(\Delta P - \Delta \pi) \quad (3)$$

$J_w$  = flujo del solvente, litros por hora y  $m^2$  de membrana

A = coeficiente de permeabilidad de la membrana

$\Delta P$  = presión diferencial transmembrana, bar

$\Delta \pi$  = presión osmótica diferencial en la superficie de la membrana, bar

En la tabla 3.2 se representa los valores del agua en función del tipo que vayamos a tratar, a tener en cuenta que 1000 ppm de sales en solución equivalen a una presión de 0,77 kg/cm<sup>2</sup> por ello:

Tipos de agua	Valores TDS (ppm)
Agua salobre de baja concentración	1500
Agua salobre	5000
Agua salobre de alta concentración	12000
Agua de mar	35000
Agua de mar muy salina	>35000

**Tabla 3.3 Valores TDS para distintos tipos de agua**

### 3.6. Sistemas de tratamiento físico

Según [1] existen tratamientos físicos para eliminar del agua partículas, grasas, elementos asociados a sólidos en suspensión, etc. Básicamente aquellos componentes del agua no disueltos que pueden ser separados por una barrera física.

Vamos a desarrollar algunos de estos sistemas que se utilizan para realizar este pretratamiento que estamos viendo.

#### 3.6.1 Sistemas de desbaste y tamizado

En estos sistemas según [1], la diferencia con los sistemas convencionales en tratamiento de aguas, se trata sobre todo en:

- Materiales adecuados que resistan la corrosión.
- Aceros inoxidable o aleaciones de alta calidad.
- Equipos caros.

Son imprescindibles en tomas de agua de mar abierto y aguas superficiales, menos necesarios o innecesarios cuando las tomas son procedentes de pozos playeros. Aquí vemos algunas medidas del tamizado a emplear:

- Macrotamizado: Pasos superiores a 0,2 – 0,3 mm
- Microtamizado: Con pasos del entorno de micras (por ejemplo 100 micras).

En plantas de desalación de agua de mar la captación es realiza normalmente mediante pozos playeros.

### 3.6.2. Sistemas de filtración sobre cartuchos

Última etapa de pretratamiento que protege a las membranas posteriores que podemos contemplar en [1]. El objetivo en este sistema de filtración es impedir que lleguen hasta las membranas partículas de pequeño tamaño (valores superiores a 5-15 micras).



Figura 3.9 Sistemas de filtración sobre cartuchos

### 3. 6.3. Sistemas de ultrafiltración

Podemos contemplar en [1] a continuación los filtros de cartucho que se utilizan en sistemas de ultrafiltración.

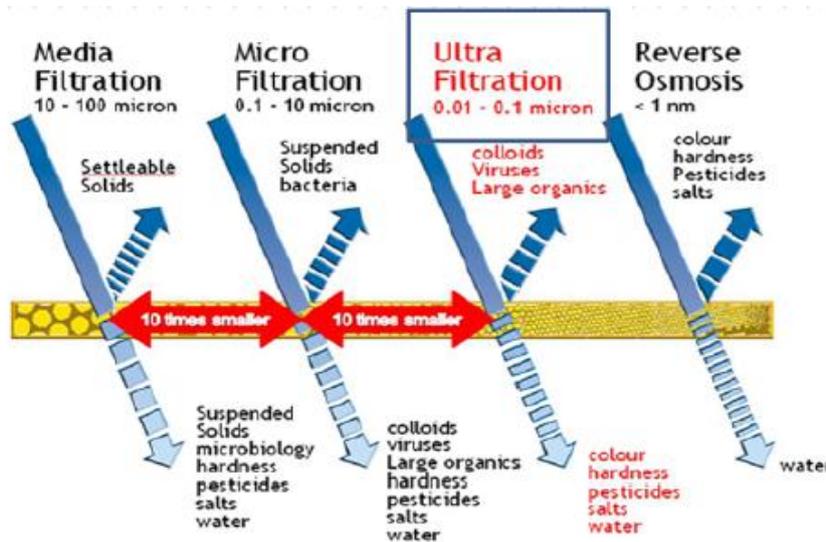


Figura 3.10 Sistemas de ultrafiltración

Las membranas de tipo fibra hueca son las más utilizadas, estando fabricadas en materiales como el PVDF (polifluoruro de vinilideno). Tenemos otras membranas que son más modernas y que están fabricada en polímeros de tipo polisulfonas. El tipo de filtración tiene lugar de dentro a fuera para este sistema que estamos empleando.

Según [21] uno de los productos a tener en cuenta es SFP-2880, que describiremos en esta ocasión ya que tiene mucho que ver con lo que hemos ido hablando de los sistemas de filtración y que son más usuales para ello.

Los módulos de ultrafiltración SFP-2880 son una opción ideal para sistemas con capacidades superiores a 50 m<sup>3</sup> / h (220 gpm). Con un diámetro de 8 pulgadas y una longitud de 80 pulgadas, junto con un aumento en la densidad de empaque de 10,000 fibras, este módulo ofrece 77 m<sup>2</sup> de área activa. La ultrafiltración SFP-2880 contribuye a un diseño de sistema de membrana más económico. Los módulos de ultrafiltración SFP-2880 están hechos de membranas de fibra hueca de PVDF de alta resistencia en [21].

Las ventajas del uso de este tipo de sistemas filtrantes que podemos emplear para el proceso de ósmosis inversa:

- Excelente remoción de coloides, partículas y bacterias.
- Membrana de alto flujo
- Buena relación área volumen, por lo cual son sistemas muy compactos.
- Bajo consumo de químicos en el conjunto del pretratamiento previo a las membranas de OI.
- PVDF de alta resistencia química que permite un uso químico agresivo para el tratamiento de aguas difíciles cuando sea necesario
- Tolerante a la temperatura para una limpieza más efectiva
- Fibras mecánicamente fuertes que permiten una larga vida del módulo.
- Diseño robusto para larga vida.

### **3.7 Sistemas de tratamientos químicos**

#### **3.7.1 Coagulación**

Como podemos observar en [1] se emplea para la eliminación de la materia en suspensión y los coloides que no decantan de forma natural del agua a tratar. Es un proceso de desestabilización de las partículas por neutralización de sus cargas, los coagulantes más comunes para ello, son los siguientes:

- Sales de aluminio: Sulfato de aluminio, Cloruro de aluminio, Aluminato sódico, polímeros de aluminio, etc.
- Sales de hierro: Cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso, cloro sulfato férrico, etc.
- Coagulantes orgánicos: POLIDADMAC

Las ventajas que tienen los coagulantes orgánicos que vamos a emplear son los siguientes a desarrollar:

- Mejora de la coagulación, mejor separación sólido-líquido.
- Menores dosis necesarias.
- Menor volumen de fangos producidos.
- Menor dependencia del pH.
- No incorporan iones metálicos al agua.

Los coloides son partículas en suspensión en el agua de pequeño tamaño, que suelen ser responsables en gran parte del color, turbidez, sabor y olor del agua. Su procedencia tiene varios orígenes:

- Micro-organismos: bacterias, virus, algas, etc.

- Mineral: Arcillas coloidales, limos, sílice, sales metálicas, etc.
- Orgánico: Colorantes, tensioactivos, ácidos húmicos y fúlvicos.

### 3.7.2 Floculación

Se trata de un proceso de aglomeración de las partículas sin carga, que genera una partícula visible y sedimentable que se denomina flóculo como podemos ver en [1].

### 3.7.3 Pretratamiento coagulación-floculación en ósmosis inversa

Según [1] para este proceso empleamos sales de hierro o aluminio en dosis elevadas, que provocan el ensuciamiento de membranas. En el caso del aluminio ocurren los siguientes problemas:

- Es más difícil de eliminar.
- Reaccionan con sílice.
- Forman precipitados.

Para ello no es conveniente utilizar coagulantes orgánicos ya que pueden reaccionar con la membrana que estamos trabajando.

### 3.7.4 Desinfección

Es el proceso de eliminar o reducir los riesgos derivados de la presencia de micro-organismos que pueden generar ensuciamientos en las membranas y como consecuencia una pérdida de rendimiento de la instalación. Para ello empleamos las siguientes sustancias según [1]:

- Cloro gas
- Hipoclorito de sodio
- Dióxido de cloro
- Ozono
- UV

### 3.7.5 Regulación del pH

Veremos en este apartado como se nos indica en [1] que ambos estudios para la regulación del pH, de los cuáles tenemos los siguientes a tratar:

- Disminución del pH: Evitar la precipitación del carbonato cálcico en las membranas ya que la solubilidad de esta sal disminuye al aumentar el pH.
- Los reactivos empleados para dicho proceso son: Ácido sulfúrico, dióxido de carbono y ácido clorhídrico.
- Incremento del pH: Evitar el paso de CO<sub>2</sub> a través de las membranas (pH 8,3) y de incrementar el rechazo de boro (segundo paso, pH>9,5).
- El reactivo empleado para dicho proceso es el hidróxido sódico.

### 3.7.6 Antiincrustantes

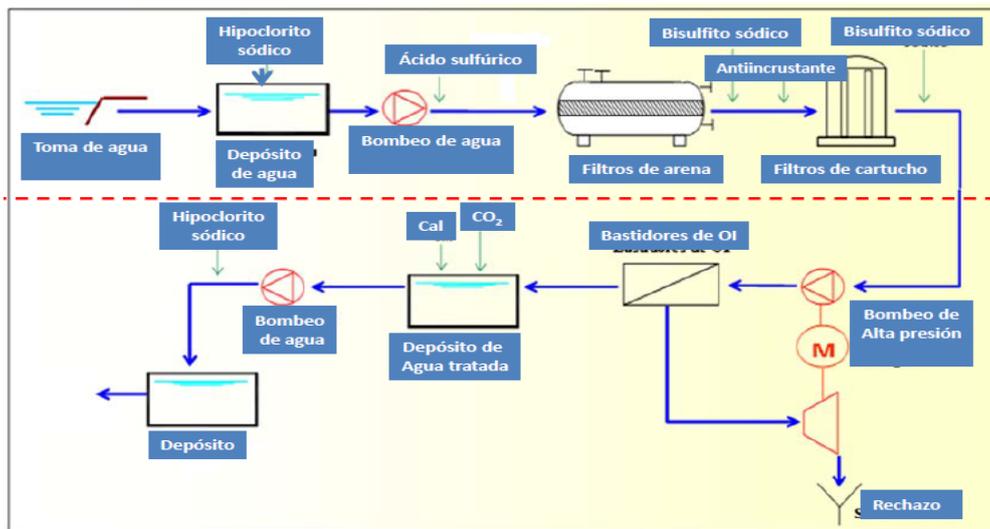
Para [1] este proceso se trata de evitar la precipitación de sales en la superficie de las membranas. Los métodos empleados para ello son:

- Adición de ácido
- Desendurecimiento del agua
- Adición de antiincrustantes

Los antiincrustantes son absorbidos en la superficie de los cristales de sal, impidiendo el crecimiento de los mismos y evitando la atracción de más iones desde la solución sobresaturada hacia la superficie del cristal. De esta forma, los cristales no alcanza el tamaño suficiente como para acabar precipitando.

Algunas de estas moléculas que contienen grupos funcionales de ácidos carboxílicos (R-COOH) o derivados orgánicos de fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), y algunos ejemplos son:

- Hexametáfosfato sódico (HMPNa)
- Poli-acrilatos de bajo peso molecular
- Poli-acrilatos de alto peso molecular
- Organofosfonatos



**Figura 3.11 Gráfico tratamiento ósmosis inversa**

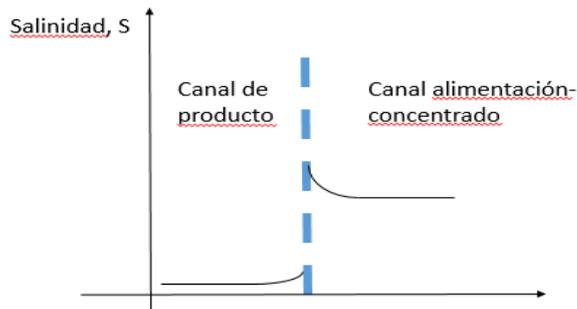
En la figura 3.11 podemos contemplar una breve descripción gráfica de como es el tratamiento de ósmosis inversa para el agua que estamos tratando y trabajando según [1].

### 3.8 Parámetros que afectan a los procesos de ósmosis inversa

#### 3.8.1. Polarización

Según [4] debido a la transferencia de disolvente a través de la membrana, en la superficie de la membrana del canal alimentación-concentrado la salinidad se incrementa respecto a la que puede medirse a cierta distancia de la membrana, vamos a tener en cuenta que:

- Es importante en el canal alimentación-rechazo.
- Despreciable en el canal del permeado.



**Figura 3.12 Proceso polarización de concentración**

Como podemos observar (figura 3.12) según [4] debido a que la transferencia de disolvente a través de la membrana es muy superior a la de las sales, esta desproporción produce que la salinidad se incremente mucho en las proximidades de la superficie de la membrana en el canal alimentación-concentrado. Un efecto mucho menor ocurre en el canal del permeado, en este caso producido por el paso de sales que poco a poco se va difundiendo por el canal del permeado. Puede observarse en la citada figura un pequeño incremento de la salinidad en las proximidades de la membrana.

La polarización de la concentración no puede eliminarse por completo en los procesos de ósmosis inversa, pero al menos puede reducirse, de las siguientes formas:

- Favoreciendo el flujo turbulento mediante espaciadores
- Ajustando el flujo de alimentación en cada tubo de presión.

### 3.8.2 Ensuciamiento de la membrana

#### 3.8.2.1 Ensuciamiento coloidal

Como se nos indica en [1] este tipo de ensuciamiento tiene lugar en la coagulación de los coloides (partículas en suspensión menores de 1 micra) que se mantienen dispersas en la solución por la presencia de cargas superficiales.

Provoca que estos coloides se peguen a la membrana y formen una capa superficial que reduce su permeabilidad. Los coloides más frecuentes son Fe, Mn, sílice y arcilla fina. El azufre coloidal se forma al oxidarse el  $\text{SH}_2$  y es difícil de eliminar (puede evitarse eliminando el aire y otros oxidantes).

#### 3.8.2.2 Ensuciamiento orgánico y biológico

En el ensuciamiento orgánico tenemos que suelen ser materia orgánica, ácidos fúlvicos y húmicos que son rechazados por la membrana. La membrana rechaza estos compuestos, pero se depositan sobre la misma y forman una capa que también ensucian la membrana.

Para [1] el ensuciamiento biológico se tratan de componentes biológicos del agua de mar, microalgas, bacterias, virus, etc.



**Figura 3.13 Limpieza de membranas**

En la figura 3.13 podemos contemplar una forma de poder realizar la limpieza de las membranas para que sea más efectiva.

## 4. MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA

En [7] podemos contemplar como inicio la descripción detallada de la tecnología convencional de membranas de ósmosis inversa para agua de mar, que vamos a emplear para la desalación solar y para el proceso que estamos estudiando.

En la figura 4.1 vemos un breve resumen gráfico de cómo es su funcionalidad y cómo se aplica esta tecnología.

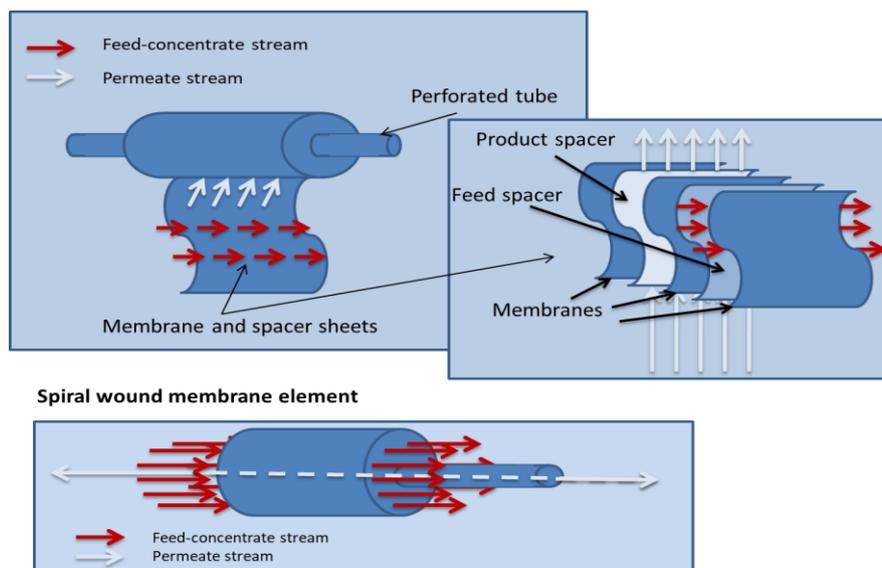


Figura 4.1 Tecnología ósmosis inversa

A partir de ahora vamos a desarrollar y a desglosar los diferentes fabricantes que podemos encontrar en el mercado para la aplicación de esta tecnología:

### 4.1 Membranas LG NanoH2O

Según [7] basadas en los innovadores materiales nanoestructurados y en la tecnología de polímeros probada en la industria, las membranas OI de LG NanoH2O mejoran dramáticamente la eficiencia energética y la productividad de la desalación.

Para la producción de agua potable, estas membranas ofrecen el mejor flujo y rechazo de su clase, y están disponibles en elementos estándar de 8 pulgadas (20 cm) de diámetro que se adaptan fácilmente a las plantas de desalación nuevas y existentes, purificando agua de una amplia gama de fuentes con productividad y calidad de agua mejoradas. LG NanoH2O fabrica membranas de ósmosis inversa (OI) de agua de mar y salobre que reducen el costo de la desalación.

Estas membranas vienen en dos tipos: un rango de ahorro de energía (ES) para usar a 10,34 bar en caso de desalación de agua salobre y un rango de "alto rechazo", para usar a 15,5 bar (agua salobre) y que se divide en tres grados que abarcan un rango de tasa de flujo de permeado de 39,7 m<sup>3</sup>/d a 58,3 m<sup>3</sup>/d.

#### 4.1.1 LG Chem lidera el camino en tecnología de membrana

Las membranas de película delgada se utilizan ampliamente en los procesos de tratamiento de agua como medio de eliminar contaminantes y purificar el agua de una amplia gama de fuentes que hemos visto en [7].

LG Chem desarrolla y fabrica membranas de ósmosis inversa (OI) que se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones que van desde la desalación de agua de mar hasta la reutilización de aguas residuales.

LG Chem adquirió NanoH2O, un fabricante de membranas de OI. Conocido por su innovadora tecnología de membrana de nanocompuesto de película delgada que dramáticamente mejora la eficiencia de la membrana y la productividad. Esta tecnología única, combinada con la experiencia de LG Chem en el recubrimiento rollo a rollo, la excelencia en productos químicos y polímeros.



Figura 4.2 Uso para diferentes sectores de Membranas LG NanoH<sub>2</sub>O

#### 4.1.2 Ventajas membranas LG NanoH<sub>2</sub>O

En [7] aquí podemos contemplar algunas de las ventajas si empleamos este producto para nuestro proceso de desalación empleando este tipo de membranas:

- La línea NanoH<sub>2</sub>O™ de membranas de ósmosis inversa de LG Chem presenta nanopartículas benignas encapsuladas en la capa superior de poliamida.
- Las membranas RO de NanoH<sub>2</sub>O™ de LG Chem ofrecen el mayor flujo y el mayor rechazo de sal de cualquier membrana de RO en el mercado.
- Todas las membranas NanoH<sub>2</sub>O™ RO de LG Chem están certificadas por el estándar 61 por NSF internacional para la producción de agua potable.

Categoría	Grado	Propiedades
Desalación de agua de mar	R, GR, SR : Alto rechazo	El mayor rechazo de sal en la industria (99.89%)
	ES : Energy Saving (El ahorro de energía)	Alto rechazo y alto flujo.
Uso Industrial / Municipal	R : Alto rechazo	Alto rechazo
	AFR : Anti-Fouling (Anti ensuciamiento)	Alto rechazo, anti ensuciamiento.
	ES : Energy Saving (El ahorro de energía)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja presión y ahorro de energía.</li> <li>• Alto rechazo y alto flujo.</li> </ul>

Tabla 4.1 Categorías/usos para LG NanoH<sub>2</sub>O

Podemos contemplar en la tabla 4.1 los distintos usos y propiedades que podemos emplear para este tipo de membranas que estábamos describiendo anteriormente.

## 4.2 Toray (TM280A-370)

Según [8] para esta membrana, hay que tener en cuenta que todos los elementos se probaron en húmedo, se trataron con solución de agua de alimentación probada y luego se envasaron al vacío. Con bolsas barrera al oxígeno con desoxidante en su interior, para prevenir el crecimiento biológico durante el cierre del sistema.

En la tabla 4.3, podemos contemplar que tenemos dos tipos de membrana Toray (TM820A-370) y Toray (TM820A-400) estudiando los valores típicos de fabricación y las condiciones empleadas para ello.

Type	Diameter Inch	Membrane Area ft <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	Salt Rejection %	Product Flow Rate gpd(m <sup>3</sup> / d)	Feed Spacer Thickness mil
TM820A-370	8"	370(34)	99.75	5,600(21.2)	31
TM820A-400	8"	400(37)	99.75	6,000(22.7)	28
1. Membrane Type		Cross Linked Fully Aromatic Polyamide Composite			
2. Test Conditions		Feed Water Pressure	800 psi(5.52MPa)		
		Feed Water Temperature	77° F(25°C)		
		Feed Water Concentration	32,000 mg/l NaCl		
		Recovery Rate	8%		
		Feed Water pH	8		
3. Minimum Salt Rejection		99.5%			
4. Minimum Product Flow Rate		4,400gpd(16.7m <sup>3</sup> /d)(TM820A-370) 4,800gpd(18.2m <sup>3</sup> /d)(TM820A-400)			
5. Boron Rejection (typical value)		93% at pH 8 (5mg/l Boron added to Feed water)			

**Tabla 4.2 Tecnología membranas TORAY**

La presencia de cloro libre y otros agentes oxidantes en ciertas condiciones, como los metales pesados que actúan como catalizadores de oxidación en el agua de alimentación causará una oxidación inesperada de la membrana. Se recomienda encarecidamente eliminar estos agentes oxidantes contenidos en el agua de alimentación antes de operar el sistema de RO (ósmosis inversa).

En la tabla 4.3, podemos visualizar los límites de operación que tenemos para la membrana Toray que estamos tratando en [8].

### Operating Limits

Maximum Operating Pressure	1200psi (8.3 MPa)
Maximum Feed Water Temperature	113° F (45°C)
Maximum Feed Water SDI <sub>15</sub>	5
Feed Water Chlorine Concentration	Not detectable
Feed Water pH Range, Continuous Operation	2-11
Feed Water pH Range, Chemical Cleaning	1-13
Maximum Pressure Drop per Element	20psi (0.14 MPa)
Maximum Pressure Drop per Vessel	60psi (0.4 MPa)

**Tabla 4.3 Valores límites de operación TORAY**

### 4.3 SWC6 – 4040

Podemos contemplar en [9] para esta membrana (SWC6-4040), vamos a ver un poco por encima sus valores típicos tratados y estudiados para el fabricante SWC. Las limitaciones que se muestran aquí son para uso general, para proyectos específicos, operando a proyectos más conservadores.

En la siguiente tabla informativa de SWC (tabla 4.4), se contempla los valores y datos más relevantes para la fabricación de la membrana que estamos tratando en este caso. Estos valores pueden garantizar el mejor rendimiento y la vida útil más larga de la membrana.

Membrane Element		SWC6-4040
<b>Performance:</b>		
	Permeate Flow:	<b>Low Pressure:</b> 1,250 gpd (4.7 m <sup>3</sup> /d) <b>High Flow:</b> 2,500 gpd (7.2 m <sup>3</sup> /d)
	Salt Rejection:	99.6% (99.4 % min)      99.7% (99.5% min)
	Boron Rejection (average) <sup>†</sup> :	83.0%      91.0%
	Applied Pressure:	600 psi (4.1 MPa)      800 psi (5.4 MPa)
<b>Type</b>		
	Configuration:	Spiral Wound
	Membrane Polymer:	Composite Polyamide
	Membrane Active Area:	85 ft <sup>2</sup> (7.9m <sup>2</sup> )
<b>Application Data*</b>		
	Maximum Applied Pressure:	1000 psig (6.9 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:	16 GPM (3.6 m <sup>3</sup> /h)
	Minimum Recovery for any Element:	10 %
	Maximum Pressure Drop for Each Element:	10 psi

Tabla 4.4 Valores tecnología membranas SWC6-4040

### 4.4 Dow-Filmtec-SW30HRLE-440i

Dow Water & Process Solutions ofrece varios elementos de ósmosis inversa de agua de mar de primera calidad diseñados para reducir el costo de capital y de operación de los sistemas de desalación. Los productos DOW™ FILMTEC™ combinan una excelente calidad de membrana con la fabricación automatizada de precisión, llevando el rendimiento del sistema a niveles sin precedentes

Estos valores del producto que nos ofrece DOW se pueden representar en la siguiente tabla (tabla 4.6) donde se nos da la información sobre las especificaciones de esta tecnología que estamos estudiando en [10].

Product Specifications							
Product	Part number	Active area ft <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	Maximum operating pressure psig (bar)	Permeate flow rate gpd (m <sup>3</sup> /d)	Stabilized boron rejection %	Minimum salt rejection %	Stabilized salt rejection %
SW30HR LE-440i		440 (41)	1,200 (83)	8,200 (31)	92	99.65	99.80

- The above values are normalized to the following conditions: 32,000 ppm NaCl, 5 ppm boron, 800 psi (5.5 MPa), 77°F (25°C), pH 8, 8% recovery.
- Permeate flows for individual elements may vary +/-15%.
- Product specifications may vary slightly as improvements are implemented.
- Active area guaranteed +/-5%. Active area as stated by Dow Water & Process Solutions is not comparable to the nominal membrane area figure often stated by some element suppliers. Measurement method described in Form No. 609-00434.

**Figure 1**

Product	Feed spacer (mil)	A	B	C	D
SW30HR LE-440i	28	40 (1,016)	40.5 (1,029)	7.9 (201)	1.125 (29)

- Refer to Dow Design Guidelines for multiple-element systems.
- Elements fit nominal 8-inch (203 mm) I.D. pressure vessel
- Individual *i*LEC elements measure 40.5 inches (1,029 mm) in length (B). The net length (A) of *i*LEC elements when connected is 40 inches (1,016 mm).

Tabla 4.5 Especificaciones producto DOW™ FILMTEC™ SW30HRLE-440i

El elemento DOW™ FILMTEC™ SW30HRLE-440i ofrece un costo de ciclo de vida más bajo y sostenible para aguas de alimentación de salinidad media y alta al combinar un alto rechazo y un rendimiento de bajo consumo energético con el área activa más alta y el espaciador de alimentación más grueso de las membranas Dow. Los beneficios de este elemento que se nos ofrecen, incluyen los siguientes puntos en [10]:

- Permite que los sistemas se diseñen y operen para reducir los costos operativos a través de la reducción del consumo de energía o para disminuir los costos de capital a través de una mayor productividad con flujos operativos más bajos.
- Alto rechazo de NaCl y boro para ayudar a cumplir con la Organización Mundial de la Salud (OMS) y otros estándares de agua potable.
- El área activa más alta garantizada (41 m<sup>2</sup>) permite el menor costo del sistema al maximizar la productividad y permite un diseño del sistema preciso y previsible y un flujo operativo.
- La combinación del área activa más alta con el espaciador de alimentación más grueso permite una baja frecuencia de limpieza y una alta eficiencia de limpieza.
- La utilización de las distintas tapas de anclaje iLEC™ que ayudan a reducir los costos operativos del sistema y el riesgo de fugas de juntas tóricas que pueden causar una mala calidad del agua.
- Alto rendimiento sostenible durante la vida útil del elemento, ya que los tratamientos oxidativos no se utilizan en la producción de membranas. Esta es una de las razones por las que los elementos DOW FILMTEC son más duraderos y pueden limpiarse más eficazmente en un rango de pH más amplio (1-13) que la mayoría de los otros elementos RO, que utilizan tratamientos oxidativos.
- Uso efectivo en sistemas de desalación de agua de mar en fase de permeado sin perjudicar el rendimiento de la etapa posterior.

En la tabla 4.6, se puede visualizar los límites de operación del fabricante de la membrana que estamos hablando y que nos ofrece DOW de forma generalizada en [10].

<b>Operating Limits</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Membrane Type</li> <li>• Maximum Operating Temperature<sup>a</sup> 113</li> <li>• Maximum Element Pressure Drop</li> <li>• pH Range, Continuous Operation<sup>b</sup></li> <li>• pH Range, Short-Term Cleaning (30 min.)<sup>b</sup></li> <li>• Maximum Feed Silt Density Index (SDI)</li> <li>• Free Chlorine Tolerance<sup>c</sup> &lt;0.1</li> </ul>	<p>Polyamide Thin-Film Composite</p> <p>°F (45°C)</p> <p>15 psig (1.0 bar)</p> <p>2 - 11</p> <p>1 - 13</p> <p>SDI 5</p> <p>ppm</p>
	<p><small><sup>a</sup> Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 95°F (35°C).</small></p> <p><small><sup>b</sup> Refer to Cleaning Guidelines in Form No. 609-23010.</small></p> <p><small><sup>c</sup> Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, Dow recommends removing residual free chlorine by pretreatment prior to membrane exposure. Please refer to technical bulletin 609-22010 for more information.</small></p>	

**Tabla 4.6 Valores límites de operación DOW™ FILMTEC™ SW30HRLE-440i**

El arranque correcto de los sistemas de tratamiento de agua por ósmosis inversa es esencial para preparar las membranas para el servicio de operación y para evitar daños a la membrana debido a la sobrealimentación o al choque hidráulico. Seguir la secuencia de inicio adecuada también ayuda a garantizar que los parámetros operativos del sistema se ajusten a las especificaciones del diseño para que se puedan alcanzar los objetivos de productividad y calidad del agua del sistema.

# 5. CÁLCULO DE COSTES DE LA DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA MEDIANTE SMTG

---

## 5.1 Análisis costos desalación por ósmosis inversa

En este apartado se resumen los contenidos de la referencia [11], que presenta un estudio detallado y representativo del cálculo de costes en desalación. El tipo preferido de proceso de desalación y las fuentes de energía utilizadas han cambiado con el tiempo en función de los desarrollos tecnológicos, que afectan tanto el rendimiento como el coste de las tecnologías de desalación y generación de energía. Además, las preferencias tecnológicas se ven muy afectadas por las condiciones locales en las regiones donde se instalan las plantas porque los parámetros como el coste del combustible y la composición típica del agua de alimentación pueden variar ampliamente, lo que afecta el rendimiento y la viabilidad de la planta.

El problema del coste es fundamental para tratar estas cuestiones. Por supuesto, otros parámetros también se tienen en cuenta en el proceso de decisión son los impactos ambientales, la aceptación social y las elecciones estratégicas definidas por las políticas gubernamentales.

### 5.1.1 Literatura sobre revisiones de costos de desalación y correlaciones.

Veremos los distintos costes a tener en cuenta según la tecnología y la fuente de energía y, a veces, el tamaño de la planta; sin embargo, la agrupación de los costes en todos estos documentos no tiene en cuenta factores críticos, tales como se nos indica en [11]:

- a) El año diferente de construcción. Por ejemplo, se derivó un rango de costo para PV-RO de 11.7 a 15.6 USD/m<sup>3</sup>.
- b) Las diferentes ubicaciones geográficas. Por ejemplo, para sistemas de RO con capacidades desde 15.000 hasta 60.000 m<sup>3</sup>/día, agrupando datos de países con condiciones muy diferentes como USA, China, Grecia y Emiratos Árabes Unidos, se dio un rango de costos de 0,48 a 1,62 USD/m<sup>3</sup>.

Se realizaron análisis estadísticos de datos de costos reales de 950 plantas de OI y mostraron que los parámetros más importantes que afectan el costo fueron:

- la capacidad de la planta,
- el año de construcción,
- la salinidad del agua de alimentación,
- La región donde están instaladas las plantas.

#### 5.1.1.1. Metodologías para el cálculo de los costos de desalación

##### - *Indicadores de evaluación de inversiones*

Los indicadores que se utilizan con más frecuencia en la evaluación de inversiones son el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Retorno (PR). Hay muchos libros de texto y artículos en los que se definen estos indicadores, que proporcionan ecuaciones para su cálculo. El cálculo del VPN se puede hacer usando la siguiente ecuación (4) tomada de [11]:

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{R_t - C_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (4)$$

En el caso de proyectos de desalación, el  $R_t$  refleja los ingresos de la venta del agua producida,  $C_t$  que son los costes de producción. Como resultado, el cálculo de VPN o TIR requiere la evaluación de la cantidad de agua que se producirá y el precio al que se puede vender el agua en el punto de producción del año 1 al año  $n$ .

La situación es similar en los proyectos de energía, donde se debe conocer el precio al cual se puede vender la electricidad generada. En ese caso, se introdujo según [11] el concepto de costo de electricidad normalizado (LCOE), que es una evaluación del precio al que se tendría que vender la electricidad para que el proyecto se recupere y se calcula dividiendo los costos producidos durante toda la vida útil del proyecto por la energía producida durante el mismo período. Al adaptar ese concepto para la desalación y otras tecnologías de producción de agua, la ec. (5) se obtiene para el Costo Normalizado del Agua (LCOW, *Levelised Cost of Water*), donde  $C_t$  es el costo anual de operación y  $M_w$ , es la cantidad de agua producida en el año  $t$ :

$$LCOW = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_w \cdot t}{(1+i)^t}} \quad (5)$$

**- Revisión de metodologías utilizadas para calcular los costos de desalación.**

En la mayoría de los casos se utilizó un método que algunos autores denominan "factor de amortización" o "método de costo del ciclo de vida anualizado".

En ese enfoque, los costos iniciales de capital se anualizaron utilizando el factor de amortización. El resultado obtenido de este método se denomina aquí como costo simplificado del agua (SCOW), que se puede calcular utilizando esta ecuación según [11]:

$$SCOW = \frac{(I_0 \times \alpha) + C}{M_w} \quad (6)$$

En primer lugar, según [11] es bastante común desglosar los costos de funcionamiento ( $C$ ) en costos fijos anuales ( $C_F$ ) medidos en unidades monetarias como USD y costos variables ( $C_v$ ), expresados en unidad monetaria por  $m^3$ . Siendo  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (7)$$

Luego, en algunos casos, la variación esperada de los precios a lo largo del tiempo se tuvo en cuenta al suponer una tasa de aumento anual ( $r$ ) para los costos de funcionamiento. Para tener en cuenta la escalada de precios a lo largo del tiempo, como se observa en esta ecuación (8):

$$SCOW = \frac{(I_0 \times \alpha) + \lambda \times C_F}{M_w} + \lambda \times C_v \quad (8)$$

Se definen los parámetros  $k$  y  $\lambda$  por:

$$\lambda = \frac{k(1-k^n)}{1-k} \times \alpha \quad (9)$$

$$k = \frac{1+r}{1+i} \quad (10)$$

Por otro lado, en algunos documentos se realizó un cálculo muy simplista para el costo del agua ( $C_p$ ) donde no se tuvo en cuenta el descuento de los flujos de efectivo futuros. Este cálculo simplificado viene dado por (11):

$$COW = \frac{(I_0/n)+C}{M_w} \quad (11)$$

Como punto de partida, se deben definir los límites para el cálculo del coste. Dependiendo del propósito del cálculo y las condiciones específicas en cada sitio, podría tener sentido tener en cuenta el equipo auxiliar y los materiales bajo el coste de capital y sus requisitos de funcionamiento bajo los costos operativos. Los elementos que se pueden incluir o excluir son: almacenamiento de agua, distribución de agua desalada, laboratorio para el control de calidad, extensión de la red eléctrica, apertura de caminos de acceso y desmantelamiento de la planta de desalación al final de su vida útil.

Hay documentos donde se calculó el costo del agua pero la metodología utilizada no estaba claramente definida [22–25], mientras que en varios otros [26–31] la metodología utilizada tampoco fue explicada pero la referencia se hizo a los paquetes de software utilizados, que en la mayoría de los casos tienen incorporado una metodología similar a la LCOW o al menos a la SCOW.

- *Ejemplo de caso práctico: Aplicación a Brasil*

Finalmente se expone un último caso de cálculo detallado en la literatura [12] aplicado a Brasil:

El análisis de los costos de desalación de OI (ósmosis inversa) se evaluó en tres escenarios de diferentes fuentes de energía: solar, gas natural y biogás para seis poblaciones de diferentes tamaños: 20,000; 50,000; 100,000; 200,000; 500,000 y 1,000,000 de habitantes. Inicialmente, las tasas de flujo de producción requeridas para satisfacer las necesidades energéticas de las poblaciones definidas se estimaron en la ecuación (12), ampliamente utilizada en los sistemas de suministro de agua.

$$Q_P = Q_{inhab} \times P_{OP} \times 8,76 \quad (12)$$

Donde:  $Q_p$  = caudales de producción en  $m^3 / a$ ,  $Q_{inhab}$  = agua diaria consumida por habitante. Consumo per cápita = 150 L / habitante (ABES - Asociación Brasileña de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2007), 8.76 = factor de ajuste de la unidad y  $P_{OP}$  = población abastecida en habitantes.

Para determinar los caudales en la ecuación siguiente (13), se debe considerar el porcentaje de recuperación de agua en 43% según el Consejo Nacional de Investigación (2008).

$$Q_{cap} = Q_P / A_{rec} \quad (13)$$

Donde:  $Q_{cap}$  = captura de tasa de flujo en  $m^3 / y$  y  $A_{rec}$  = recuperación de agua.

El consumo de energía de la planta se calculó multiplicando el consumo típico/ $m^3$  de energía eléctrica en kWh por el caudal de producción, como se ve en esta ecuación (14):

$$C_e = C_{ee} \times Q_p \quad (14)$$

Donde:  $C_e$  = Consumo de energía en kWh / a y  $C_{ee}$  = Consumo típico de energía eléctrica en kWh/ $m^3$ .

La ecuación de potencia eléctrica,  $P_E$ , se puede ver en la ecuación siguiente, y se calculó para todas las fuentes de energía a través de la relación entre el consumo de energía y el factor de capacidad (CF) de cada fuente (adaptado de Lima y Bezerra Filho, 2012 [32]). La CF se define como la relación entre la producción de energía de los aerogeneradores en un determinado período de tiempo y la energía que se produciría por la misma si se operara a la potencia máxima durante el mismo período (Khahro et al., 2014 [33]). Los CF utilizados para fuentes solares (celdas de silicio policristalino), gas natural (CCGG) y biogás (en motores de combustión interna) fueron respectivamente: 0.16 (CRESESB - Centro de referencia para energía solar y eólica Sérgio de Salvo Brito, 2013); 0.7 (Tolmasquim, 2016) y 0.8 (Abreu, Costa Filho, y Souza, 2009).

$$P_E = \frac{C_e}{CF \times 8,760} \quad (15)$$

Donde:  $P_E$  = Potencia eléctrica en kW y  $C_F$  = factor de capacidad.

El costo normalizado de la energía (LCOE) es el costo que considera todos los gastos de fuentes de energía transformados en una anualidad. Esto se utilizó para representar todos los gastos relacionados con la planta de desalación de energía. Los valores de LCOE calculados para las fuentes solares (LCOES) y biogás (LCOEBG) en el escenario brasileño se estimaron utilizando la ecuación (5) (para valores de  $P_E$  entre 3,000 - 100,000 kW) y 6 (para valores de  $P_E$  hasta 30,000 kW), que se desarrollaron en base a Rangel (2016), quien realizó un extenso estudio de factibilidad económica de fuentes de energía renovable en Brasil y obtuvo estas relaciones (16) y (17).

$$LCOE_S = 0,483 \times P_S^{-0,123} \quad (16)$$

$$LCOE_{BG} = 0,115 \times P_{BG}^{-0,007} \quad (17)$$

Donde: LCOE = Costo normalizado de energía (USD / kWh),  $P_S$  = energía solar y  $P_{BG}$  = energía de biogás en kW. Para el valor de LCOE de la energía solar, se agregó el costo de USD 0,535 / kWh para calcular los costos de los gastos de origen (incluida la implementación, el funcionamiento y las baterías principales para almacenar la energía generada de forma intermitente por los costos de esta fuente tomada de IRENA, International Renewable Energy National Agency, 2012) transformados en una anualidad.

Los costos anuales de energía, que comprenden todos los costos de generación de energía, se definen como el producto de la multiplicación del LCOE (en USD/ kWh) por el consumo de energía (en kWh/h) para cada una de las fuentes de energía analizadas.

$$C_{ce} = LCOE \times C_e \quad (18)$$

Donde:  $C_{ce}$  = Costo energético en USD/año.

Sobre la base de los datos de costos del National Research Council (2008), ordenados por el flujo de agua producido, los costos de implantación del método de RO se obtuvieron de acuerdo con el escenario de población preestablecido. Este parámetro tiene en cuenta los costos del tratamiento previo, el sistema de ingestión, el tratamiento posterior, la construcción, los equipos auxiliares, el sistema de almacenamiento y los costos indirectos. Para calcular los costos de operación y mantenimiento, los factores de mano de obra, productos químicos y energía se consideraron en la ecuación (19).

$$C_{om} = C_{labor} + C_{chem} + C_{ce} \quad (19)$$

Dónde:  $C_{om}$  = costo de operación y mantenimiento,  $C_{labor}$  = costos laborales,  $C_{chem}$  = costo de productos químicos y  $C_{ce}$  = costos de energía (todos en USD/año).

Una vez calculados los datos anteriores, el costo de producción de agua desalinizada (CD en USD/año) se calculó utilizando una adaptación del concepto del costo normalizado de la energía, donde sólo se intercambiaron los términos relacionados con la producción de energía por el informe anual tomada de Branker et al., 2011.

Este parámetro puede definirse como un costo general (que implica la instalación y el pago de la planta) y es equivalente a las tarifas mínimas que deben pagar los usuarios por cada metro cúbico de agua para garantizar la viabilidad económica del proyecto.

Con estos resultados, se puede determinar la relación entre la población real de cada escenario ( $P_{OP}$ ) y la población necesaria para la generación de residuos para la posterior producción de biogás y el suministro de la planta de desalación.

### 5.1.1.2. Costos de equipos

Todos los documentos que hemos ido trabajando y estudiando tienen en cuenta los costos de equipos y materiales en su cálculo según [11]. La mayoría de los documentos utilizaron una cifra fija como costo de capital específico (generalmente en USD/m<sup>3</sup>/día nominal) para la tecnología de desalación, incluidos los equipos y materiales estándar de tratamiento previo y posterior.

Las cifras de costos de capital específicas informadas, se reproducen la mayoría de las veces de un documento a otro sin tener en cuenta los factores críticos que pueden afectar ese costo sustancialmente, como el año de construcción, la escala y la ubicación.

Para una definición precisa de los costos de capital, es necesario un desglose de todos los equipos y materiales. Para hacer eso, se debe conocer el diseño de la planta, que depende de las elecciones hechas por el cliente y las características específicas del sitio, como la topografía, la alimentación, la calidad del agua (que afecta al tratamiento previo), los estándares de calidad que debe cumplir el agua desalinizada (que afectan al postratamiento) y las regulaciones (que afectan a la eliminación de salmuera). Además de los equipos y materiales relacionados con la desalación, también se deben tener en cuenta los costos de los equipos auxiliares integrados y del hardware de generación de energía (ya sea tomada de la red eléctrica o de otros sistemas de energías como renovables).

### 5.1.1.3. Otros costos de capital

Los documentos que realizaron una evaluación de los costos de desalación basados en datos reales de la planta podrían haber tenido en cuenta algún tipo de costo de la tierra, dependiendo del tipo de datos disponibles en las fuentes utilizadas, lo cual no siempre es claro según [11]. Si existe un contrato de arrendamiento de la tierra en lugar de adquisición de tierras, la tarifa anual pagada debe incluirse en los costos operativos más que en los costos de capital.

### 5.1.1.4. Energía

En la mayoría de los casos la energía se considera como un costo operativo. Para calcular el costo de operación relacionado con la energía para el año  $t$  ( $C_{E,t}$ ) puede ser utilizado:

$$C_{E,t} = E_{el,t} \cdot P_{el,t} \quad // \quad C_{E,t} = E_{th,t} \cdot P_{th,t} \quad (20)$$

donde  $E_{el,t}$  es el consumo de energía;  $P_{el,t}$  es el precio de la energía.

El consumo específico de energía está determinado según [42] por la tecnología de desalación utilizada y las características de diseño de cada planta específica. Las condiciones ambientales también afectan el consumo específico de energía. La forma de contabilizar el costo de la energía ( $P_{el}$  y  $P_{th}$  o  $E_{el}$  y  $E_{th}$ ) depende de si se genera en el sitio o se proporciona externamente (por ejemplo, electricidad de la red).

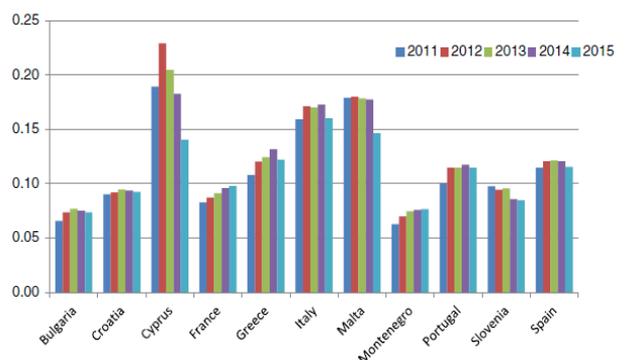
Un enfoque alternativo a eso es calcular por separado el Costo Normalizado de la Energía (LCOE) y usarlo como el costo de la unidad de electricidad. Si la planta de energía está en el sitio pero es operada por una entidad legal separada, que financió su desarrollo y vende la energía a la planta de desalación, el cálculo es similar al caso en el que se usa energía proporcionada externamente, donde el costo de la unidad de la energía se define en el acuerdo entre el operador de la planta de desalación y el proveedor de energía.

En el caso de la electricidad, debemos que tener en cuenta que es un producto que afecta a este proceso y por ello se emplea una tarifa fija para la electricidad durante toda la vida útil de la planta de desalación: la mayoría estaba en el rango de 0.05 a 0.06 USD/kWh de [48, 49, 50, 51, 52, 53, 54], con algunos están a 0.03 USD/kWh de [44,27] o menos por [30] y algunos a 0.08 USD/kWh de [45,46] o más (hasta 0.11 USD/kWh de [47,22]).

Aunque el precio de la electricidad seleccionado se mantenga estable durante toda la vida útil del sistema de desalación. En realidad, el precio de la electricidad puede variar significativamente durante estos períodos de 20 a 30 años . Según Kaldels en 2004, se introdujo una tasa de incremento anual del 4%; asumiendo costos de electricidad para este proceso.

La figura 5.1 ilustra los precios de la electricidad industrial en algunos países del sur de Europa de 2011 a 2015. Esto muestra claramente que incluso entre países en la misma región, las diferencias pueden ser muy grandes. Por ejemplo, las industrias pagan por la electricidad en Italia más del doble de lo que pagan en Bulgaria.

La figura también demuestra claramente que en el sur de Europa las industrias tienen costos de electricidad más altos en comparación con la cifra de 0.05 a 0.06 USD/kWh. También dentro de unos pocos años, los precios de la electricidad industrial pueden variar significativamente y esta variación puede ser en forma de aumentos de precios o reducciones de precios. Por ejemplo, en Chipre, un país con altas necesidades de desalación, los precios de la electricidad industrial se redujeron en un 39% entre 2012 y 2015.



**Figura 5.1 Precios industria eléctrica en sudeste Europa**

#### 5.1.1.5. Otros costos operativos

Respecto al mantenimiento teniendo en cuenta [41], el costo de la membrana por m<sup>2</sup> varía con el tiempo y también depende de otros factores como la región y las economías de escala; encontrar precios actuales de los proveedores no debería ser un problema. Lo más importante para el cálculo del costo es un supuesto razonable para la tasa de reemplazo de membranas, que depende, entre otras cosas, de la calidad del agua de alimentación.

Con respecto a otros costos de mantenimiento, como el reemplazo de piezas, bombas, etc., a menudo se ignoran o se contabilizan agregando anualmente a los costos un cierto porcentaje de los costos de capital, que oscilan entre el 1,5 y el 3%. Algunos ejemplos se proporcionan en la Tabla 4.

Year of publication	Other maintenance costs
2002	< 2% of capital cost per year for other maintenance and spare parts
2013	maintenance cost 2% of the normalised capital cost
2014	maintenance and repair 3 to 3.3% of capital costs for MED and 2.7% for RO
2015	maintenance, spares and insurance 1.5% of capital costs
2016	4% of the capital cost to account for all operating costs

**Tabla 5.1 Análisis de costes de mantenimiento en desalación**

### 5.1.1.6 Producción de agua ( $M_w$ , t)

Para esta parte nos encontramos ante una tasa razonable entre el 85 y el 95% para la disponibilidad en sistemas convencionales, o alrededor del 25% para los sistemas que utilizan energía solar fotovoltaica y no tienen respaldo ni almacenamiento de energía.

También se ha señalado que la disponibilidad puede verse afectada por la interrupción debido al fallo de algún equipo auxiliar y, por lo tanto, las especificaciones adecuadas también son importantes para aquellos artículos que tienen una pequeña contribución a los costos de capital pero que podrían afectar los aspectos económicos al reducir la disponibilidad. La Tabla 5.2 proporciona una visión general de algunas tasas de disponibilidad utilizadas en la literatura de [11]

**Table 5**  
Overview of availability rates used in desalination cost analysis literature.

Availability
0.96
0.95
0.9
0.85
0.83 (operating 20 h a day)
0.8
0.27, 0.54 and 0.82 considered
Sensitivity, starting from 0.5 and increasing up to 0.85
0.33 (PV powered)
0.25 (PV powered)

**Tabla 5.2 Análisis de disponibilidad (porcentaje de tiempo operación anual) en desalación**

### 5.1.1.7. Tasa de descuento ( $i$ )

Los métodos de evaluación de costos requieren el uso de una tasa de descuento para explicar el valor del dinero a lo largo del tiempo y el riesgo o la incertidumbre de los flujos de efectivo futuros, teniendo de referencia de [11]. La gran mayoría de los documentos de costo de desalación simplemente eligieron un valor, generalmente entre 6.5 y 10%.

Para definir la tasa de descuento, los siguientes tres problemas principales se deben determinar sobre la base de un proyecto:

- Proporción de préstamo a capital
- Tasa de interés y duración del préstamo
- Expectativas de los inversores por retorno de capital.

Estos parámetros se verán afectados por el riesgo y la situación económica general, que define la inflación y oportunidades alternativas para el capital. En general, las nuevas tecnologías (como los métodos de desalación emergentes) no están probadas y se perciben como más riesgosas.

Luego están los riesgos generales que tienen que ver con el proyecto, como el riesgo asociado con los ingresos esperados de la venta del agua, cambios imprevistos en los costos de funcionamiento (por ejemplo, grandes cambios en el costo de la energía), cambios en las normativas asociadas con la calidad del producto o la eliminación de salmuera, etc.

## 5.2. Cálculo del consumo energético del sistema de desalación: RESULTADOS DEL SOFTWARE (LG NanoH2O)

Las siguientes figuras y tabla muestran los resultados obtenidos con la metodología descrita en el capítulo anterior en relación al dimensionado del sistema de ósmosis inversa. Resultados obtenidos con el programa LG, a partir de los datos de las concentraciones que nos da la siguiente tabla para estudiar cada uno de los casos a tener en cuenta en nuestro trabajo.

Constituent	Mediterranean	Persian Gulf	Red Sea	Caribbean	Pacific	Atlantic	Canary Islands
Temperature	14°C, 28°C	16°C, 34°C	16°C, 26°C	26°C	20°C	20°C	22°C
pH	8.1	7.0	7.8	8.2	8.0	8.0	7.8
Ca <sup>+</sup> , ppm	483	478	500	477	440	410	464
Mg <sup>+</sup> , ppm	1557	1672	1540	1160	1300	1302	1526
Na <sup>+</sup> , ppm	12200	14099	13300	11322	10200	10812	11700
K <sup>+</sup> , ppm	481	530	490	386	380	389	429
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , ppm	5	4.2	2.3	2.3	2.0	2.0	3.2
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , ppm	162	154	126.8	137	170	143	204
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , ppm	3186	3314	3240	2600	3000	2713	3059
Cl <sup>-</sup> , ppm	22599	24927	23180	20034	18500	19441	21344
F <sup>-</sup> , ppm	1.4	-	-	-	-	-	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , ppm	-	-	-	-	-	-	-
B <sup>+</sup> , ppm	5	5	5.3	5.3	4.5	4.5	4.5
SiO <sub>2</sub> , ppm	1.6	-	-	-	-	-	-
<b>TDS, ppm</b>	<b>40686</b>	<b>45199</b>	<b>42389</b>	<b>36149</b>	<b>34000</b>	<b>35240</b>	<b>38739</b>

**Tabla 5.3 Dato de casos de agua de mar en las diferentes localizaciones de las plantas**

En el caso de Atlántico, se consideran las Islas Canarias y Fortaleza, Brasil, asumiendo el valor del consumo específico principal del proceso de desalación de 1.79 kWh/m<sup>2</sup>.

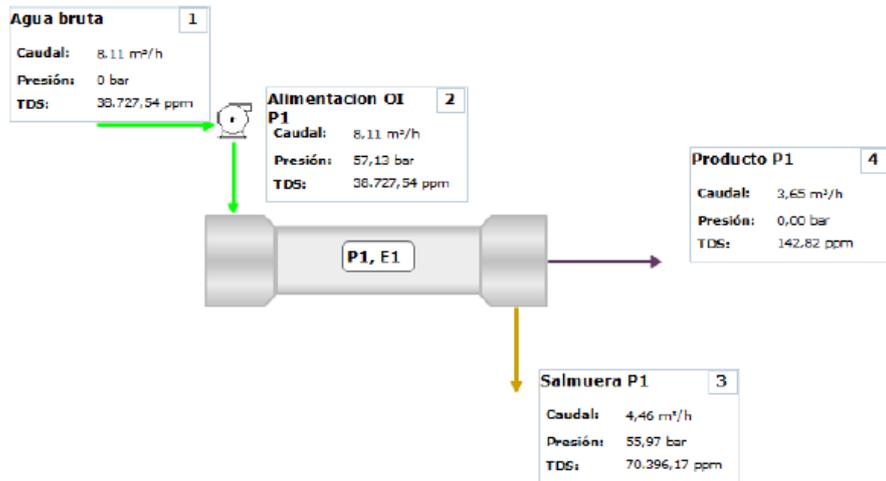
## ISLAS CANARIAS (ATLÁNTICO)


**LG Chem** Software de Diseño Q+  
 V 2.4

<b>Nombre del proyecto:</b>	Tipo de agua: Islas Canarias	Edad de la membrana: 0
<b>Nombre de empresa:</b>	Pérdida de flujo por año: 7,00 %	Factor de seguridad: 1
<b>Nombre de usuario:</b>	Aprobado por:	Aumento del paso de sal: 7,00 %

### Paso 1

Caudal de permeado: 3,65 m <sup>3</sup> /h	Flujo promedio: 12,77 l/mh	Temperatura: 22 °C
Caudal de alimentación de la OI: 8,11 m <sup>3</sup> /h	Fuente de agua: Agua de mar-Toma abierta (SDI < 5)	NDP promedio: 14,6 bar
Caudal de concentrado: 4,46 m <sup>3</sup> /h	TDS de alimentación: 38.727,54 ppm	Consumo específico: 1,79 kWh/m <sup>3</sup>
Recuperación: 45 %	Presión osmótica de alimentación: 27,36 bar	Presión de alimentación: 57,13 bar
Número de membranas: 7	Presión osmótica del concentrado: 49,68 bar	TDS de permeado: 142,82 ppm
Tipo RDE: Intercambiador isobárico	Eficiencia de la bomba: 100 %	Fouling Factor: 1



	1	2	3	4
	Agua bruta	Alimentación OI P1	Salmuera P1	Producto P1
Caudal: m <sup>3</sup> /h	8,11	8,11	4,46	3,65
Presión: bar	0	57,13	55,97	0,00
TDS: ppm	38.727,54	38.727,54	70.396,17	142,82

**Figura 5.2 Resultados obtenidos con software LG NanoH2O: Islas Canarias**

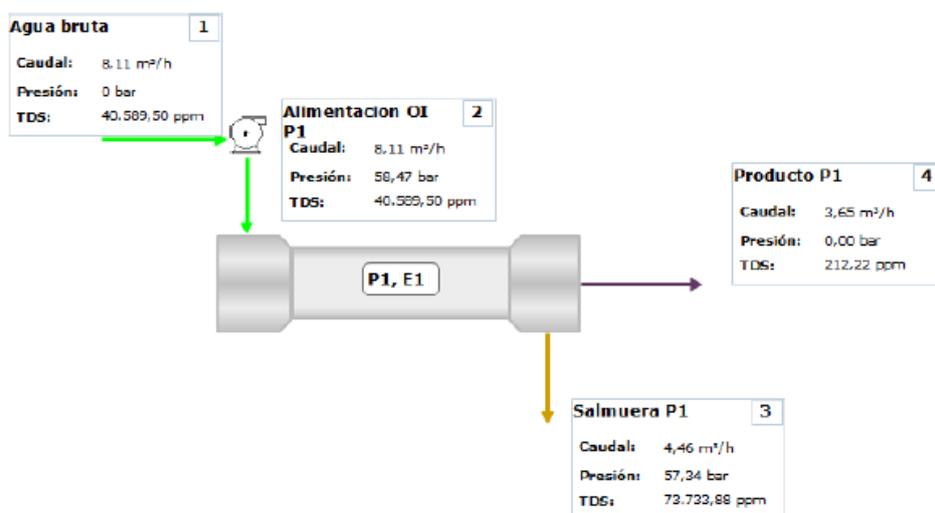
## MEDITERRÁNEO 1

LG Chem Software de Diseño Q+  
V 2.4

<b>Nombre del proyecto:</b>	Tipo de agua: Mediterráneo 1	Edad de la membrana: 0
<b>Nombre de empresa:</b>	Pérdida de flujo por año: 7,00 %	Factor de seguridad: 1
<b>Nombre de usuario:</b>	Aprobado por:	Aumento del paso de sal: 7,00 %

### Paso 1

Caudal de permeado: 3,65 m <sup>3</sup> /h	Flujo promedio: 12,77 lmh	Temperatura: 28 °C
Caudal de alimentación de la OI: 8,11 m <sup>3</sup> /h	Fuente de agua: Agua de mar-Toma abierta (SDI < 5)	NDP promedio: 12,6 bar
Caudal de concentrado: 4,46 m <sup>3</sup> /h	TDS de alimentación: 40.589,50 ppm	Consumo específico: 1,83 kWh/m <sup>3</sup>
Recuperación: 45 %	Presión osmótica de alimentación: 29,32 bar	Presión de alimentación: 58,47 bar
Número de membranas: 7	Presión osmótica del concentrado: 53,17 bar	TDS de permeado: 212,22 ppm
Tipo RDE: Intercambiador isobárico	Eficiencia de la bomba: 100 %	Fouling Factor: 1



	1	2	3	4
	Agua bruta	Alimentación OI P1	Salmuera P1	Producto P1
Caudal: m <sup>3</sup> /h	8,11	8,11	4,46	3,65
Presión: bar	0	58,47	57,34	0,00
TDS: ppm	40.589,50	40.589,50	73.733,88	212,22

Figura 5.3 Resultados obtenidos con software LG NanoH2O: Mediterráneo

### 5.3. Escenario de diversos países en cuanto a salarios y costes financieros

En las siguientes tablas se muestran resultados de consultas bibliográficas sobre datos que definen el escenario de un país concreto en cuanto a sus salarios y costes financieros.

Los valores de los coeficientes de salarios se toman en proporción al de Estados Unidos para tenerlos en cuenta para los cálculos de los costes financieros en relación a estos porcentajes según el país que estemos tratando.

Países	Costes financieros (%)			Contingencia (%)
	Interés	Fondo de reserva de la deuda	Otros costes	
China	1,5	4	3	8
España	2	5	4	10
Sudáfrica	1	2,5	2	5
Brasil	2	5	4	10
Marruecos	1,5	4	3	8

**Tabla 5.4 Costes financieros [55,56]**

Países	Coefficientes salarios (%)
China	85
España	97,6
Sudáfrica	55,8
Brasil	92
Marruecos	83,5

**Tabla 5.5 Coeficiente de equivalencia de salarios [55,56]**

#### 5.4. Comportamiento de la microturbina de gas solar (SMGT)

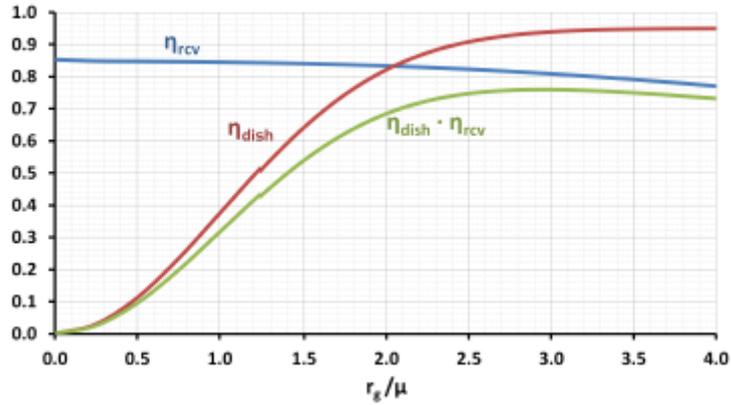
La siguiente figura muestra conceptualmente los dos principales componentes de la microturbina de gas solar (SMGT). El concentrador solar, que consiste en un disco parabólico recibe la energía solar en el área efectiva del captador y la concentra en el receptor, el cual calienta el fluido de trabajo de la mTG. Al ser un dispositivo de concentración, sólo puede aprovechar la irradiancia solar directa (DNI) que recibe siempre perpendicularmente gracias a su sistema de seguimiento solar en dos ejes.



**Figura 5.4 Esquema conceptual de una microturbina de gas solar.**

La eficiencia de cada componente está caracterizada en la literatura, según se muestra en la siguiente figura. Siendo DNI el valor de la irradiancia solar directa para lo que estamos tratando, además viendo el gráfico de la figura anterior debe alcanzar la línea verde formada por  $\Gamma_{\text{dish}} \cdot \eta_{\text{rev}}$  al 75% de la curvatura.

Con respecto a la relación entre el radio de apertura del receptor solar y la desviación estándar de la distribución Gaussiana  $r/\mu$  se toma 2,5. De esta forma se maximiza prácticamente el producto del rendimiento del concentrador y el rendimiento del receptor (Figura 5.5).



$$\eta_{dish} \cdot \eta_{rcv} = \frac{\dot{Q}_{aportado\ a\ la\ mTG}}{DNI} \quad (21)$$

**Figura 5.5 Eficiencia del concentrador (dish), del receptor (rcv) y del captador solar en su conjunto (producto de ambas) [Miguel Rollán, 2018].**

Miguel Rollán, en su TFG compara conceptualmente la aplicación de SMGT en desalación: por una parte, utilizar la electricidad producida en un proceso de OI, por otra parte utilizar la descarga de calor en un proceso de destilación de tecnología MED. Para el uso de la desalación por OI se evalúa el caso convencional y el caso de realizar el precalentamiento de la alimentación gracias a los gases de escape de la mTG. Además también analiza el caso de la producción de agua desalada mediante la operación de ambos procesos al mismo tiempo, MED y SWRO. Los principales resultados de ese estudio se muestran a continuación.

El sistema integrado que comprende el dish-mGT y MED de la planta se discute ahora, ya que el sistema de OI está totalmente desacoplado de estos dos. La eficiencia solar a eléctrica de la del sistema dish-mGT es del orden del 19% cuando la temperatura de entrada de la turbina se establece a 900°C y cae a 16.5% cuando se consideran 800°C. Estas eficiencias generales son bastante constantes independientemente del tamaño del disco y solo para los sistemas más pequeños disminuir un poco (efectos de escala en turbomaquinaria). Esto es debido a la velocidad de rotación de la turbomáquina está limitada por el alternador causando una caída en la velocidad específica y el compresor / turbina eficiencia con respecto a los mejores valores alcanzables. La siguiente tabla 5.6 muestra resultados detallados de los tres principales componentes: colector, receptor y mGT.

La Tabla 5.7 muestra que no hay ventajas claras en combinar procesos de desalación MED y SWRO ni en precalentamiento la alimentación en un sistema de desalinización SWRO. Por lo tanto, cualquier solar el sistema de desalinización impulsado por mGT debería considerar un sistema convencional unidad de desalinización SWRO impulsada por la electricidad producida por el micro turbina de gas. En instalaciones más grandes (de mediana escala), varios mGT podría cubrir la demanda de electricidad de la planta desaladora, si esto es más alto que la capacidad de un solo mGT solar.

En cualquier caso, los costos del agua serían del orden de 3.0 €/m<sup>3</sup> en un buena ubicación. Si la ubicación fuera menos favorable, el costo de la electricidad sería mayor (caso de China, por ejemplo, debido a un DNI más bajo), y esto tendrá un impacto significativo en el costo de agua. Para el caso citado, este costo aumentaría a alrededor de 3.35 €/m<sup>3</sup> (el impacto de la ubicación en el costo de la electricidad del sistema SMGT fue discutido a fondo).

<i>Collector</i>					
Dish diameter [m]	7	9	11	13	15
Energy collected [kW <sub>t</sub> ]	30.0	49.6	74.1	103.5	137.8
<i>Micro gas turbine</i>					
Net output [kW <sub>e</sub> ]	5.7	7.5	14.3	19.9	26.5
Microturbine efficiency $\eta_{mGT}$ [%]	18.9	19.2	19.3	19.3	19.3
Pressure Ratio [-]	2.6	3.1	3.1	3.1	3.1
Air mass flow $\dot{m}_{air}$ [g/s]	81.0	122.8	183.4	256.2	341.2
Shaft Speed [rpm]	120000	118060	96580	81720	70820
<i>Receiver</i>					
Heat Input $Q_{rcv}$ [kW <sub>t</sub> ]	22.6	37.4	55.9	78.0	104.0
Heat loss - radiant [kW <sub>t</sub> ]	4.1	6.8	10.2	14.3	19.0
Heat loss - convective [kW <sub>t</sub> ]	0.15	0.22	0.32	0.43	0.55
Window diameter [cm]	8.2	10.6	11.7	14.1	16.3
Glass temperature [°C]	623.5	618.9	621.6	623.8	625.5

**Tabla 5.6 Resultados del trabajo de M. Rollán: Caracterización de captador, receptor y mGT para distintos diámetros del disco parabólico.**

Feed: seawater (40686 ppm & 25°C)	MED	SWRO	SWRO with feed preheat	MED + SWRO	SWRO <sub>2</sub>
Variable O&M Costs - Cost of electricity <sup>(1)</sup> [€/m <sup>3</sup> ]					
South Africa ( <i>LCoE</i> =0.078 /kWh)	0.19	0.23	0.24	0.17	0.23
Morocco ( <i>LCoE</i> =0.104 /kWh)	0.25	0.31	0.32	0.23	0.31
China ( <i>LCoE</i> =0.183 /kWh)	0.44	0.54	0.56	0.40	0.54
Variable O&M Costs - Cost of electricity [€/m <sup>3</sup> ]					
	0.17	0.33	0.33	0.33	0.33
Capital Cost [€]					
MED (1200 €/m <sup>3</sup> d)	31710	0	0	31710	0
SWRO (1000 €/m <sup>3</sup> d)	0	26424.00	264424	26424	52848
<i>Total</i>	<i>31710</i>	<i>26424</i>	<i>264424</i>	<i>58134</i>	<i>52848</i>
Case 1 - <i>LCoE</i> =0.078 €/kWh					
Amortisation [€/year]	14215	11846	11846	26061	23692
Annual expenses - 50% CF [€]	15913	14547	14592	30880	29094
Annual production - 50% CF [m <sup>3</sup> ]	5822	4822	4822	9645	9645
Estimated water cost [€/m <sup>3</sup> ]	3.30	3.02	3.03	3.20	3.02
Case 1 - <i>LCoE</i> =0.183 €/kWh					
Amortisation [€/year]	14215	11846	11846	26061	23692
Annual expenses - 50% CF [€]	17129	16041	16146	33083	32081
Annual production - 50% CF [m <sup>3</sup> ]	5822	4822	4822	9645	9645
Estimated water cost [€/m <sup>3</sup> ]	3.55	3.33	3.35	3.43	3.33

**Tabla 5.7 Resultados del trabajo de M. Rollán: Caracterización de captador, receptor y mGT para distintos diámetros del disco parabólico.**

## 5.5 Evaluación de costes de la desalación de agua de mar mediante SMGT

Para nuestro proyecto trabajaremos para una planta de desalación de 10 m<sup>3</sup>/h nominales que consume la electricidad producida por una SMGT. Veremos y estudiaremos la viabilidad económica para los distintos casos y lugares que hemos realizado el estudio.

### 5.5.1. Costes de capital

Esta tabla 5.8 incluimos los costes de construcción que tenemos que tener en cuenta para una planta típica sin ser con tecnología de ósmosis inversa. Esta información tan detallada la adaptaremos a la capacidad nominal de nuestro sistema de 10 m<sup>3</sup>/h.

<b>Project capital cost breakdown</b>		
<b>CASO CONVENCIONAL</b>		
<b>Capital cost</b>		
<b>Cost ítem</b>	<b>US \$</b>	<b>% of Total</b>
<b>Direct capital (construction) costs</b>		
Site preparation, roads and parking	580000	1,1
Intake	2760000	5,4
Pretreatment	4640000	9,0
RO system equipment	18560000	36,1
Post – treatment	1160000	2,3
Concentrate disposal	1450000	2,8
Waste and solids handling	870000	1,7
Electrical and instrumentation systems	1300000	2,5
Auxiliary and service equipment and utilities	1160000	2,3
Buildings	1740000	3,4
Start up, commissioning and acceptance testing	1160000	2,3
<b>Subtotal ---- direct (construction) costs</b>	<b>35380000</b>	<b>68,8</b>
<b>(% of total capital costs)</b>	<b>884,5</b>	<b>\$/ (m3/d)</b>
Cost of energetic system: Coste de capital de la instalación de la mTG solar, debe sumarse al coste de capital de la desaladora	5790	57900
<b>Project engineering services</b>		
Preliminary engineering	580000	1,1
Pilot testing	580000	1,1
Detailed design	2900000	5,6
Construction management and oversight	1740000	3,4
<b>Subtotal ---- engineering services</b>	<b>5800000</b>	<b>11,3</b>

**Tabla 5.8 Datos de referencia de costes de una planta de desalación de agua de mar a gran escala [Wilf, 2007].**

<b>Project development</b>		
Administration, contracting and management	1160000	2,3
Environment permitting	2610000	5
Legal services	870000	1,7
<b>Subtotal ---- project development</b>	<b>4640000</b>	<b>9,0</b>
<b>Project financing costs</b>		
Interest during construction	116000	0,2
Amortización	721752,00	1,4
<b>Subtotal ---- project financing</b>	<b>837752</b>	<b>1,6</b>
Contingency (10% del capital de construcción, para planta pequeña)	5500000	10,7
<b>Subtotal indirect capital costs</b>	<b>16777752</b>	<b>32,2</b>
<b>Total capital costs</b>	<b>52163542</b>	<b>100</b>

**Tabla 5.9 Datos de referencia de costes de una planta de desalación de agua de mar a gran escala [16]**

Para los casos de desalación solar y para cada una de las localizaciones de nuestro proyecto para la implantación de la tecnología de ósmosis inversa, Hemos contemplado 3 tablas para las distintas ubicaciones:

- Costes capital parcial y total
- Costes de operación y mantenimiento
- Coste total del agua

Las siguientes tablas que tenemos va acorde a la tecnología con la que estamos tratando y que variará en función de ello y de la ubicación que estemos analizando (algunos parámetros como los coeficientes de salario están incluidos en nuestro análisis).

En esta tabla incluimos el análisis financiero para nuestro proyecto (que veríamos que sería para unos 15 años), donde vemos el interés, contingencia de la planta o costes capitales que sea viable.

Para todos los casos hemos determinado que la contingencia debe representar un porcentaje del capital de construcción, ya que tenemos que tener en cuenta cualquier contratiempo e imprevisto en nuestra inversión.

Nuestra idea es estudiar en cada zona del planeta, así el tipo de agua que nos vamos a encontrar ya sea zona Mediterránea, Pacífica o Atlántica a nivel pequeño para nuestros casos.

En esta tabla representamos tanto los costes capitales de construcción y financieros para los proyectos que se realicen en las ubicaciones de Canarias (España) y Fortaleza (Brasil) teniendo en cuenta costes para cada país (así como el valor de la contingencia que hemos considerado anteriormente).

Como hemos explicado, para las diferentes ubicaciones hemos tenido en cuenta los coeficientes del salario y demás costes en función del lugar que queramos realizar o implantar esta tecnología en nuestras plantas.

Project capital cost breakdown: 10 m <sup>3</sup> /h of nominal capacity						
	Case study: Canarias			Case study: Fortaleza		
	Capital cost					
Cost ítem	Euros/(m <sup>3</sup> /h)	Euros	% Total	Euros/(m <sup>3</sup> /h)	Euros	% Total
<b>Direct capital (construction) costs</b>						
Site preparation, roads and parking	309,71	3097,14	0,92	309,71	3097,14	0,89
Intake	1473,81	14738,11	4,36	1473,81	14738,11	4,25
Pretreatment	2477,71	24777,10	7,32	2477,71	24777,10	7,14
RO system equipment	9910,84	99108,42	29,29	9910,84	99108,42	28,56
Post – treatment	619,43	6194,28	1,83	619,43	6194,28	1,78
Concentrate disposal	774,28	7742,85	2,29	774,28	7742,85	2,23
Waste and solids handling	464,57	4645,71	1,37	464,57	4645,71	1,34
Electrical and instrumentation systems	694,19	6941,86	2,05	694,19	6941,86	2,00
Auxiliary and service equipment and utilities	619,43	6194,28	1,83	619,43	6194,28	1,78
Buildings	929,14	9291,41	2,75	929,14	9291,41	2,68
Start up, commissioning and acceptance testing	619,43	6194,28	1,83	619,43	6194,28	1,78
<b>Subtotal - SWRO direct (construction) costs</b>	18892,54	188925,42	55,84	18892,54	188925,42	54,44
	<b>787,19 €/ (m<sup>3</sup>/d)</b>			<b>787,19 €/ (m<sup>3</sup>/d)</b>		
<b>Project engineering services</b>						
Preliminary engineering	309,71	3097,14	0,92	309,71	3097,14	0,89
Pilot testing	309,71	3097,14	0,92	309,71	3097,14	0,89
Detailed design	1548,57	15485,69	4,58	1548,57	15485,69	4,46
Construction management and oversight	929,14	9291,41	2,75	929,14	9291,41	2,68
<b>Subtotal ---- engineering services</b>	3097,14	30971,38	9,15	3097,14	30971,38	8,92
	<b>129,05 €/ (m<sup>3</sup>/d)</b>			<b>129,05 €/ (m<sup>3</sup>/d)</b>		
Cost of energetic system: SMGT	5580	55800		6380	63800	
<b>Subtotal - direct (construction) costs SMGT</b>	<b>232,5 €/ (m<sup>3</sup>/d)</b>			<b>265,83 €/ (m<sup>3</sup>/d)</b>		
<b>DIRECT COSTS SMGT/SWRO</b>	27569,68	275696,8		28369,68	283696,8	
	<b>1148.74 €/ (m<sup>3</sup>/d)</b>			<b>1182.1 €/ (m<sup>3</sup>/d)</b>		

Tabla 5.10 . Cálculo parcial de costes de capital en Canarias y Fortaleza.

El valor de la contingencia lo tomamos del valor del 10% aproximado del coste capital de construcción para nuestro trabajo. Para el resto de ubicaciones utilizaremos los valores que hemos obtenido en la tabla 5.4.

Project development						
	Case study: Canarias			Case study: Fortaleza		
	Capital cost					
Cost ítem	Euros/(m3/h)	Euros	% Total	Euros/(m3/h)	Euros	% Total
Administration, contracting and management	619,43	6194,28	1,8	619,43	6194,28	1,8
Environment permitting	1393,71	13937,12	4,1	1393,71	13937,12	4,0
Legal services	464,57	4645,71	1,4	464,57	4645,71	1,3
<b>Subtotal ---- project development</b>	<b>2477,71</b>	<b>24777,10</b>	<b>7,3</b>	<b>2477,71</b>	<b>24777,10</b>	<b>7,1</b>
	<b>103,24€/ (m3/d)</b>			<b>103,24 €/(m3/d)</b>		
Project financing costs						
Amortización	385,41	3854,08		385,41	3854,08	
<b>Subtotal ---- project financing</b>	<b>385,41</b>	<b>3854,08</b>		<b>385,41</b>	<b>3854,08</b>	
	<b>16,07 €/(m3/d)</b>			<b>16,07 €/(m3/d)</b>		
Contingency	3400,00	34000,00	10,0	3470,00	34700,00	10,0
<b>Subtotal indirect capital costs</b>	<b>9360,46</b>	<b>93604,58</b>	<b>26,5</b>	<b>9430,46</b>	<b>94304,58</b>	<b>26,1</b>
	<b>390,02 €/(m3/d)</b>			<b>392,94 €/(m3/d)</b>		
<b>Total capital costs (direct – tabla 5.14 - and indirect costs)</b>	<b>33833,00</b>	<b>282530,00</b>	<b>82,4</b>	<b>34703,00</b>	<b>283230,00</b>	<b>80,5</b>
	<b>1538,76 €/(m3/d)</b>			<b>1575,04 €/(m3/d)</b>		

**Tabla 5.11 . Cálculo del total de costes de capital en Canarias y Fortaleza.**

A continuación representamos tanto los costes capitales de construcción y financieros para los proyectos que se realicen en las ubicaciones de Casablanca (Marruecos) y Hong Kong (China) teniendo en cuenta costes para cada país (así como el valor de la contingencia que hemos considerado anteriormente).

Como hemos explicado, para las diferentes ubicaciones hemos tenido en cuenta los coeficientes del salario y demás costes en función del lugar que queramos realizar o implantar esta tecnología en nuestras plantas.

Project capital cost breakdown: 10 m <sup>3</sup> /h of nominal capacity						
	Case study: Casablanca			Case study: Hong Kong		
	Capital cost					
Cost ítem	Euros/(m3/h)	Euros	% Total	Euros/(m3/h)	Euros	% Total
<b>Direct capital (construction) costs</b>						
Site preparation, roads and parking	309,71	3097,14	0,91	309,71	3097,14	0,93
Intake	1473,81	14738,11	4,31	1473,81	14738,11	4,41
Pretreatment	2477,71	24777,10	7,25	2477,71	24777,10	7,42
RO system equipment	9910,84	99108,42	29,00	9910,84	99108,42	29,68
Post - treatment	619,43	6194,28	1,81	619,43	6194,28	1,85
Concentrate disposal	774,28	7742,85	2,27	774,28	7742,85	2,32
Waste and solids handling	464,57	4645,71	1,36	464,57	4645,71	1,39
Electrical and instrumentation systems	694,19	6941,86	2,03	694,19	6941,86	2,08
Auxiliary and service equipment and utilities	619,43	6194,28	1,81	619,43	6194,28	1,85
Buildings	929,14	9291,41	2,72	929,14	9291,41	2,78
Start up, commissioning and acceptance testing	619,43	6194,28	1,81	619,43	6194,28	1,85
<b>Subtotal - SWRO direct (construction) costs</b>	18892,54	188925,42	55,84	18892,54	188925,42	54,44
	<b>787,19 €/(m3/d)</b>			<b>787,19 €/(m3/d)</b>		
<b>Project engineering services</b>						
Preliminary engineering	309,71	3097,14	0,91	309,71	3097,14	0,93
Pilot testing	309,71	3097,14	0,91	309,71	3097,14	0,93
Detailed design	1548,57	15485,69	4,53	1548,57	15485,69	4,64
Construction management and oversight	929,14	9291,41	2,72	929,14	9291,41	2,78
<b>Subtotal ---- engineering services</b>	3097,14	30971,38	9,06	3097,14	30971,38	9,27
	<b>129,05 €/(m3/d)</b>			<b>129,05 €/(m3/d)</b>		
Cost of energetic system: SMGT	5900	59000		5200	52000	
<b>Subtotal - direct (construction) costs SMGT</b>	<b>245,83 €/(m3/d)</b>			<b>216,66 €/(m3/d)</b>		
<b>DIRECT COSTS SMGT/SWRO</b>	27889,68	278896,8		27189,68	271896,8	
	<b>1162,07 €/(m3/d)</b>			<b>1132,9 €/(m3/d)</b>		

Tabla 5.12 . Cálculo parcial de costes de capital en Casablanca y Hong Kong.

Project development						
	Case study: Casablanca			Case study: Hong Kong		
	Capital cost					
Cost ítem	Euros/(m3/h)	Euros	% Total	Euros/(m3/h)	Euros	% Total
Administration, contracting and management	619,43	6194,28	1,8	619,43	6194,28	1,9
Environment permitting	1393,71	13937,12	4,1	1393,71	13937,12	4,2
Legal services	464,57	4645,71	1,4	464,57	4645,71	1,4
<b>Subtotal ---- project development</b>	<b>2477,71</b>	<b>24777,10</b>	<b>7,3</b>	<b>2477,710</b>	<b>24777,10</b>	<b>7,4</b>
	<b>103,24 €/(m3/d)</b>			<b>103,24 €/(m3/d)</b>		
Project financing costs						
Amortización	385,41	3854,08		385,41	3854,08	
<b>Subtotal ---- project financing</b>	<b>385,41</b>	<b>3854,08</b>		<b>385,41</b>	<b>3854,08</b>	
	<b>16,07 €/(m3/d)</b>			<b>16,07 €/(m3/d)</b>		
Contingency (10% del capital de construcción, para planta pequeña)	3420	34200	10,0	3340	33400	10,0
<b>Subtotal indirect capital costs</b>	<b>9380,46</b>	<b>93804,58</b>	<b>26,3</b>	<b>9300,46</b>	<b>93004,58</b>	<b>26,7</b>
	<b>390,85 €/(m3/d)</b>			<b>387,52 €/(m3/d)</b>		
<b>Total capital costs (direct – tabla 5.14 - and indirect costs)</b>	<b>34173,00</b>	<b>282730,00</b>	<b>81,6</b>	<b>33393,00</b>	<b>281930,00</b>	<b>83,3</b>
	<b>1552,92 €/(m3/d)</b>			<b>1520,42 €/(m3/d)</b>		

**Tabla 5.13. Cálculo del total de costes de capital en Casablanca y Hong Kong.**

A continuación representamos tanto los costes capitales de construcción y financieros para los proyectos que se realicen en las ubicaciones de Durban (Sudáfrica) teniendo en cuenta costes para cada país (así como el valor de la contingencia que hemos considerado anteriormente).

Como hemos explicado, para las diferentes ubicaciones hemos tenido en cuenta los coeficientes del salario y demás costes en función del lugar que queramos realizar o implantar esta tecnología en nuestras plantas.

<b>Project capital cost breakdown: 10 m<sup>3</sup>/h of nominal capacity</b>			
	<b>Case study: Durban</b>		
	<b>Capital cost</b>		
<b>Cost ítem</b>	<b>Euros/(m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Euros</b>	<b>% Total</b>
<b>Direct capital (construction) costs</b>			
Site preparation, roads and parking	309,71	3097,14	0,92
Intake	1473,81	14738,11	4,38
Pretreatment	2477,71	24777,10	7,37
RO system equipment	9910,84	99108,42	29,48
Post – treatment	619,43	6194,28	1,84
Concentrate disposal	774,28	7742,85	2,30
Waste and solids handling	464,57	4645,71	1,38
Electrical and instrumentation systems	694,19	6941,86	2,06
Auxiliary and service equipment and utilities	619,43	6194,28	1,84
Buildings	929,14	9291,41	2,76
Start up, commissioning and acceptance testing	619,43	6194,28	1,84
<b>Subtotal -- SWRO direct (construction) costs</b>	<b>18892,54</b>	<b>188925,42</b>	<b>56,19</b>
		<b>787,19 €/ (m<sup>3</sup>/d)</b>	
Preliminary engineering	309,71	3097,14	0,92
Pilot testing	309,71	3097,14	0,92
Detailed design	1548,57	15485,69	4,61
Construction management and oversight	929,14	9291,41	2,76
<b>Subtotal ---- engineering services</b>	<b>3097,14</b>	<b>30971,38</b>	<b>9,21</b>
		<b>129,05 €/ (m<sup>3</sup>/d)</b>	
Cost of energetic system: SMGT	5400	54000	
<b>Subtotal ---- direct (construction) costs SMGT</b>		<b>225,00 €/ (m<sup>3</sup>/d)</b>	
<b>DIRECT COSTS SMGT/SWRO</b>	<b>27389</b>	<b>273980</b>	
		<b>1141.24 €/ (m<sup>3</sup>/d)</b>	

Tabla 5.14 . Cálculo parcial de costes de capital en Durban.

Project development			
Case study: Durban			
Capital cost			
Cost ítem	Euros/(m3/h)	Euros	% Total
Administration, contracting and management	619,43	6194,28	1,8
Environment permitting	1393,71	13937,12	4,1
Legal services	464,57	4645,71	1,4
<b>Subtotal ---- project development</b>	<b>2477,71</b>	<b>24777,10</b>	<b>7,4</b>
		<b>103,24 €/(m3/d)</b>	
Project financing costs			
Amortización	385,41	3854,08	
<b>Subtotal ---- project financing</b>	<b>385,41</b>	<b>3854,08</b>	
		<b>16,07€/(m3/d)</b>	
Contingency (10% del capital de construcción, para planta pequeña)	3370	33700	10,0
		<b>140.42 €/(m3/d)</b>	
<b>Subtotal indirect capital costs</b>	<b>9330,46</b>	<b>93304,58</b>	<b>26,6</b>
		<b>388,77 €/(m3/d)</b>	
<b>Total capital costs (direct – tabla 5.14 - and indirect costs)</b>	<b>33623,00</b>	<b>336230,00</b>	
		<b>1530,01€/(m3/d)</b>	

**Tabla 5.15. Cálculo del total de costes de capital en Durban.**

### 5.5.2. Costes de operación

En estas tablas veremos los costes variables, fijos y totales de los costes de operación y mantenimiento.

Estos costes irán en función de algunos parámetros como la energía, mantenimientos o costes laborales que según en la zona que estemos tendremos en cuenta en función del coste comparativo del salario que hemos explicado en tabla del coste del agua (lo veremos en el siguiente apartado del trabajo).

Project annual operation and maintenance cost breakdown				
Annual O&M costs				Caso solar (EEUU)
Variable O&M costs				Horas operación (para 3500h)
Cost ítem	US \$/m3	% of Total	Euros/m3	Euros/m3
Energy (conventional)	0,222	55,5	0,198	0,33
Chemicals	0,024	6	0,021	0,021
Replacement of membranes and cartridge filters	0,042	10,5	0,037	0,037
Waste stream disposal	0,018	4,5	0,016	0,016
<b>Subtotal ---- variable O&amp;M costs</b>	<b>0,306</b>	<b>76,5</b>	<b>0,272</b>	<b>0,405</b>

**Tabla 5.16. Cálculo del coste variable de operación y mantenimiento [16].**

Annual O&M costs				Caso solar (EEUU)
Fixed O&M costs				Horas operación (para 3500h)
Cost ítem	US \$/m3	% of Total	Euros/m3	Euros/m3
Labor cost	0,023	5,75	0,020	0,000123
Maintenance	0,026	6,5	0,023	0,000139
Environmental and performance monitoring	0,006	1,5	0,005	0,000032
Indirect O&M costs	0,039	9,75	0,035	0,000208
<b>Subtotal ---- fixed O&amp;M costs</b>	<b>0,094</b>	<b>23,5</b>	<b>0,084</b>	<b>0,001</b>
<b>Total O&amp;M costs</b>	<b>0,400</b>	<b>100</b>	<b>0,356</b>	<b>0,405</b>

**Tabla 5.17. Cálculo del coste fijo y total de operación y mantenimiento [16].**

Para tomar como base para ver el resto de nuestras zonas (tomaremos el caso solar en EEUU) para implementarlos a los demás, teniendo en cuenta las horas de operación que nos permite nuestra planta a partir del DIN que sacamos estos valores con la base de datos METEONORM.

<b>Project annual operation and maintenance cost breakdown (Considering DIN &gt;700 W/m<sup>2</sup>)</b>					
<b>Annual O&amp;M costs</b>	<b>Case study: Canarias</b>	<b>Case study: Fortaleza</b>	<b>Case study: Durban</b>	<b>Case study: Casablanca</b>	<b>Case study: Hong Kong</b>
<b>Horas Operación</b>	<b>686</b>	<b>803</b>	<b>833</b>	<b>1016</b>	<b>256</b>
<b>Cost ítem</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>
Energy (conventional)	0,54	0,33	0,23	0,54	0,31
Chemicals	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
Replacement of membranes and cartridge filters	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037
Waste stream disposal	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
<b>Subtotal ---- variable O&amp;M costs</b>	<b>0,615</b>	<b>0,405</b>	<b>0,305</b>	<b>0,615</b>	<b>0,385</b>

**Tabla 5.18. Cálculo del coste variable de operación y mantenimiento para DIN >700 W/m<sup>2</sup>.**

<b>Coefficiente comparativo del salario (de cada caso)</b>					
<b>Annual O&amp;M costs</b>	<b>Case study: Canarias</b>	<b>Case study: Fortaleza</b>	<b>Case study: Durban</b>	<b>Case study: Casablanca</b>	<b>Case study: Hong Kong</b>
<b>Horas Operación</b>	<b>686</b>	<b>803</b>	<b>833</b>	<b>1016</b>	<b>256</b>
<b>Cost ítem</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>
Labor cost	0,000123	0,000123	0,000123	0,000123	0,000123
Maintenance	0,000139	0,000139	0,000139	0,000139	0,000139
Environmental and performance monitoring	0,000032	0,000032	0,000032	0,000032	0,000032
Indirect O&M costs	0,000208	0,000208	0,000208	0,000208	0,000208
<b>Subtotal ---- fixed O&amp;M costs</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>
<b>Total O&amp;M costs</b>	<b>0,615</b>	<b>0,405</b>	<b>0,305</b>	<b>0,615</b>	<b>0,385</b>

**Tabla 5.19. Cálculo del coste fijo y total de operación y mantenimiento para DIN >700 W/m<sup>2</sup>.**

En estas plantas para implantar la ósmosis inversa, nuestra inyección de energía será a partir de una microturbina de energía solar (que ya hemos explicado en nuestro proyecto) dependerá de las horas solares diarias que tendremos y que hemos plasmado en función de las horas de operación que nos permitirá trabajar con nuestra tecnología sin tener que emplear energía externa (siempre que no sea necesario).

En nuestro proyecto hemos incorporado Energy (conventional) en esas horas donde nuestra planta no puede dar esa energía necesaria tomaríamos esa energía externa necesaria para cubrir esas horas que haya más demanda y su correspondiente coste, sería como una energía de respaldo en estos casos.

Project annual operation and maintenance cost breakdown (Caso DIN >600 W/m <sup>2</sup> )					
Annual O&M costs	Caso Canarias	Caso Fortaleza	Caso Durban	Caso Casablanca	Caso Hong Kong
<b>Horas Operación</b>	<b>686</b>	<b>803</b>	<b>833</b>	<b>1016</b>	<b>256</b>
<b>Cost ítem</b>	<b>Euros/m<sup>3</sup></b>	<b>Euros/m<sup>3</sup></b>	<b>Euros/m<sup>3</sup></b>	<b>Euros/m<sup>3</sup></b>	<b>Euros/m<sup>3</sup></b>
Energy (conventional)	0,54	0,33	0,23	0,54	0,31
Chemicals	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
Replacement of membranes and cartridge filters	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037
Waste stream disposal	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
<b>Subtotal ---- variable O&amp;M costs</b>	<b>0,615</b>	<b>0,405</b>	<b>0,305</b>	<b>0,615</b>	<b>0,385</b>

Tabla 5.20. Cálculo del coste variable de operación y mantenimiento para DIN >600 W/m<sup>2</sup>.

Coeficiente comparativo del salario (de cada caso)					
Annual O&M costs	Caso Canarias	Caso Fortaleza	Caso Durban	Caso Casablanca	Caso Hong Kong
<b>Horas Operación</b>	<b>686</b>	<b>803</b>	<b>833</b>	<b>1016</b>	<b>256</b>
<b>Cost ítem</b>	<b>Euros/m<sup>3</sup></b>	<b>Euros/m<sup>3</sup></b>	<b>Euros/m<sup>3</sup></b>	<b>Euros/m<sup>3</sup></b>	<b>Euros/m<sup>3</sup></b>
Labor cost	0,000123	0,000123	0,000123	0,000123	0,000123
Maintenance	0,000139	0,000139	0,000139	0,000139	0,000139
Environmental and performance monitoring	0,000032	0,000032	0,000032	0,000032	0,000032
Indirect O&M costs	0,000208	0,000208	0,000208	0,000208	0,000208
<b>Subtotal ---- fixed O&amp;M costs</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>
<b>Total O&amp;M costs</b>	<b>0,615</b>	<b>0,405</b>	<b>0,305</b>	<b>0,615</b>	<b>0,385</b>

Tabla 5.21. Cálculo del coste fijo y total de operación y mantenimiento para DIN >600 W/m<sup>2</sup>.

Hemos considerado la radiación que podemos tener para cada zona (DIN >600 W/m<sup>2</sup>, DIN >600 W/m<sup>2</sup> o DIN >600 W/m<sup>2</sup>) donde podemos comprobar que no hay mucha diferencia entre los distintos estudios que hemos visto para hacernos una idea de como podemos sacar partido a esta tecnología.

Project annual operation and maintenance cost breakdown (Caso DIN >500 W/m <sup>2</sup> )					
Annual O&M costs	Caso Canarias	Caso Fortaleza	Caso Durban	Caso Casablanca	Caso Hong Kong
<b>Horas Operación</b>	<b>686</b>	<b>803</b>	<b>833</b>	<b>1016</b>	<b>256</b>
<b>Cost ítem</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>
Energy (conventional)	0,54	0,33	0,23	0,54	0,31
Chemicals	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
Replacement of membranes and cartridge filters	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037
Waste stream disposal	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
<b>Subtotal ---- variable O&amp;M costs</b>	<b>0,615</b>	<b>0,405</b>	<b>0,305</b>	<b>0,615</b>	<b>0,385</b>

Tabla 5.22. Cálculo del coste variable de operación y mantenimiento para DIN >500 W/m<sup>2</sup>.

Coeficiente comparativo del salario (de cada caso)					
Annual O&M costs	Caso Canarias	Caso Fortaleza	Caso Durban	Caso Casablanca	Caso Hong Kong
<b>Horas Operación</b>	<b>686</b>	<b>803</b>	<b>833</b>	<b>1016</b>	<b>256</b>
<b>Cost ítem</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>	<b>Euros/m3</b>
Labor cost	0,000123	0,000123	0,000123	0,000123	0,000123
Maintenance	0,000139	0,000139	0,000139	0,000139	0,000139
Environmental and performance monitoring	0,000032	0,000032	0,000032	0,000032	0,000032
Indirect O&M costs	0,000208	0,000208	0,000208	0,000208	0,000208
<b>Subtotal ---- fixed O&amp;M costs</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>
<b>Total O&amp;M costs</b>	<b>0,615</b>	<b>0,405</b>	<b>0,305</b>	<b>0,615</b>	<b>0,385</b>

Tabla 5.23. Cálculo del coste fijo y total de operación y mantenimiento para DIN >500 W/m<sup>2</sup>.

### 5.5.3. Costes de agua

En estas tablas del coste de agua, se incluyen los valores que hemos visto en las tablas anteriores de los costes variables, fijos y totales para va relacionado al m<sup>3</sup>/d del coste del agua que nos puede llegar a costar para producirlo y como ver la viabilidad en función del capital que hemos invertido en nuestro proyecto.

Project water cost breakdown			
Fixed cost component			
Cost of water ítem	US \$/m3	\$/kgal	% of Total
Capital cost recovery	0,332	1,257	45,4
Labor cost	0,023	0,087	3,1
Maintenance	0,026	0,098	3,6
Environment and performance monitoring	0,006	0,023	0,8
Indirect O&M costs	0,039	0,148	5,3
<b>Subtotal ---- fixed water cost component</b>	<b>0,426</b>	<b>1,613</b>	<b>58,2</b>

Tabla 5.24. Cálculo del coste fijo de agua.

Variable cost component			
Cost of water ítem	US \$/m3	\$/kgal	% of Total
Energy	0,222	0,84	30,3
Chemicals	0,024	0,091	3,3
Replacement of membranes and cartridge filters	0,042	0,159	5,7
Waste stream disposal	0,018	0,068	2,5
<b>Subtotal ---- variable water cost component</b>	<b>0,306</b>	<b>1,158</b>	<b>41,8</b>
<b>Total cost of water</b>	<b>0,732</b>	<b>2,771</b>	<b>100,0</b>

Tabla 5.23. Cálculo del coste variable y total de agua.

En estas tablas sobre las ubicaciones que hemos realizado en nuestro trabajo fin de grado, podemos ver los costes del agua que tendremos en el proceso de desalación y con la tecnología de ósmosis inversa para ver el poco valor que tienen costes como los indirectos o laborales como sí la inversión como capital cost recovery.

<b>Project water cost breakdown</b>				
<b>Fixed cost component</b>				
	<b>Caso Canarias</b>		<b>Caso Fortaleza</b>	
	<b>Euro/m3</b>	<b>% de total</b>	<b>Euro/m3</b>	<b>% de total</b>
Capital cost recovery	3,862	87,7	3,962	92,3
Labor cost	0,000	0,0	0,000	0,0
Maintenance	0,000	0,0	0,000	0,0
Environment and performance monitoring	0,000	0,0	0,000	0,0
Indirect O&M costs	0,000	0,0	0,000	0,0
<b>Subtotal --- fixed water cost component</b>	<b>3,863</b>	<b>87,7</b>	<b>3,962</b>	<b>92,3</b>

**Tabla 5.25. Cálculo del coste fijo de agua en Canarias y Fortaleza.**

<b>Variable cost component</b>				
	<b>Caso Canarias</b>		<b>Caso Fortaleza</b>	
	<b>Euro/m3</b>	<b>% de total</b>	<b>Euro/m3</b>	<b>% de total</b>
Energy	0,540	12,3	0,330	7,7
Chemicals	0,000	0,0	0,000	0,0
Replacement of membranes and cartridge filters	0,000	0,0	0,000	0,0
Waste stream disposal	0,000	0,0	0,000	0,0
<b>Subtotal --- variable water cost component</b>	<b>0,540</b>	<b>12,3</b>	<b>0,330</b>	<b>7,7</b>
<b>Total cost of water</b>	<b>4,403</b>	<b>100,0</b>	<b>4,292</b>	<b>100,0</b>

**Tabla 5.26. Cálculo del coste variable y total de agua en Canarias y Fortaleza.**

Project water cost breakdown						
Fixed cost component						
	Caso Durban		Caso Casablanca		Caso Hong Kong	
	Euro/m3	% de total	Euro/m3	% de total	Euro/m3	% de total
Capital cost recovery	3,838	94,3	3,901	87,8	3,812	92,5
Labor cost	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0
Maintenance	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0
Environment and performance monitoring	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0
Indirect O&M costs	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0
<b>Subtotal ---- fixed water cost component</b>	<b>3,838</b>	<b>94,3</b>	<b>3,901</b>	<b>87,8</b>	<b>3,812</b>	<b>92,5</b>

Tabla 5.27. Cálculo del coste fijo de agua en Durban, Casablanca y Hong Kong.

Variable cost component						
	Caso Durban		Caso Casablanca		Caso Hong Kong	
	Euro/m3	% de total	Euro/m3	% de total	Euro/m3	% de total
Energy	0,230	5,7	0,540	12,2	0,310	7,5
Chemicals	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0
Replacement of membranes and cartridge filters	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0
Waste stream disposal	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0
<b>Subtotal ---- variable water cost component</b>	<b>0,230</b>	<b>5,7</b>	<b>0,540</b>	<b>12,2</b>	<b>0,310</b>	<b>7,5</b>
<b>Total cost of water</b>	<b>4,069</b>	<b>100,0</b>	<b>4,442</b>	<b>100,0</b>	<b>4,123</b>	<b>100,0</b>

Tabla 5.28. Cálculo del coste variable y total de agua en Durban, Casablanca y Hong Kong.

## 6. CONCLUSIONES

---

1. Se ha realizado una evaluación preliminar de costes de agua desalada utilizando una tecnología novedosa que está desarrollando la Universidad de Sevilla basada en un sistema de desalación alimentado mediante una micro turbina de gas solar.
2. Tras realizar los cálculos, los costes de agua nos dan valores de alrededor de 4,4 €/m<sup>3</sup> que es razonable y lo que se estima esperado ya que los valores mínimos obtenidos en aplicaciones eólicas de gran capacidad en lugares muy favorables son de 1,2-1,8 €/m<sup>3</sup> que hace viable nuestro proyecto de planta en cada una de las Ubicaciones.
3. En nuestro proyecto para tener en cuenta cual sería la mejor inversión tendríamos que en el caso de Hong Kong (China) donde tenemos un valor de 1391,38€/m<sup>3</sup>/d sería más favorable para ello en comparación con Fortaleza (Brasil) donde es más alto rondando 1445,96 €/m<sup>3</sup>/d viendo una variación del 4%, un valor cercano al de Fortaleza sería el de Casablanca (Marruecos) que sería de 1432,88€/m<sup>3</sup>/d. Así que los valores de inversión varían entre ambas cifras teniendo como punto medio las Islas Canarias (España) que sería alrededor de 109,71€/m<sup>3</sup>/d o de Durban (Sudáfrica) con un valor alrededor de 1409,71 €/m<sup>3</sup>/d.
4. La influencia en el coste en que la planta de desalación tiene el valor de DNI a partir del cual la planta puede operar, tomando en consideración que lo factible será para valores de 500 o 600 o 700 W/m<sup>2</sup> no cambia mucho los valores de costes para nuestra planta. Si habría que considerar en los valores en los que la planta no podría operar en esas horas donde la planta no estaría disponible deberíamos tener en cuenta otro aporte de energía para esas horas en nuestra planta.
5. A partir de la revisión bibliográfica y de productos comerciales realizada, puede concluirse que: Aunque la OI está muy desarrollada, todavía hay oportunidades para reducir aún más el consumo de energía. Estas oportunidades incluyen: reducción de la incrustación a través del tratamiento previo. El desarrollo de membranas más resistentes al ensuciamiento y a los depósitos de sales; el desarrollo de membranas de alto flujo, es decir, alta permeabilidad que permitan reducir la presión de operación; el desarrollo de membranas resistentes a los oxidantes; la mejora de la configuración mecánica de los módulos de membrana y el diseño de su sistema. Desarrollo de diseños de sistemas.

# Referencias

---

- [1] Apuntes Tratamientos aguas/Turbocharger/Sistemas auxiliares, Grado Ingeniería Tecnologías Industriales, 2019
- [2] Francisco Virgili, <<Desalination market update>> Third Quarter Assesment, DESALDATA, Octubre 2016.
- [3] Arturo Buenaventura Pouyfaucón y Lourdes García-Rodríguez, <<Solar thermal-powered desalination: A viable solution for a potential market>>Desalination, nº435, pp. 60–69, 2018
- [4] Ecuación de transporte / Fundamentos termodinámicos / Polarización, Lourdes García Rodríguez, Máster Ingeniería Industrial, 2019
- [5] ERI-EPX 0218ER, Desalination product catalog, Energy Recovery, [Online] <http://www.energyrecovery.com/resource/water-products-catalog/>, 2018
- [6] iSave Danfoss 118585, [Online] <https://www.danfoss.com/es-es/products/energy-recovery-devices/dcs/energy-recovery-devices-for-reverse-osmosis-applications/>, [Accesed November 2018].
- [7] LG Chem NanoH<sub>2</sub>O, RO Membrane [Online] <https://www.lgchem.com/global/it-electronic-products/water-solution/product-detail-PDCDA000>
- [8] Toray (TM280a - 370), Sea Water RO Elements, Lenntech, [Online] <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Toray-TM820A-370-Sea-Water-RO-Element-L.pdf>, [Accesed December 2018].
- [9] Nitto Denko Hydranautics, SWC6 – 4040, Lenntech, [Online] <https://www.lenntech.com/products/Hydranautics-SWC-Membranes/SWC5-4040/SWC5-4040/index.html>, [Accesed December 2018].
- [10] Dow – Filmtec – SW30HR2E – 440i, Filmtec Membranes, Lenntech, [Online] <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Dow-Filmtec-BW30HR-440i.pdf>, [Accesed December 2018].
- [11] Michael Papapetrou, Andrea Cipollina, Umberto La Commare, Giorgio Micale, Guillermo Zaragoza y George Kosmadakis, <<Assessment of methodologies and data used to calculate desalination costs>>, Desalination, nº 419, pp 8–19, 2017
- [12] Waleska Freitas da Silva, Ivan Felipe Silva dos Santos, Maria Claudia Costa de Oliveira Botan, Ana Paula Moni Silva y Regina Mambeli Barros, <<Reverse osmosis desalination plants in Brazil: A cost analysis using three different energy sources>>, Sustainable Cities and Society, nº 43, pp 134–143, 2018
- [13] W.F. Hea, F. Wub, T. Wenc, Y.P. Kong y D. Han, <<Cost analysis of a humidification dehumidification desalination system with a packed bed dehumidifier>>, Energy Conversion and Management, nº 171, pp 452–460, 2018
- [14] Miguel Rollán Sánchez-Ramade, <<Estudio termodinámico de la aplicación de un equipo de desalación al sistema solar de concentración de disco parabólico con microturbina de gas>>, Trabajo fin de grado, 2018
- [15] David Sánchez, Miguel Rollán, M. Lourdes García-Rodríguez y G.S. Martínez, <<Solar Desalination based on Micro Gas Turbines driven by Parabolic Dish Collectors (Draft)>>, Proceedings of ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2019, pp. 8-9, Phoenix, Junio 2019.

- [16] Mark Wilf, <<Membrane Desalination Technology>>, Reverse Osmosis, Nanofiltration and Hybrid Systems Process, Applications and Economics, pp 498-500, 2007.
- [17] Lourdes García Rodríguez, <<MSCA-ITN-2017: Innovative Training Networks>>, Country corrections coefficients (CCC) for ITN and IF living allowances, pp. 8, Diciembre 2016.
- [18] Millero, F.J.; Feistel, R.; Wright, D. G., McDougall, T. J., <<The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale>> Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 55(1), 2008, pp. 50-72.
- [19] Vicente J. Subiela, Baltasar Peñate y Lourdes García-Rodríguez, <<Configurations of reverse osmosis with variable energy consumption for off-grid wind-powered seawater desalination: system modelling and water cost>>, capítulo 2, 2019
- [20] Vicente J. Subiela, <<Main technical and economic guidelines to implement wind/solar powered reverse osmosis desalination systems>>, Chapter 1, Tesis Doctoral, ETSI. Universidad de Sevilla, pp. 50, Noviembre 2018.
- [21] DuPont. DuPont™, the DuPont Oval Logo, and all trademarks and service marks denoted with ™, SM or ® are owned by affiliates of DuPont de Nemours, Inc. unless otherwise noted <http://www.dupont.com/products/UltrafiltrationSFP2880.html> [Accesed April 2019].
- [22] T. Szacsvay, P. Hofer-Noser, M. Posnansky, Technical and economic aspects of small scale solar pond seawater desalination systems, *Desalination* 122 (1999) 185–193.
- [23] G. Fiorenza, V.K. Sharma, G. Braccio, Techno-economic evaluation of a solar powered water desalination plant, *Energy Convers. Manag.* 44 (2003) 2217–2240, [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00247-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00247-9).
- [24] D.E.A. Zaid, Economic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by photovoltaic for possible application in the northwest coast of Egypt, *Desalin. Water Treat.* 54 (2015) 3211–3217, <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2014.911704>.
- [25] M. Al-Hamahmy, H.E.S. Fath, K. Khanafer, Techno-economical simulation and study of a novel MSF desalination process, *Desalination* 386 (2016) 1–12, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2016.02.018>.
- [26] L. Tian, Y. Wang, J. Guo, Economic analysis of a 2 × 200 MW nuclear heating reactor for seawater desalination by multi-effect distillation (MED), *Desalination* 152 (2003) 223–228, [http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01067-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01067-6).
- [27] N. Wade, Distillation plant development and cost update, *Desalination* 136 (2001) 3–12, [http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00159-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00159-X).
- [28] L. Tian, J. Guo, Y. Tang, L. Cao, A historical opportunity: economic competitiveness of seawater desalination project between nuclear and fossil fuel while the world oil price over \$50 per boe - part A: MSF, *Desalination* 183 (2005) 317–325, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2005.05.008>.
- [29] S. Nisan, N. Benzarti, A comprehensive economic evaluation of integrated desalination systems using fossil fuelled and nuclear energies and including their environmental costs, *Desalination* 229 (2008) 125–146, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2007.07.031>.
- [30] A. Eslamimanesh, M.S. Hatamipour, Economical study of a small-scale direct contact humidification-dehumidification desalination plant, *Desalination* 250 (2010) 203–207, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2008.11.015>.
- [31] M. Moser, F. Trieb, T. Fichter, J. Kern, Renewable desalination: a methodology for cost comparison, *Desalin. Water Treat.* 51 (2013) 1171–1189, <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2012.715446>.
- [32] Lima, L. A., & Bezerra Filho, C. R. (2012). Wind resource evaluation in São João do Cariri (SJC) – paraíba, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 474–480.

- [33] Khahro, S. F., Tabbassum, K., Soomro, A. M., Liao, X., Alvi, M. B., Dong, L., et al. (2014). Techno-economical evaluation of wind energy potential and analysis of power generation from wind at Gharo, Sindh Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 460–474.
- [34] CRESESEB - Reference Center for Solar and Wind Energy Sérgio de Salvo Brito (2013). Photovoltaic system generation. [Accessed on May 12th, 2017. (In Portuguese)] Available in: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&cid=cse\\_sistema\\_fotovoltaico](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=cse_sistema_fotovoltaico).
- [35] Tolmasquim, M. T. (2016). *Thermal energy: Natural gas, biomass, coal, nuclear*. Rio de Janeiro: EPE [In Portuguese].
- [36] Abreu, F. V., Costa Filho, M. A. F., & Souza, M. C. L. (2009). Sanitary biogas for renewable clean energy generation - A study of technical and economic feasibility. IX Ibero-American Congress of Mechanical Engineering (CIBIM) [In Portuguese].
- [37] Rangel, M. S. (2016). Study of the economic viability of generation of electricity by renewablesources in Brazil. Environmental Engineering Graduation Final Work. Minas Gerais, Brazil: Federal University of Itajubá [In Portuguese].
- [38] IRENA, International Renewable Energy National Agency (2012). *Renewable energy technologies: Cost analysis series – solar photovoltaics*, vol. 1. Issue 4/5. [Accessed on June 07th 2018] Available in: [https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re\\_technologies\\_cost\\_analysis-solar\\_pv.pdf](https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-solar_pv.pdf).
- [39] National Research Council (2008). *Desalination: A national perspective*. Washington, DC: National Academies Press.
- [40] Branker, K., Pathak, M. J. M., & Pearce, J. M. (2011). A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4470–4482.
- [41] H.M. Ettouney, H.T. El-Dessouky, R.S. Faibish, P.J. Gowin, Evaluating the economics of desalination, *Chem. Eng. Prog.* 98 (2002) 32–39.
- [42] E. Ntavou, G. Kosmadakis, D. Manolakos, G. Papadakis, D. Papantonis, Experimental evaluation of a multi-skid reverse osmosis unit operating at fluctuating power input, *Desalination* 398 (2016) 77–86, <http://dx.doi.org/10.1016/j>.
- [43] J.K. Kaldellis, K.A. Kavadias, E. Kondili, Renewable energy desalination plants for the Greek islands - technical and economic considerations, *Desalination* 170 (2004) 187–203, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2004.01.005>.
- [44] A.N. Mabrouk, H.E.S. Fath, Technoeconomic study of a novel integrated thermal MSF–MED desalination technology, *Desalination* 371 (2015) 115–125, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2015.05.025>.
- [45] H. Mokhtari, H. Ahmadisedigh, I. Ebrahimi, Comparative 4E analysis for solar desalinated water production by utilizing organic fluid and water, *Desalination* 377 (2016) 108–122, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2015.09.014>.
- [46] R. Valladares Linares, Z. Li, V. Yangali-Quintanilla, N. Ghaffour, G. Amy, T. Leiknes, et al., Life cycle cost of a hybrid forward osmosis - low pressure reverse osmosis system for seawater desalination and wastewater recovery, *Water Res.* 88 (2016) 225–234, <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.017>.
- [47] U.K. Kesieme, N. Milne, H. Aral, C.Y. Cheng, M. Duke, Economic analysis of desalination technologies in the context of carbon pricing, and opportunities for membrane distillation, *Desalination* 323 (2013) 66–74, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2013.03.033>.
- [48] A. Lamei, P. van der Zaag, E. von Münch, Impact of solar energy cost on water production cost of seawater desalination plants in Egypt, *Energ Policy* 36 (2008) 1748–1756, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.12.026>.
- [49] H.M. Ettouney, H.T. El-Dessouky, R.S. Faibish, P.J. Gowin, Evaluating the economics of desalination, *Chem. Eng. Prog.* 98 (2002) 32–39.

- [50] A. Hafez, S. El-manharawy, Economics of seawater RO desalination in the Red Sea region, Egypt. Part1.pdf, *Desalination* 153 (2002) 335–347.
- [51] E. Lapuente, Full cost in desalination. A case study of the Segura River Basin, *Desalination* 300 (2012) 40–45, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2012.06.002>.
- [52] A. Malek, M.N.A. Hawlader, J.C. Ho, Design and economics of RO seawater desalination, *Desalination* 105 (1996) 245–261, [http://dx.doi.org/10.1016/0011-9164\(96\)00081-1](http://dx.doi.org/10.1016/0011-9164(96)00081-1).
- [53] V.G. Gude, Desalination and sustainability - an appraisal and current perspective, *Water Res.* 89 (2016) 87–106, <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.012>.
- [54] S. Kalogirou, Effect of fuel cost on the price of desalination water: a case for renewables, *Desalination* 138 (2001) 137–144, [http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00255-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00255-7).
- [55] Expansión, Fondo Monetario Internacional (FMI) [Online] <https://datosmacro.expansion.com/paises/grupos/fmi>, Noviembre 2019
- [56] Organización Internacional del Trabajo (OIT) [Online] [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/---publ/documents/publication/wcms\\_541632.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/---publ/documents/publication/wcms_541632.pdf), Noviembre 2019