

Trabajo Fin de Máster  
Máster en Sistemas de Energía Térmica

Desarrollo de software de simulación de procesos de  
desalación

Autor: Álvaro Silván Zafra

Tutora: Dra. Lourdes García Rodríguez

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

Sevilla, 2018





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Sistemas de Energía Térmica

# Desarrollo de software de simulación de procesos de desalación

Autor:

Álvaro Silván Zafra

Tutora:

Dra. Lourdes García Rodríguez

Departamento de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Máster: Desarrollo de software de simulación de procesos de desalación

Autor: Álvaro Silván Zafra

Tutora: Dra. Lourdes García Rodríguez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



*A mi madre y mi hermana*

*A mis amigos*

*A Eva*



# Agradecimientos

---

Quiero agradecer este trabajo, en primer lugar, a las dos personas más importantes en mi vida: mi madre y mi hermana. Por su apoyo incondicional cada día en todo aquello que considero importante para mí. También a mi abuela, Mari, que ha podido ver el final de esta aventura académica. A mis amigos, por sus ganas de que cumpla todos mis objetivos y celebrar cada uno de mis éxitos conmigo. A mi tutora, Lourdes, por tener siempre un hueco sea cuando sea para dedicarme tiempo. Y, por último, y no menos importante, a Eva, por ser ella sin más.

*Álvaro Silván Zafra*

*Sevilla, 2018*



En el presente proyecto se llevará a cabo el desarrollo de un software de simulación de procesos de desalación que proporcionará una visión preliminar de posibles configuraciones. Finalmente, se evaluarán los resultados proporcionados comparándolos con el software de “open source” ROSA con el objetivo de corroborar la información recabada, así como los cálculos aplicados.

Para ello, en primer lugar, se describirán los conceptos básicos que definen el proceso de desalación desde el punto de vista termodinámico y químico. Posteriormente, se realizará el estudio del arte de la tipología de membranas existente a nivel comercial, evaluando su comportamiento en a través ROSA. Se calculará la permeabilidad de las membranas comerciales a partir de los resultados obtenidos, que serán consideradas como parámetros constantes a una temperatura dada y asumiendo un cierto tiempo de vida útil transcurrido.

Los datos empleados para el cálculo de la permeabilidad por cada una de las membranas han sido:

- **Tipo de membrana:**
  - Extra High Reaction: modelo SW30XHR440-i.
  - High Reaction Low Energy: modelo SW30HRLE440-i.
  - Extra Low Energy: modelo SW30XLE440-i.
  - Ultra Low Energy: modelo SW30ULE440-i.
  
- **Presiones de alimentación:**
  - 50 bar.
  - 55 bar.
  - 60 bar.
  - 65 bar.
  
- **Zonas (composición del agua):**
  - Islas Canarias.
  - Mar Mediterráneo.
  - Mar Rojo.
  - Golfo Pérsico.
  - Océano Atlántico.
  - Océano Pacífico.
  - Caribe.

Una vez recabada dicha información requerida para la compresión y simulación de los procesos de desalación, se desarrollará un software intuitivo y sencillo por medio de EXCEL que permitirá evaluar distintos escenarios modificando los parámetros de entrada para distintas composiciones.

# Abstract

---

In the present project the development of a desalination process simulation software will be carried out, which will provide a preliminary vision of possible configurations. Finally, the results provided will be evaluated by comparing them with the "open source" ROSA software in order to corroborate the information collected, as well as the applied calculations.

To this end, the basic concepts that define the desalination process from a thermodynamic and chemical point of view will be described first. Subsequently, the art of the existing membrane typology will be studied at a commercial level, evaluating its behaviour through ROSA. The permeability of commercial membranes will be calculated from the results obtained, which will be considered as constant parameters at a given temperature and assuming a certain elapsed useful life.

The data used to calculate the permeability for each of the membranes has been:

- **Type of membrane:**
  - Extra High Reaction: model SW30XHR440-i.
  - High Reaction Low Energy: model SW30HRLE440-i.
  - Extra Low Energy: model SW30XLE440-i.
  - Ultra Low Energy: model SW30ULE440-i.
  
- **Feed pressures:**
  - 50 bar.
  - 55 bar.
  - 60 bar.
  - 65 bar.
  
- **Zones (water composition):**
  - Canary Islands.
  - Mediterranean Sea.
  - Red Sea.
  - Persian Gulf.
  - Atlantic Ocean.
  - Pacific Ocean.
  - Caribbean.

Once the information required for the compression and simulation of desalination processes has been gathered, an intuitive and simple software will be developed by means of EXCEL that will allow the evaluation of different scenarios modifying the input parameters for different compositions.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xix</b>
<b>Notación</b>	<b>xxii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Objetivo del proyecto y alcance.</i>	1
<b>2 Conceptos Básicos</b>	<b>3</b>
2.1. <i>Balance de masa y paso de sales</i>	3
2.2. <i>Factor de conversión (R)</i>	4
2.3. <i>Porcentaje de salinidad promedio en la alimentación (AFS, Average Feed Salinity)</i>	5
2.4. <i>Presión efectiva de operación (NDP)</i>	5
2.5. <i>Caudal de producto</i>	6
2.6. <i>Caudal de sales (Q<sub>s</sub>)</i>	7
2.7. <i>Paso de sales (SP)</i>	7
2.8. <i>Rechazo de sales (SR)</i>	8
2.9. <i>Efecto de la temperatura (TFC)</i>	8
2.10. <i>Flujo permeado medio (APF)</i>	9
2.11. <i>Permeabilidad específica de la membrana (SF)</i>	9
2.12. <i>Factor de polarización de concentración (CPF)</i>	9
<b>3 Tipos de membranas</b>	<b>11</b>
3.1. <i>Extra High Rejection</i>	11
3.2. <i>High Rejection Low Energy</i>	12
3.3. <i>Extra Low Energy</i>	13
3.4. <i>Ultra Low Energy</i>	13
<b>4 Análisis Comparativo de Membranas Comerciales</b>	<b>11</b>
4.1. <i>Software ROSA</i>	11
4.2. <i>Caudal permeado</i>	12
4.3. <i>Concentración de Boro</i>	15
4.4. <i>TDS (Concentración de sales en el caudal permeado)</i>	17
<b>5 Cálculo de permeabilidad al agua e incremento de presión osmótica en la membrana</b>	<b>20</b>
5.1. <i>Ecuaciones</i>	20
5.2. <i>Resultados</i>	22
5.3. <i>Cálculo de <math>\Delta\pi</math></i>	28
<b>6 Descripción del Software</b>	<b>35</b>
6.1. <i>Algoritmo</i>	35

<i>6.2. Módulos del software</i>	<i>37</i>
6.2.1 Data_List	37
6.2.2 Detailed_View_Equations	40
6.2.3 Processing_Information	42
6.2.4 Calc_Window	47
6.2.5 Software	49
6.2.6 Results	50
6.2.7 Cálculo del consumo de la bomba de alta presión	51
6.2.8 Comparación del modelo con el software ROSA	56
<b>7 Conclusiones y Futuros Pasos</b>	<b>59</b>
<b>Referencias</b>	<b>60</b>
<b>Índice de Conceptos</b>	<b>63</b>
<b>Glosario</b>	<b>65</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Características membrana SW30XHR440-i [3].	12
Tabla 2. Características membranas SW30HRLE440-i [3].	12
Tabla 3. Características membranas SW30XLE440-i [3].	13
Tabla 4. Características membranas SW30ULE440-i [3].	14
Tabla 5. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XHR440-i (50 bar).	22
Tabla 6. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XHR440-i (55 bar).	23
Tabla 7. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XHR440-i (60 bar).	23
Tabla 8. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XHR440-i (65 bar).	23
Tabla 9. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30HRLE440-i (50 bar).	24
Tabla 10. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30HRLE440-i (55 bar).	24
Tabla 11. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30HRLE440-i (60 bar).	24
Tabla 12. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30HRLE440-i (65 bar).	25
Tabla 13. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XLE440-i (50 bar).	25
Tabla 14. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XLE440-i (55 bar).	26
Tabla 15. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XLE440-i (60 bar).	26
Tabla 16. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XLE440-i (65 bar).	26
Tabla 17. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30ULE440-i (50 bar).	27
Tabla 18. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XLE440-i (55 bar).	27
Tabla 19. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XLE440-i (60 bar).	27
Tabla 20. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XLE440-i (65 bar).	27
Tabla 21. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XHR440-i (50 bar).	28
Tabla 22. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XHR440-i (55 bar).	29
Tabla 23. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XHR440-i (60 bar).	29
Tabla 24. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XHR440-i (65 bar).	29
Tabla 25. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30HRLE440-i (50 bar).	30
Tabla 26. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30HRLE440-i (55 bar).	30
Tabla 27. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30HRLE440-i (60 bar).	31
Tabla 28. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30HRLE440-i (65 bar).	31
Tabla 29. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XLE440-i (50 bar).	31
Tabla 30. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XLE440-i (55 bar).	32
Tabla 31. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XLE440-i (60 bar).	32

Tabla 32. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XLE440-i (65 bar).	32
Tabla 33. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30ULE440-i (50 bar).	33
Tabla 34. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30ULE440-i (55 bar).	33
Tabla 35. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30ULE440-i (60 bar).	33
Tabla 36. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30ULE440-i (65 bar).	33
Tabla 37. Ecuaciones empleadas en el software.	41
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXHR440-i (Presión de alimentación = 50 bar)	52
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXHR440-i (Presión de alimentación = 55 bar)	52
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXHR440-i (Presión de alimentación = 60 bar)	52
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXHR440-i (Presión de alimentación = 65 bar)	52
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWHRLE440-i (Presión de alimentación = 50 bar)	53
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWHRLE440-i (Presión de alimentación = 55 bar)	53
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWHRLE440-i (Presión de alimentación = 60 bar)	53
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWHRLE440-i (Presión de alimentación = 65 bar)	53
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXLE440-i (Presión de alimentación = 50 bar)	54
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXLE440-i (Presión de alimentación = 55 bar)	54
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXLE440-i (Presión de alimentación = 60 bar)	54
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXLE440-i (Presión de alimentación = 65 bar)	54
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWULE440-i (Presión de alimentación = 50 bar)	55
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWULE440-i (Presión de alimentación = 55 bar)	55
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWULE440-i (Presión de alimentación = 60 bar)	55
Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWULE440-i (Presión de alimentación = 65 bar)	55



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Esquema de balance de materia [1].	4
Figura 2. Imagen de ROSA software (I).	11
Figura 3. Imagen de ROSA software (II).	12
Figura 4. Caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30XHR440-i).	13
Figura 5. Caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30HRLE440-i).	13
Figura 6. Caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición el agua (SW30XLE440-i).	14
Figura 7. Caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30ULE440-i).	14
Figura 8. Concentración de boro en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30XHR440-i).	15
Figura 9. Concentración de boro en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30HRLE440-i).	16
Figura 10. Concentración de boro en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30XLE440-i).	16
Figura 11. Concentración de boro en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30ULE440-i).	17

Figura 12. TDS en el caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30XHR440-i),	17
Figura 13. TDS en el caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30HRLE440-i).	18
Figura 14. TDS en el caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30XLE440-i).	18
Figura 15. TDS en el caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30ULE440-i).	19
Figura 16. Permeabilidad en función de la temperatura (SW30XHR440-i).	24
Figura 17. Permeabilidad en función de la temperatura (SW30HRLE440-i).	25
Figura 18. Permeabilidad en función de la temperatura (SW30XLE440-i).	26
Figura 19. Permeabilidad en función de la temperatura (SW30ULE440-i).	28
Figura 20. Resultados en función de la temperatura y la presión de alimentación (SW30XHR440-i).	30
Figura 21. Resultados en función de la temperatura y la presión de alimentación (SW30HRLE440-i).	31
Figura 22. Resultados en función de la temperatura y la presión de alimentación (SW30XLE440-i).	32
Figura 23. Resultados en función de la temperatura y la presión de alimentación (SW30ULE440-i).	34
Figura 24. Diagrama de flujo de software.	35
Figura 25. Algoritmo de obtención de parámetros de salida.	36
Figura 26. Interacción entre módulos de cálculos de procesado de la información.	37
Figura 27. Módulo Data_List.	38
Figura 28. Lista desplegable para selección de región.	39
Figura 29. Lista desplegable para selección de tipo de membrana.	39
Figura 30. Descripción módulo Data_List.	40
Figura 31. Descripción de Detailed_View_Equation	40
Figura 32. Descripción de Processing_Information.	43
Figura 33. Asociación caudal nominal y tpo de membrana.	43
Figura 34. Cálculos de TDS para Islas Canarias.	44
Figura 35. Cálculos de TDS para Océano Atlántico.	44
Figura 36. Cálculos de TDS para Mar del Caribe.	45
Figura 37. Cálculos de TDS para Mar Mediterráneo.	45
Figura 38. Cálculos de TDS para Océano Pacífico.	46
Figura 39. Cálculos de TDS para Golfo Pérsico.	46
Figura 40. Cálculos de TDS para Mar Rojo.	47
Figura 41. Descripción de Calc_Window.	47
Figura 42. Resumen de cálculos de Processing_Information por región.	48
Figura 43. Resumen de cálculos por tipo de membrana y posición de acceso por el software.	48
Figura 44. Descripción de Software.	49
Figura 45. Leyenda de datos.	49
Figura 46. Parámetros de entrada.	50
Figura 47. Parámetros de salida.	50

Figura 48. Previsualización de pestaña de "Results".	51
Figura 49. Comparativa para membrana SWXHR440-i.	56
Figura 49. Comparativa para membrana SWHRLE440-i.	57
Figura 49. Comparativa para membrana SWXLE440-i.	57
Figura 49. Comparativa para membrana SWULE440-i.	58

## Notación

---

ROSA	Reverse Osmosis System Analysis
Q_Alimentacion	Caudal de entrada al proceso de desalación
Q_Permeado	Caudal de agua tratada
Q_Concentrado	Caudal rechazado tras la aplicación del proceso de desalación
C_Alimentacion	Concentración de sales en el caudal de alimentación

C_Permeado	Concentración de sales en el caudal de agua tratada
C_Concentrado	Concentración de sales en el caudal de agua rechazada
R	Recovery o factor de conversión
AFS	Average Feed Salinity o porcentaje de salinidad promedio en el caudal de alimentación
NDP	Net Driving Pressure o Presión efectiva de operación
P_alimentacion	Presión en el caudal de alimentación
P_os_alim	Presión osmótica en el caudal de alimentación
P_os_perm	Presión osmótica en el caudal de agua tratada
P_perm	Presión en el caudal de agua tratada
P_d	Pérdida de presión a través de los elementos
Q_p	Caudal de agua en el producto (agua tratada)
L_p	Permeabilidad hidráulica al agua de la membrana
A	Área de la membrana
$\Delta P$	Incremento de presión hidrostática en la membrana
$\Delta \Pi$	Incremento de presión osmótica en la membrana
f_p	Factor corrector asociado a la presión
f_T	Factor corrector asociado a la temperatura.
f_t	Factor corrector asociado al deterioro de las membranas
Q_p0	Caudal de agua de producto en condiciones normalizadas
Q_s	Caudal de sales que circula a través de la membrana
$\Delta C$	Incremento de concentraciones a lo largo de la membrana
K_s	Permeabilidad de la membrana a las sales



# 1 INTRODUCCIÓN

---

En la actualidad, uno de los aspectos más importantes a abordar por el sector del tratamiento de aguas, especialmente la desalación, es proporcionar cobertura a la demanda de agua en lugares donde la escasez de recurso es notable. Para ello, dichos procesos proporcionan una fuente adicional que mejora la calidad en determinadas localizaciones. No obstante, dichas ubicaciones presentan unas características, en la mayoría de los casos, respecto a la composición del agua, bastante castigadas a la hora de aplicar dichos procedimientos. Esto se debe, principalmente, al alto consumo específico asociado a los procesos.

Es por ello que disponer de una herramienta que permita de forma preliminar evaluar el impacto termodinámico de los proyectos asociados a las instalaciones de desalación de agua supone un valor añadido para aquellas empresas focalizadas en el diseño de dichas plantas de procesamiento. De forma adicional, a nivel académico, disponer de un simulador que permita modificar los parámetros principales que definen el proceso proporciona un mayor conocimiento sobre la interacción de cada una de las variables así como del efecto originado.

De esta forma surge el presente proyecto, cuyo cometido es establecer un punto inicial para el desarrollo de un software que permite realizar un análisis previo de una planta de desalación a través de los parámetros globales de diseño. Se tomará como referencia para comparar los resultados obtenidos el software ROSA (Reverse Osmosis System Analysis), propiedad intelectual de la empresa DOW Water and Process solutions.

Por tanto, en el presente proyecto, se llevarán a cabo las siguientes tareas:

- Definición del objetivo y el alcance del proyecto.
- Análisis y descripción de los conceptos básicos referentes al proceso de desalación por ósmosis inversa.
- Estudio comparativo de las principales membranas existentes en la actualidad a nivel comercial, así como una descripción de las especificaciones técnicas de cada una de ellas.
- Definición del cálculo de la permeabilidad al agua de las distintas membranas como parámetro comparativo.
- Descripción del software desarrollado y evaluación de resultados (desde un punto de vista termodinámico considerando la potencia de la bomba de alta presión como elemento comparativo). Se considerará un umbral aceptable siempre y cuando la diferencia sea igual o inferior al 10%.
- Descripción de futuros pasos a realizar, así como posibles evolutivos en el desarrollo del software.

## 1.1. Objetivo del proyecto y alcance.

El objetivo del proyecto se centra en el desarrollo de un software que permita la simulación de diferentes

instalaciones a partir de la implementación de las ecuaciones físicas del proceso de desalación. Para validar los resultados proporcionados por el software desarrollado se empleará ROSA, un programa desarrollado por Dow Solutions para tal fin a nivel comercial. De esta forma, el alcance fijado para cumplir tal objetivo reside en los siguientes aspectos a tener en cuenta:

- Definición de los conceptos básicos de cada uno de los procesos que enmarcan la desalación desde el punto de vista termodinámico, así como de los parámetros a analizar para evaluar dichos procesos.
- Estado del arte de las principales membranas disponibles a nivel comercial, así como un análisis comparativo del comportamiento de cada una de ellas a través del software de open source “ROSA”, desarrollado por la empresa del sector “Dow water and process solutions”.
- Desarrollo de un software propio para tener en cuenta las consideraciones de los procesos termodinámicos, así como las especificaciones del mismo.
- Evaluación comparativa de los resultados proporcionados por el software a nivel de diseño frente a los arrojados por el software ROSA. Para ello, se atenderá a la potencia requerida por la bomba de alimentación, considerándose aceptable el software siempre y cuando el margen sea inferior al 10%.

## 2 CONCEPTOS BÁSICOS

---

Es fundamental, antes de profundizar en el presente proyecto, realizar un análisis previo de las principales variables determinantes, a partir del balance de masa y de paso de sales, que nos proporcionan la información necesaria para poder llevar a cabo la desalación a nivel industrial.

Actualmente, la variación de las distintas concentraciones de sales (también denominada salinidad) que podemos encontrar en el agua salada, en función de la región, oscilan entre 35000 mg/l y 45000 mg/l. Dichos niveles de salinidad son bastante elevados para el consumo doméstico e industrial, por lo que surge la necesidad de reducir dicha cantidad.

Así, podemos considerar el proceso de ósmosis, que se trata de un proceso físico de origen natural que se produce en un recipiente que contiene dos compartimentos separados por una membrana semipermeable, caracterizándose porque en uno de ellos hay agua salada y en el otro agua dulce, o de baja concentración. La física nos lleva a que se produce una corriente o flujo másico de agua dulce hacia el recipiente de mayor concentración, buscando el equilibrio de concentraciones entre ambos recipientes.

Sin embargo, dicho proceso es evitable si aplicamos una determinada presión, denominada osmótica, que es la presión a la que conseguimos anular que se produzca dicho flujo. A medida que vamos aumentando la presión hasta llegar a ese punto, el flujo másico va decreciendo. En el caso de que apliquemos una presión mayor o superior a la osmótica, tiene lugar el proceso inverso, conocido como ósmosis inversa, el flujo másico va desde el recipiente que contiene agua salada hasta el de agua dulce. Dicho procedimiento es el más desarrollado desde el punto de vista tecnológico, y es el que llevaremos a cabo en el presente proyecto para definir todo lo referente a la desalación.

A continuación, describimos todas las variables participantes para, posteriormente, realizar un análisis termodinámico a partir de dichos parámetros.

### 2.1. Balance de masa y paso de sales

Si aplicamos un balance de masa en la membrana, en el caso más simple, observamos la presencia de tres caudales, caracterizados por su concentración:

- **Q<sub>alimentación</sub>**: es el caudal de alimentación, es decir, el caudal que entra en los módulos de membrana antes de ser procesado.
- **Q<sub>permeado</sub>**: es el caudal desalado, aquel que vamos a emplear posteriormente, ya sea en una industria o en uso doméstico.

- **Q\_concentrado:** es el caudal que no ha sido filtrado por la membrana y presenta una mayor salinidad. Posteriormente, veremos que dicho caudal puede ser reutilizado en otras funciones termodinámicas para reducir el consumo energético del proceso.

En la siguiente imagen, observamos que se cumple el balance de masa, atendiendo a la siguiente ecuación:

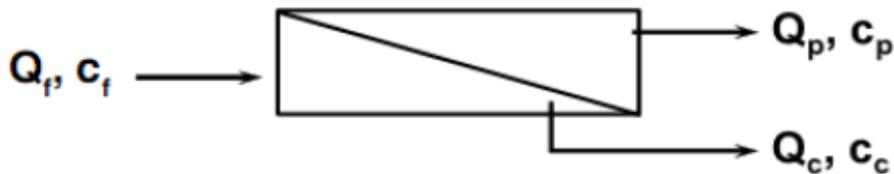


Figura 1. Esquema de balance de materia [1].

Ecuación 1. Balance de materia.

$$Q_{alm} = Q_{perm} + Q_{conc}$$

Dicho balance también es extrapolable al paso de sales, que se define mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Paso de sales.

$$Q_{alm} \cdot C_{alm} = Q_{perm} \cdot C_{perm} + Q_{conc} \cdot C_{conc}$$

Siendo:

- $C_{alm}$ : la concentración de sales a la entrada de la membrana.
- $C_{perm}$ : la concentración de sales a la salida de la membrana, es decir, en el caudal másico desalado.
- $C_{conc}$ : la concentración de sales en el caudal rechazado.

A partir de ambas ecuaciones, podemos definir termodinámicamente todo proceso de desalación, no obstante, pese a ser las variables fundamentales, necesitamos conocer y definir el resto de parámetros de influencia clave que surgen en el proceso.

## 2.2. Factor de conversión (R)

El factor de conversión nos indica la cantidad de agua desalada que se va a obtener dependiendo del caudal de entrada. Se expresa en porcentaje a partir de las siguientes ecuaciones:

Ecuación 3. Factor de conversión en función de los caudales.

$$R = \frac{Q_{perm}}{Q_{conc}} * 100$$

El factor de conversión total de una planta se obtiene como el producto de los factores de conversión parciales, y éstos, a su vez, como el producto de los factores de conversión de cada elemento, que puede oscilar entre el 45% en desalación de agua de mar y el 90% en desalación de aguas salobres.

### 2.3. Porcentaje de salinidad promedio en la alimentación (AFS, Average Feed Salinity)

El porcentaje de salinidad en la alimentación es un valor representativo de la concentración en la alimentación usado para el cálculo de la eficiencia de la membrana en el proceso de ósmosis inversa, ya que en el caudal rechazado, la concentración aumenta, por lo que cuanto más se parezcan ambos valores, menos eficiente será la misma. Esto significa que el caudal permeado es muy bajo.

Se calcula a partir del factor de conversión mediante dos procedimientos posibles:

Ecuación 4. Porcentaje de salinidad en la alimentación para factores de conversión pequeños.

$$AFS = 0.5 * C_{alim} * \left(1 + \frac{1}{(1-R)}\right)$$

Ecuación 5. Porcentaje de salinidad en la alimentación para factores de conversión altos.

$$AFS = C_{alim} * \ln\left(\frac{1}{R}\right)$$

### 2.4. Presión efectiva de operación (NDP)

La presión efectiva de operación de una planta se define como la presión suministrada por la bomba menos la presión osmótica del flujo de alimentación-salmuera. Cuanto mayor será el factor de conversión, mayor es la NDP, ya que aumenta la concentración en el caudal rechazado y, por tanto, su presión osmótica. Sin embargo, si el factor de conversión es bajo, la NDP aumenta, produciéndose el efecto contrario. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Presión efectiva de operación.

$$NDP = P_{alim} - P_{os_{alim}} - P_{perm} - 0,5 * P_d + P_{os_{perm}}$$

Siendo:

- $P_{alim}$ : presión aplicada a la entrada de la membrana mediante las bombas.
- $P_{os_{alim}}$ : presión osmótica a la entrada (alimentación).
- $P_{os_{perm}}$ : presión osmótica a la salida (permeado).
- $P_{perm}$ : presión a la salida de la membrana o del caudal permeado.
- $P_d$ : pérdida de presión a través de los elementos.

## 2.5. Caudal de producto

Es el caudal que produce la membrana semipermeable, y se expresa mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 7. Cálculo de caudal de agua en el producto (agua tratada).

$$Q_p = L_p * A * (\Delta P - \Delta \Pi)$$

Siendo:

- $L_p$ : permeabilidad hidráulica al agua.
- $A$ : área de la membrana.
- $\Delta P$ : incremento de presión hidrostática en la membrana.
- $\Delta \Pi$ : diferencial de presión osmótica.

La ecuación anterior, también puede expresarse en función de la presión efectiva de operación, aplicando el siguiente cálculo:

Ecuación 8- Caudal de agua en el producto en función de la NDP.

$$Q_p = L_p * A * NDP$$

No obstante, el caudal de agua producto presenta correcciones, ya que la ecuación expresada con anterioridad sólo es válida para condiciones nominales de operación, sin embargo, podemos encontrar varios factores que hagan que dicho valor sea inferior:

- Deterior de las membranas con el paso del tiempo.
- Modificación de la presión.
- Modificación de la temperatura.

Por lo que obtenemos:

Ecuación 9. Caudal de producto corregido.

$$Q_p = f_p * f_T * f_t * Q_{p,0}$$

Siendo:

- $f_p$ : factor corrector asociado a la presión.
- $f_T$ : factor corrector asociado a la temperatura.
- $f_t$ : factor asociado al deterioro de las membranas.
- $Q_{P, 0}$ : caudal de agua producto en condiciones normalizadas.

## 2.6. Caudal de sales ( $Q_s$ )

Es el caudal de sales que circula a través de la membrana, y viene expresado como:

Ecuación 10. Caudal de sales.

$$Q_s = \Delta C * K_s * \left(\frac{A}{d}\right)$$

Siendo:

- $\Delta C$ : incremento de concentraciones a lo largo de la membrana.
- $K_s$ : permeabilidad de la membrana a las sales.
- $d$ : espesor de la membrana.

Dicha expresión se puede simplificar a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 11. Caudal de sales en función del coeficiente de transporte.

$$Q_s = B * A * \Delta C$$

Donde:

- $B$ : es el coeficiente de transporte y representa una constante única para cada tipo de membrana.

De las ecuaciones anteriores (caudal de sales y caudal de agua producto) podemos sacar dos conclusiones:

- El caudal de agua producto depende de la presión efectiva de operación (NDP).
- El caudal de sales depende del incremento de la concentración ( $\Delta C$ ) a través de la membrana.

Por lo que podemos expresar la concentración del permeado como:

Ecuación 12. Concentración de permeado.

$$C_{perm} = \frac{Q_s}{Q_p}$$

## 2.7. Paso de sales (SP)

El paso de sales se define como el ratio de concentración de sales entre el permeado y el promedio de concentración en la alimentación. Se expresa matemáticamente mediante un porcentaje a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 13. Paso de sales.

$$SP = \frac{C_{perm}}{C_{atm}}$$

Se trata de un parámetro proporcionado por el fabricante de membranas que depende, principalmente, de los siguientes factores:

- Tipo y concentración de constituyentes iónicos en la alimentación.
- Presión de operación.
- Factor de conversión.

Al igual que en el caudal de agua producto, en una planta desaladora, se obtiene el paso de sales corrigiendo el paso de sales en condiciones normalizadas, siendo la expresión:

Ecuación 14. Paso de sales corregido.

$$SP = f_c * SP_0$$

Donde:

- $f_c$ : factor corrector asociado a la variación en las concentraciones en las que opera la planta.

## 2.8. Rechazo de sales (SR)

El rechazo de sales viene definido como el opuesto al paso de sales:

Ecuación 15. Rechazo de sales.

$$SR = 100\% - SP$$

El rechazo de sales es un importante parámetro en la actuación de las membranas de desalación por ósmosis inversa, determinando la idoneidad de las mismas en función de sus aplicaciones.

## 2.9. Efecto de la temperatura (TFC)

La influencia de la temperatura es notoria en la definición del caudal de agua a través de la membrana. Para los cálculos en el proceso de ósmosis inversa, si aplicamos la siguiente ecuación obtenemos el factor corrector debido a la temperatura en la permeabilidad de la membrana:

Ecuación 16. Cálculo del efecto de la temperatura.

$$TCF = \frac{1}{\exp\left(C * \left(\frac{1}{273 + t} - \frac{1}{298}\right)\right)}$$

Siendo:

- C: constante proporcionada por el fabricante que mide la resistencia al paso del agua, oscilando entre 2500 y 3000.

- t: temperatura en °C.

## 2.10. Flujo permeado medio (APF)

Es un parámetro fundamental del proceso de ósmosis inverso. Combina el caudal permeado por el número total de unidades instaladas en la planta, midiéndose en l/m<sup>2</sup>/h. Se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 17. Flujo permeado medio.

$$APF = \frac{Q_{perm}}{EN * MA}$$

Siendo

- EN: número de elementos en el sistema.
- MA: área de la membrana por elemento.

## 2.11. Permeabilidad específica de la membrana (SF)

La permeabilidad específica, o flujo específico, caracteriza el material de la membrana en términos del flujo de agua, dependiendo del gradiente de presión efectiva de operación aplicado:

Ecuación 18. Permeabilidad específica de la membrana.

$$SF = APF/NDP$$

La permeabilidad específica depende de la resistencia de la membrana al paso del agua.

## 2.12. Factor de polarización de concentración (CPF)

Cuando el caudal de agua fluye a través de la membrana, debido al rechazo de sales, se produce una capa en la superficie de la misma, donde la concentración de sales es mayor. El fenómeno descrito se conoce como concentración de polarización. El principal efecto de este fenómeno es la reducción del caudal de agua producto real y un aumento del rechazo de sales, no obstante, tiene más efectos asociados, que definimos a continuación:

- Aumento de la presión osmótica en la superficie de la membrana y reducción de la presión efectiva de operación.
- Reducción del flujo de agua a través de la membrana ( $Q_p$ ).
- Incremento del caudal de sales a través de la membrana ( $Q_s$ ).
- Incremento de la probabilidad que se sature la membrana, por lo que empuja el umbral en el que se origina el fenómeno scaling.

Se define matemáticamente mediante la siguiente expresión:

Ecuación 19. Factor de polarización de concentración.

$$CPF = \frac{C_s}{C_b}$$

Donde:

- $C_s$ : concentración de sales en la superficie.
- $C_b$ : concentración en el extremo de la capa formada.

Si incrementamos el caudal de alimentación, la turbulencia de la membrana incrementa, por lo que la concentración de polarización disminuirá, reduciendo su espesor. Esto nos permite expresar la CPF en función del caudal de alimentación y del caudal permeado, que a su vez, aumentará, dependiendo linealmente del caudal de alimentación:

Ecuación 20. Factor de polarización de la concentración en función de los caudales.

$$CPF = K_p * \exp\left(\frac{Q_{perm}}{Q_{atm}}\right)$$

Donde:

- $K_p$ : es una constante que depende de la geometría de la membrana fundamentalmente.

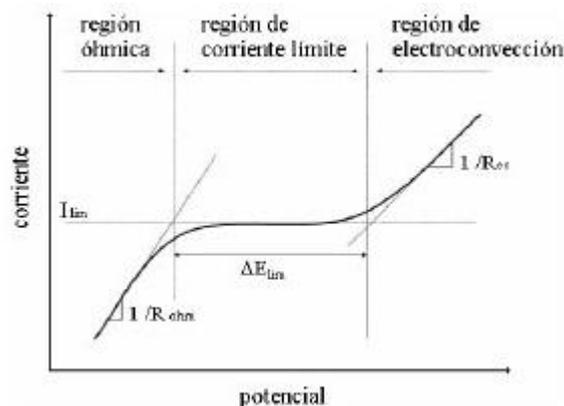
Dicha ecuación, puede ser expresada también en función del factor de conversión, sustituyendo en la ecuación anterior:

Ecuación 21. Factor de polarización de concentración en función del factor de conversión.

$$CPF = K_p * \exp\left(2 * \frac{R}{2 - R}\right)$$

El valor recomendado de los fabricantes para la concentración de polarización se corresponde con el 18%, como podemos ver en la siguiente gráfica:

Ecuación 22. Efecto de polarización de concentración [2].



## 3 TIPOS DE MEMBRANAS

---

**B**asándonos en el programa de simulación ROSA, hemos seleccionado los cuatro principales tipos de membranas que podemos encontrar en el mercado del fabricante “Dow”. A continuación se describirá en profundidad sus características, ventajas e inconvenientes, aunque están sujetos al área donde se analice la instalación de la planta desaladora. Estos tipos de membranas (y sus modelos) son:

- Extra High Reaction: modelo SW30XHR440-i.
- High Reaction Low Energy: modelo SW30HRLE440-i.
- Extra Low Energy: modelo SW30XLE440-i.
- Ultra Low Energy: modelo SW30ULE440-i.

A continuación, profundizaremos en cada una de ellas de forma detallada.

### 3.1 Extra High Rejection

El modelo empleado en este tipo de membranas es SWXHR440-i, que presenta un espaciador de 28 mm y un área de membrana de 440 m<sup>2</sup> para maximizar la productividad de su sistema a baja presión diferencial sin necesidad de paralización del proceso para limpieza asiduamente. Minimiza el consumo energético en la operación.

Sus principales ventajas son:

- Alta permeabilidad y alta productividad.
- Bajo consumo energético.

Se pueden emplear en:

- Asia.
- América.
- Europa.

En la siguiente tabla, podemos contemplar sus condiciones de operación:

Tabla 1. Características membrana SW30XHR440-i [3].

Maximum Operating Pressure and Temperature <sup>a</sup>	1,000 psig (70 bar) at T < 35°C 900 psig (62 bar) at T = 35 – 45°C
Maximum Element Pressure Drop	13 psig (1.0 bar)
pH Range, Continuous Operation <sup>b</sup>	2 – 11
pH Range, Short-Term Cleaning (30 min.) <sup>c</sup>	1 – 13
Maximum Feed Silt Density Index (SDI)	SDI 5
Free Chlorine Tolerance <sup>d</sup>	< 0.1 ppm

### 3.2. High Rejection Low Energy

El modelo empleado en este tipo de membranas es SWHRLE440-i que, al igual que el caso anterior, presenta un espaciador de 28 mm y un área total de membrana de 440 m<sup>2</sup>. Conlleva un coste inferior a lo largo de su vida útil si opera a media y alta salinidad. Además, permite un sistema de desarrollo más preciso y predecible, lo que nos permite evaluar su comportamiento mediante simulación, acercándonos a la realidad dentro de los márgenes aceptados.

Sus principales ventajas son:

- Alto flujo, que reduce presión y consumo energético.
- Alto rechazo de sales.
- Alto rechazo de Boro, perjudicial para la salud.

Se emplea principalmente en:

- Asia
- Europa
- América

A continuación, mostramos las condiciones de operación a través de la siguiente tabla:

Tabla 2. Características membranas SW30HRLE440-i [3].

Maximum Operating Temperature <sup>a</sup>	113°F (45°C)
Maximum Operating Pressure	1,200 psig (83 bar)
Maximum Element Pressure Drop	15 psig (1.0 bar)
pH Range, Continuous Operation <sup>a</sup>	2 – 11
pH Range, Short-Term Cleaning (30 min.) <sup>b</sup>	1 – 13
Maximum Feed Silt Density Index (SDI)	SDI 5
Free Chlorine Tolerance <sup>c</sup>	< 0.1 ppm

### 3.3. Extra Low Energy

El modelo empleado en este tipo de membranas es SWXLE440-i. Que ofrece un consumo mínimo de energía operando en condiciones de temperatura y salinidad media. Es una opción ideal en aguas salobres de alta salinidad y permite reducir la frecuencia de limpieza en las membranas. Reduce costes y posibles fugas que puedan empobrecer la calidad del agua.

Entre sus principales ventajas podemos encontrar:

- Alto flujo, que reduce presión y consumo energético.
- Alto rechazo de sales en aguas de baja salinidad.
- Alto rechazo de Boro, perjudicial para la salud.

Se emplea principalmente en:

- Asia.
- Europa.
- América.

La siguiente tabla nos muestra los rangos de las condiciones de operación:

Tabla 3. Características membranas SW30XLE440-i [3].

Maximum Operating Temperature <sup>a</sup>	113°F (45°C)
Maximum Operating Pressure	1,200 psig (83 bar)
Maximum Element Pressure Drop	15 psig (1.0 bar)
pH Range, Continuous Operation <sup>a</sup>	2 – 11
pH Range, Short-Term Cleaning (30 min.) <sup>b</sup>	1 – 13
Maximum Feed Silt Density Index (SDI)	SDI 5
Free Chlorine Tolerance <sup>c</sup>	< 0.1 ppm

### 3.4. Ultra Low Energy

El modelo empleado en este tipo de membranas es SWULE440-i, idóneas para aguas cuya salinidad y cuya temperatura de alimentación es media, dando una avanzada combinación de alta productividad y alto rechazo con un bajo consumo. Impide fugas que puedan perjudicar a la calidad del agua.

Sus principales ventajas son:

- Alto flujo, que reduce presión y consumo energético.
- Alto rechazo de sales en aguas de baja salinidad.
- Alto rechazo de Boro, perjudicial para la salud.

Se emplea principalmente en:

- Asia.
- Europa.
- América.

A continuación, podemos observar sus especificaciones técnicas:

Tabla 4. Características membranas SW30ULE440-i [3].

Maximum Operating Temperature <sup>a</sup>	113°F (45°C)
Maximum Operating Pressure	1,200 psig (83 bar)
Maximum Element Pressure Drop	13 psig (0.9 bar)
pH Range, Continuous Operation <sup>a</sup>	2 – 11
pH Range, Short-Term Cleaning (30 min.) <sup>b</sup>	1 – 13
Maximum Feed Silt Density Index (SDI)	SDI 5
Free Chlorine Tolerance <sup>c</sup>	< 0.1 ppm

# 4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE MEMBRANAS COMERCIALES

Una vez obtenida una visión general sobre cada membrana, vamos a proceder al análisis de distintos parámetros a distintas presiones en las distintas regiones, tomando fijo el caudal de alimentación de agua de mar en  $8.11 \text{ m}^3/\text{h}$ , ya que se considera el caudal óptimo para una membrana situada en las Islas Canarias, lugar que también será tomado como referencia.

## 4.1. Software ROSA

El software de diseño de instalaciones de desalación “ROSA” (Reverse Osmosis System Analysis) es un programa de libre uso que emplea elementos DOW FILMTEC™, considerados un referente a nivel internacional, con el fin de simular procesos de desalación de ósmosis inversa para distintas configuraciones y ofrecer una versión preliminar de los diseños de las plantas.

Dicho software será el empleado para llevar a cabo el análisis comparativo que se describe en la presente sección, detallado a continuación:

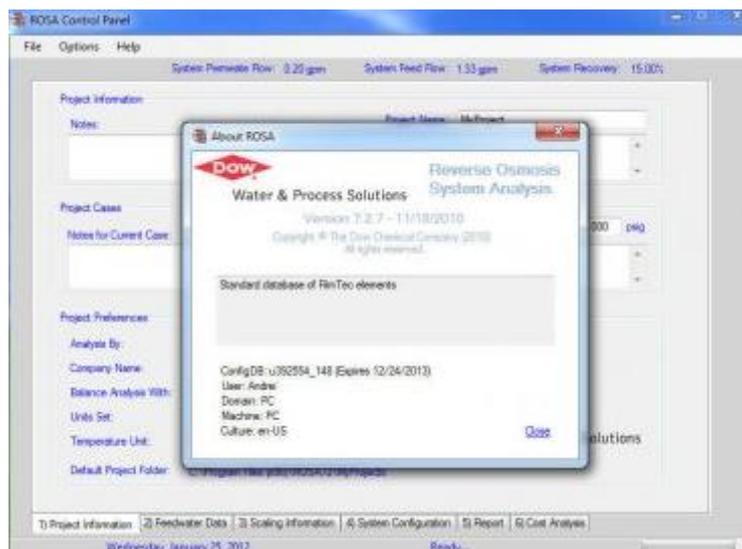


Figura 2. Imagen de ROSA software (I).

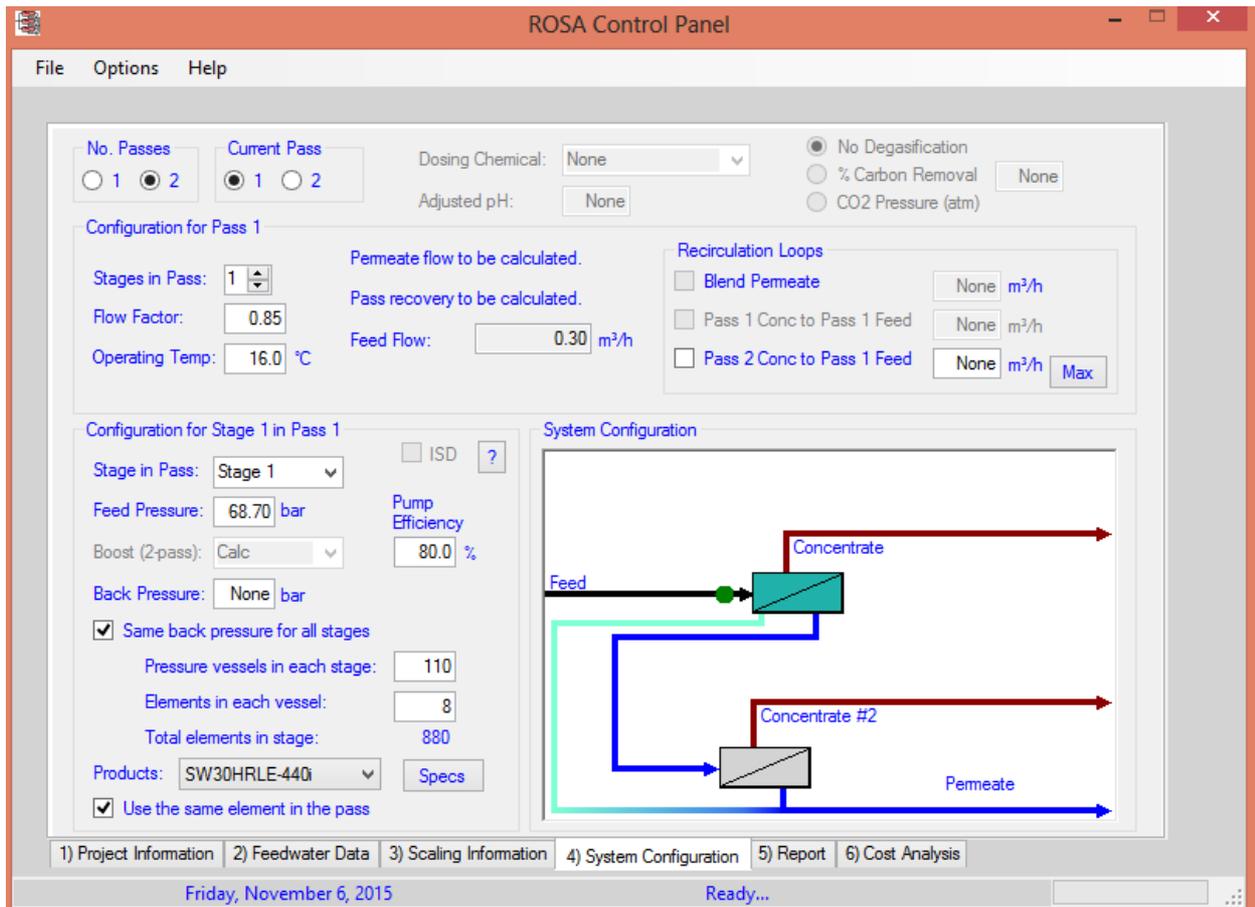


Figura 3. Imagen de ROSA software (II).

## 4.2. Caudal permeado

En las siguientes gráficas, podemos observar cómo evoluciona el caudal de permeado ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) al aumentar la presión en función del tipo de membrana.

- Extra High Reaction

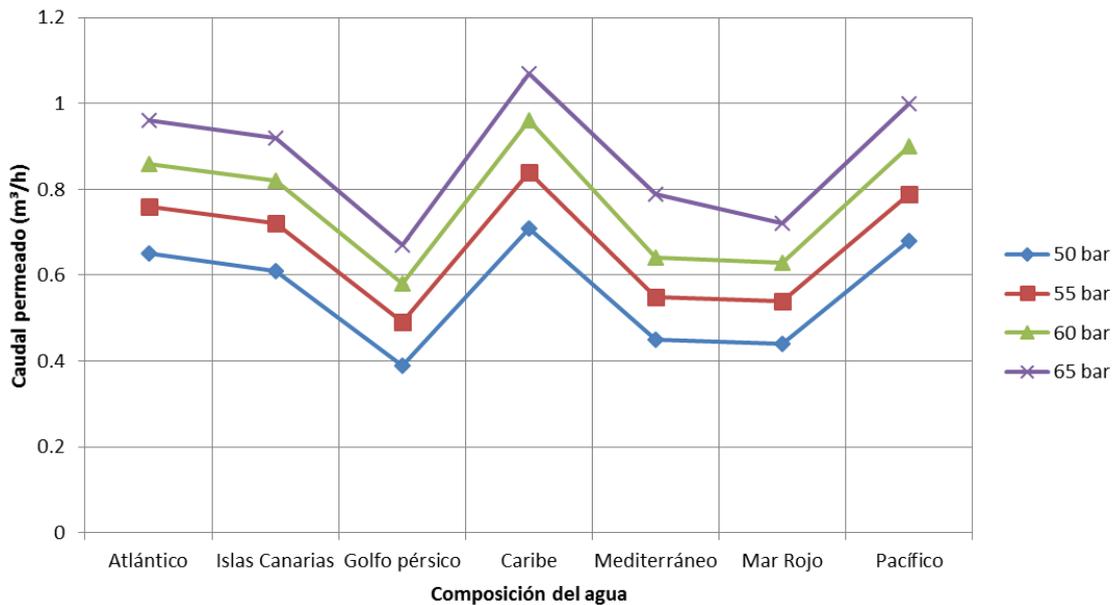


Figura 4. Caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30XHR440-i).

- High Reaction Low Energy

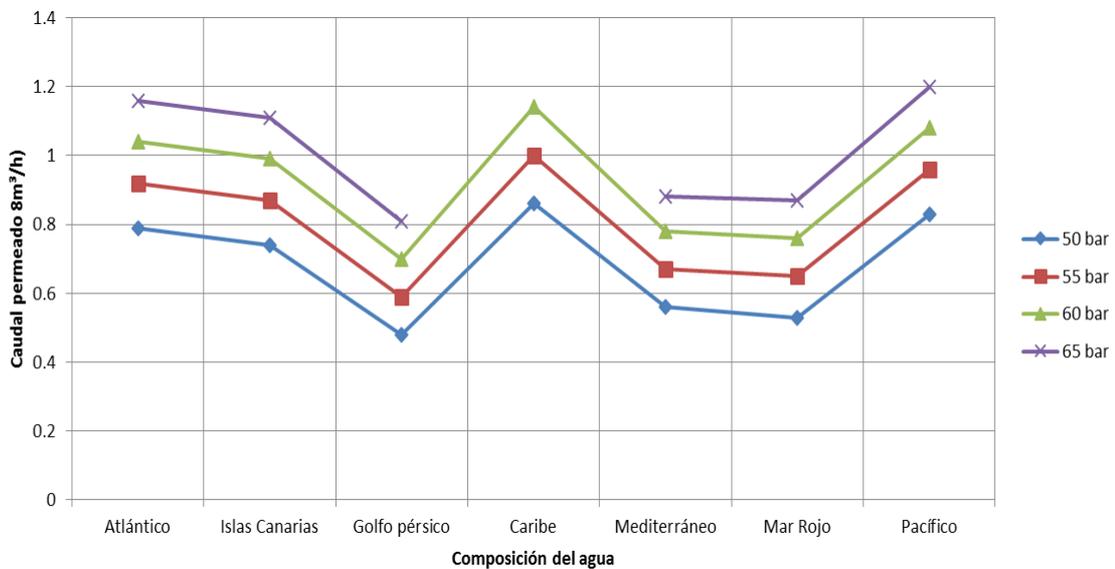


Figura 5. Caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30HRLE440-i).

En dicha gráfica, tal y como se ha comentado anteriormente a partir de sus características, se percibe la ausencia del punto de funcionamiento asociado al caudal permeado para la composición del Mar Caribe para la máxima presión (65 bar). Esto es originado a que a la hora de simularlo con el software ROSA, se produce un “warning” por exceder el flujo máximo, equivalente al caudal volumétrico permeado por unidad de área, permitido por el fabricante. Esto deriva en un riesgo considerable de ensuciamiento.

- Extra Low Energy

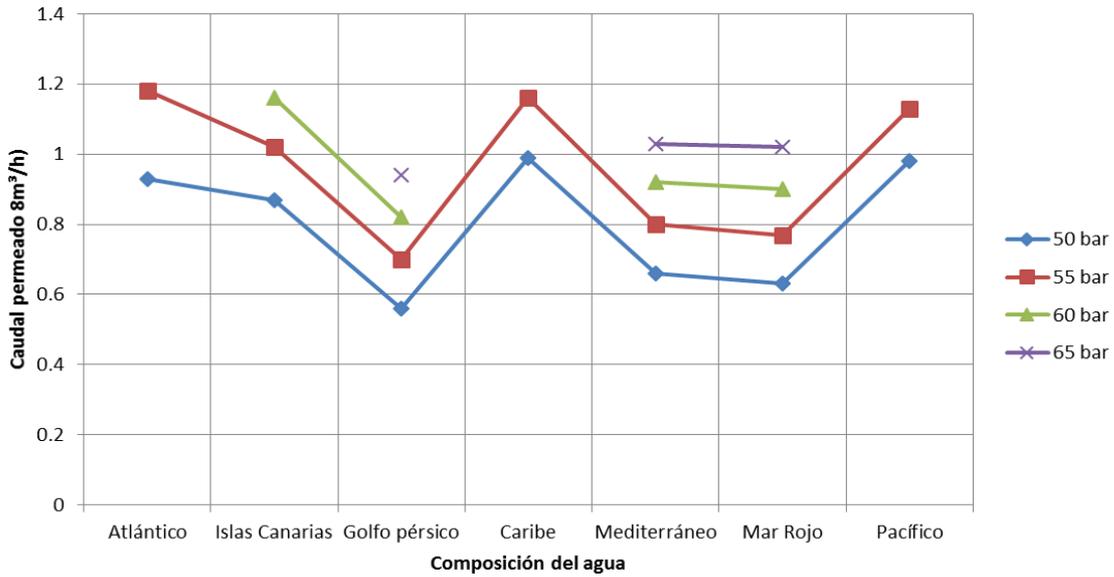


Figura 6. Caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición el agua (SW30XLE440-i).

De forma similar al caso anterior, a medida que el paso de sales por la membrana es mayor, el caudal de permeado resultante presenta una mayor concentración de sales, lo que restringe su funcionamiento en función de las características del agua de entrada. De forma similar al caso anterior, se excede en un mayor número de puntos el flujo máximo permitido, traducido en la ausencia de dichos puntos..

- Ultra Low Energy

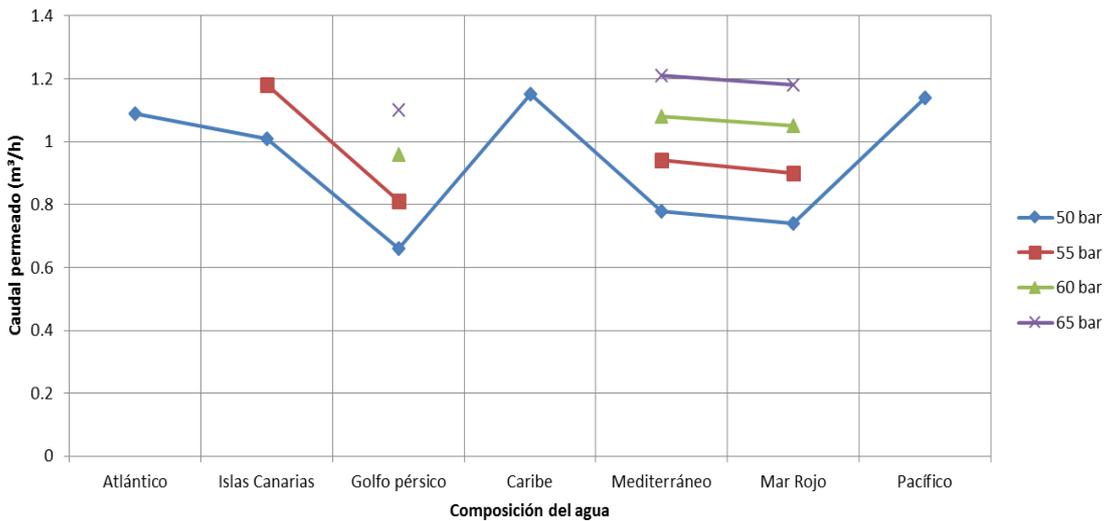


Figura 7. Caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30ULE440-i).

Se puede observar que a medida que la concentración de sales es mayor (siendo el Golfo Pérsico la reserva acuífera de mayor salinidad), el caudal permeado decrece. No obstante, al aumentar la presión, el caudal

aumenta. Este patrón se verifica para los cuatro tipos de membrana, notando que a medida que aumenta la capacidad desaladora, el caudal de permeado va incrementándose, pero su contenido en sales y en Boro, es superior. Por lo que se debe afrontar la disyuntiva considerando que a mayor caudal permeado, mayor concentración, y viceversa.

### 4.3. Concentración de Boro

A continuación, observaremos como varía la concentración de Boro (ppm) en el caudal permeado, fijando los mismos parámetros que en el caso anterior.

- Extra High Reaction

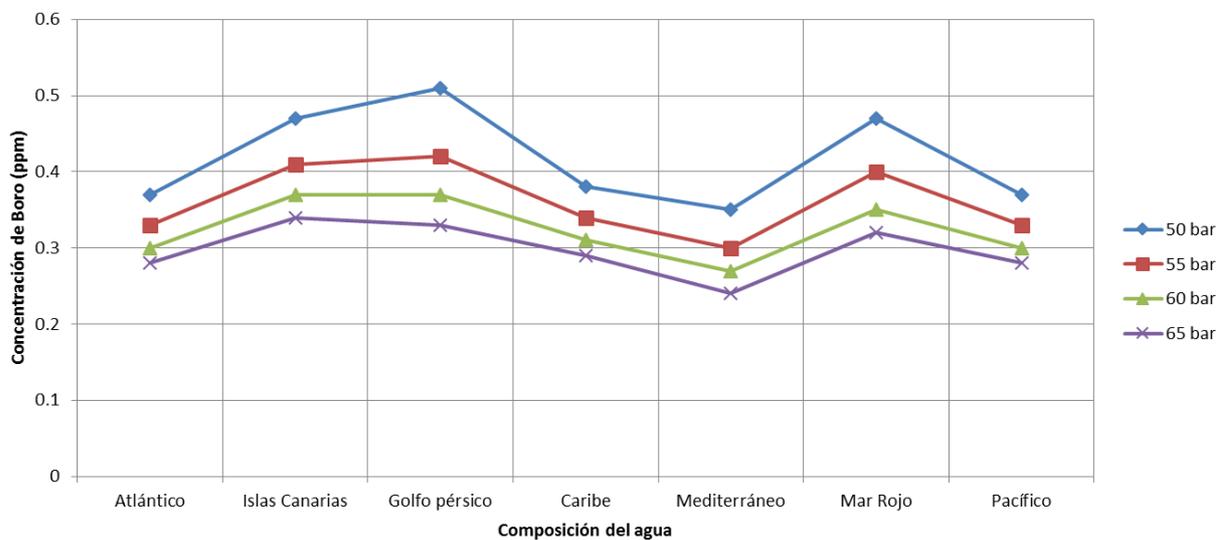


Figura 8. Concentración de boro en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30XHR440-i).

- High Reaction Low Energy

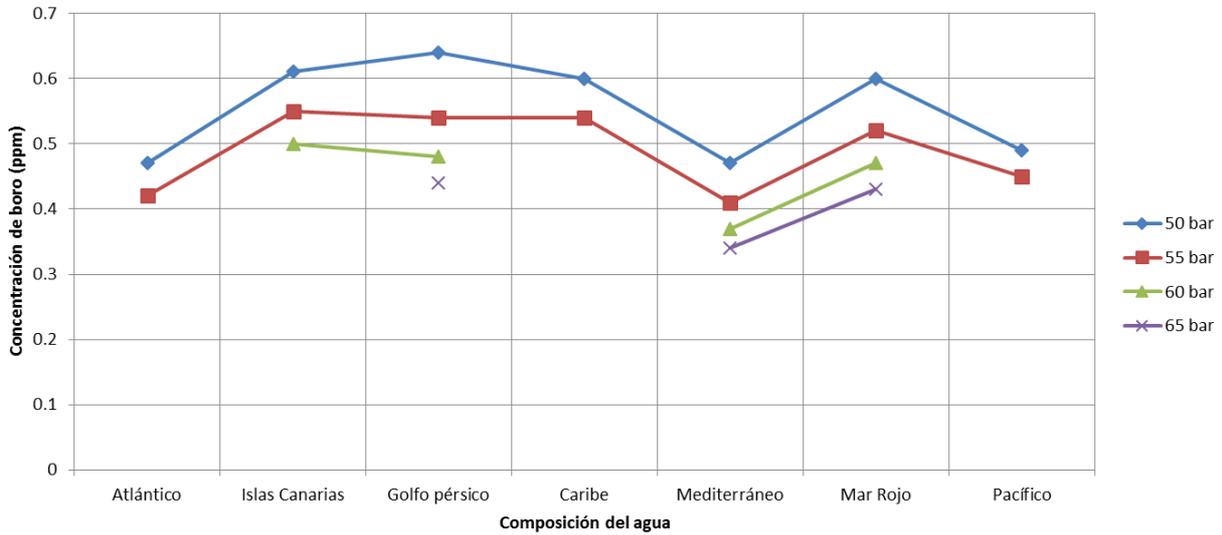


Figura 9. Concentración de boro en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30HRLE440-i).

- Extra Low Energy

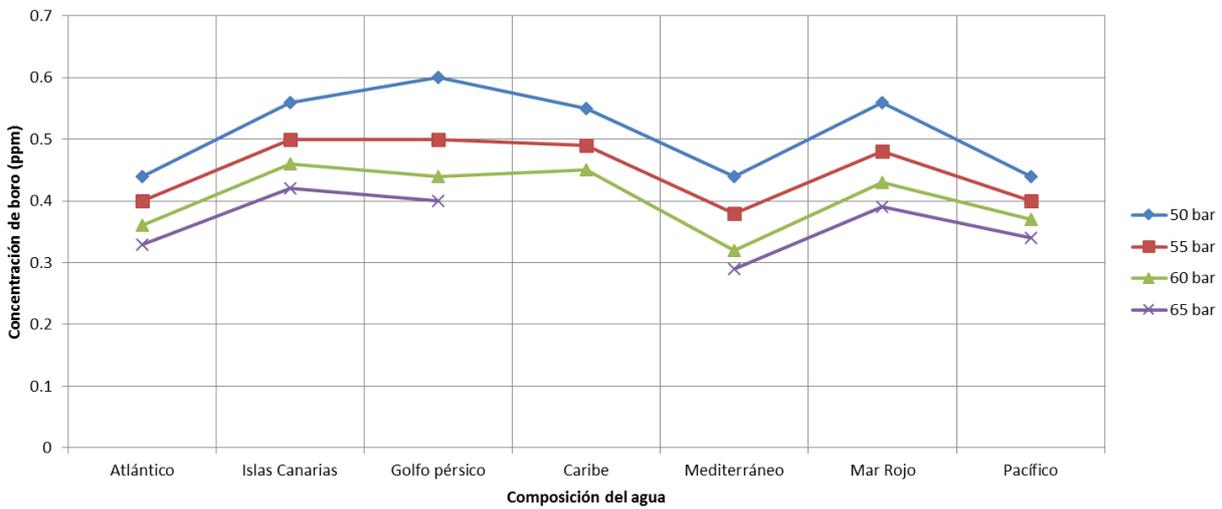


Figura 10. Concentración de boro en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30XLE440-i).

- Ultra Low Energy

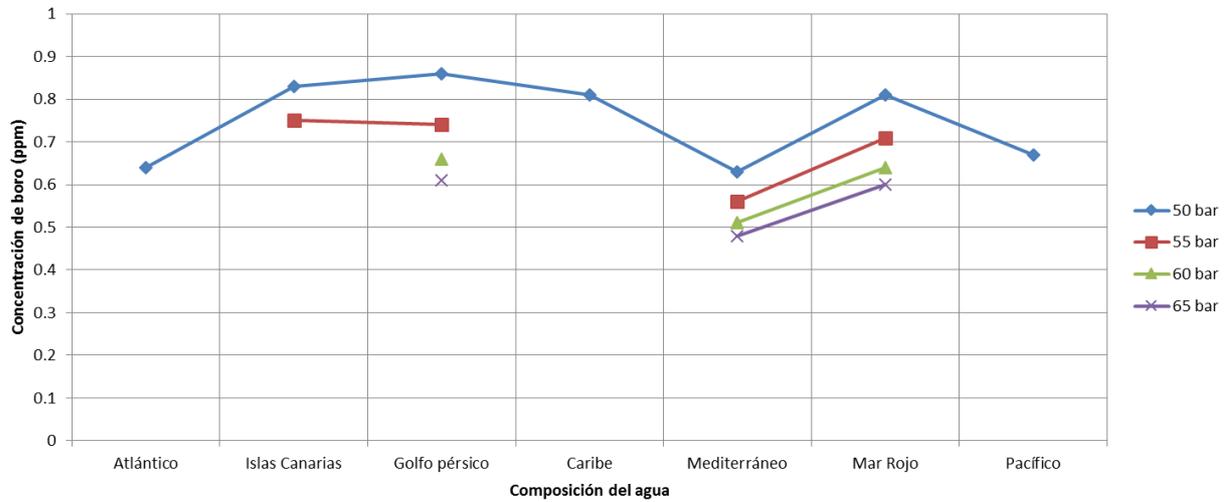


Figura 11. Concentración de boro en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30ULE440-i).

Como podemos observar, a medida que la membrana es menos restrictiva, aumenta la concentración de Boro a la salida, llevando el caudal desalado a condiciones no aceptadas por la normativa. A su vez, incrementar la presión conlleva que dicha concentración se reduzca, por lo que para obtener la mínima posible, es deseable una membrana tipo XRE a alta presión.

#### 4.4. TDS (Concentración de sales en el caudal permeado)

Finalmente, vamos a analizar la concentración de sales obtenidas en el caudal permeado a la salida de la membrana:

- Extra High Reaction

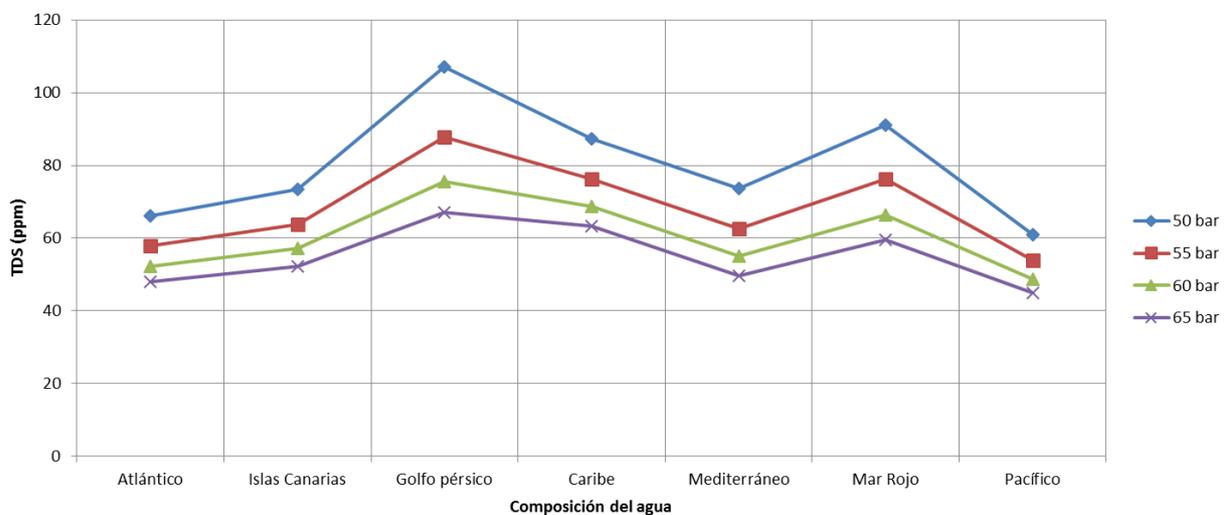


Figura 12. TDS en el caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición del agua

(SW30XHR440-i),

- High Reaction Low Energy

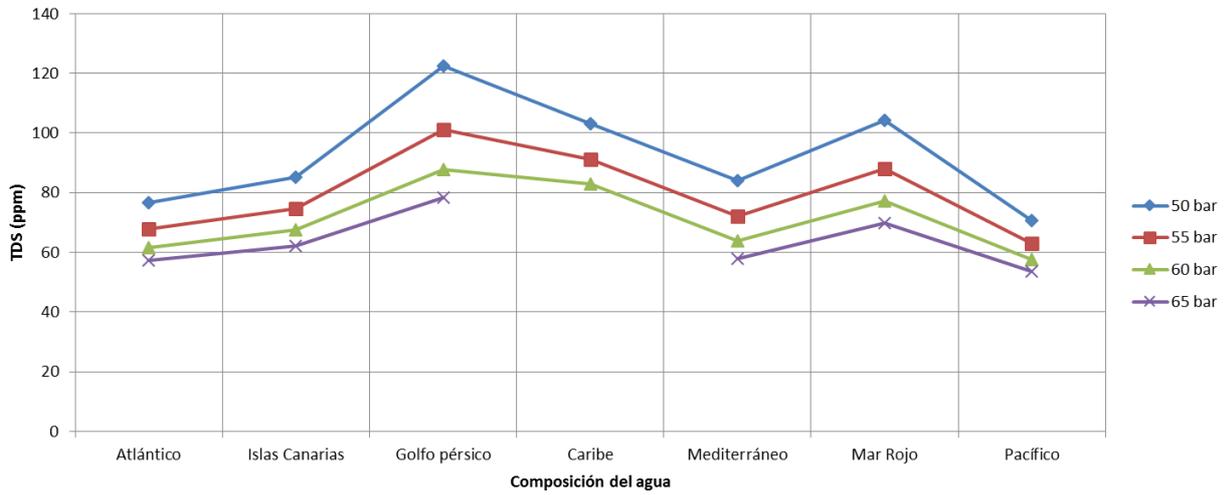


Figura 13. TDS en el caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30HRLE440-i).

- Extra Low Energy

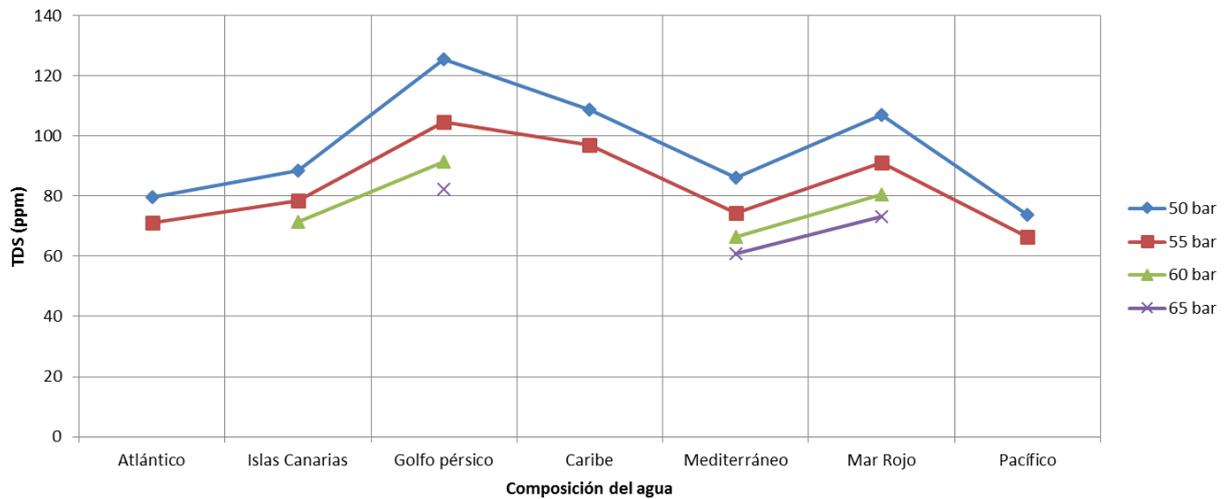


Figura 14. TDS en el caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30XLE440-i).

- Ultra Low Energy

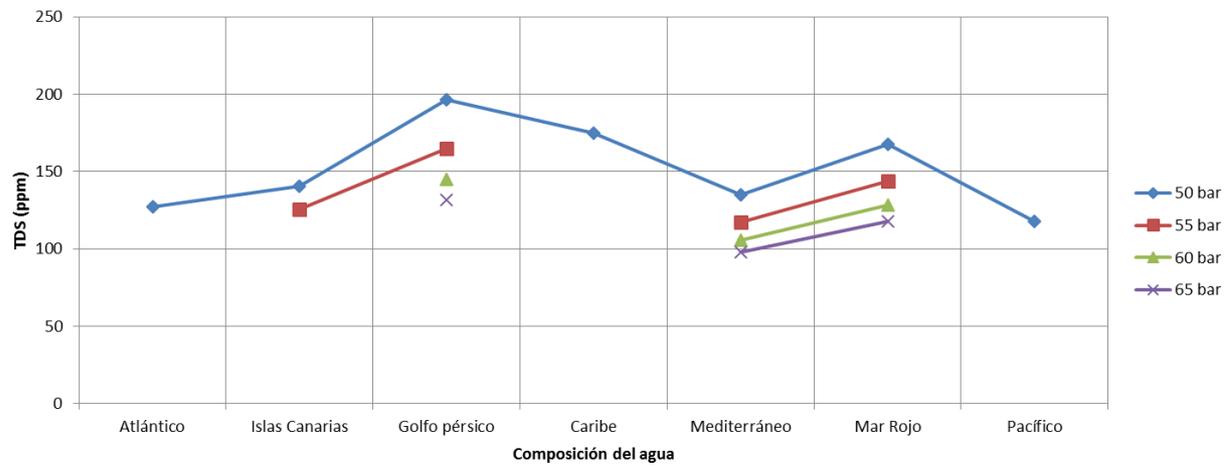


Figura 15. TDS en el caudal permeado en función de la presión de alimentación y la composición del agua (SW30ULE440-i).

Ocurre lo mismo que con la concentración de Boro, su comportamiento es directamente proporcional, teniendo en cuenta que la concentración de sales es de mayor orden.

# 5 CÁLCULO DE PERMEABILIDAD AL AGUA E INCREMENTO DE PRESIÓN OSMÓTICA EN LA MEMBRANA

En el presente capítulo se analizará uno de los parámetros fundamentales en la operación y mantenimiento de las plantas desaladoras, la permeabilidad al agua, definido con anterioridad como  $L_p$ . Su relevancia está vinculada al caudal de alimentación y al efecto fouling, que implica la obstrucción de la superficie de la membrana por la acumulación de iones en la misma, dando lugar a la concentración de polarización. Por lo que analizaremos la permeabilidad para los distintos tipos de membranas señalados con anterioridad a distintas presiones:

- 50 bar.
- 55 bar.
- 60 bar.
- 65 bar.

Además, compararemos dichos valores a distintas temperaturas, tomando diferentes composiciones de agua salada en función de la región:

- Golfo pérsico.
- Caribe.
- Islas Canarias

Dichos valores nos proporcionarán un valor medio de la permeabilidad al agua para cada membrana, que nos permitirán conocer el incremento de presión osmótica en la misma al aplicar un caudal de agua salada.

## 5.1. Ecuaciones

Para poder realizar dichos cálculos, emplearemos, fundamentalmente, la ecuación del caudal de agua producto, sin tener en cuenta las variaciones originadas debido a la modificación de las condiciones nominales de operación:

Ecuación 23. Caudal permeado en función de la permeabilidad.

$$Q_p = L_p * A * NDP = L_p * A * (\Delta P - \Delta \Pi)$$

El incremento de presión en la membrana,  $\Delta P$ , queda definido mediante:

Ecuación 24. Incremento de presión a través de la membrana.

$$\Delta P = P_{F-BD} - P_{perm} = P_{atm} - \frac{\Delta P_{lost}}{2} - P_{perm}$$

Donde:

- $P_{F-BD}$ : es la presión promedio entre la de entrada de la alimentación y la salida al pasar el caudal de agua salada por los módulos de membrana.
- $\Delta P_{lost}$ : es la pérdida de presión que se produce en los espacios existentes entre las láminas de membranas por la circulación de la alimentación.

En el caso que nos concierne, a la salida de la membrana, consideraremos el ambiente y puesto que, empleamos presiones manométricas, el valor de  $P_{perm}$  será cero. No obstante, en una planta real, podemos encontrar válvulas que actúen aplicando presión a la salida para satisfacer la demanda necesaria, tanto en caudal como en condiciones termodinámicas. Dicha presión es conocida como “back pressure”.

A su vez, el diferencial de presión osmótica se representa mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 25. Incremento de presión osmótica a través de la membrana.

$$\Delta \Pi = \Pi_{F-BD} - \Pi_{perm}$$

Donde:

- $\Pi_{F-BD}$ : es el promedio de la presión osmótica entre la entrada y la salida de la membrana.
- $\Pi_{perm}$ : es la presión osmótica del caudal permeado, que se puede considerar nula para membranas convencionales.

A partir de ROSA, considerando un factor de fouling (flow factor) constante de 0.85, y aplicando la simplificación de las siguientes ecuaciones:

Ecuación 26. Cálculo de la permeabilidad.

$$L_p = \frac{Q_p}{A * NDP} = \frac{Q_{perm}}{A * NDP} * \rho_{perm}$$

Donde:

- $Q_p$  es el caudal de producto resultante tras el plazo del flujo por las membranas
- $Q_{perm}$  es el caudal de agua tratada.
- $A$  es el área de la membrana.
- $NDP$  es la fuerza motriz del proceso
- $\rho_{perm}$ : se obtiene a partir de la concentración de sales del permeado:

Ecuación 27. Cálculo de la densidad del permeado.

$$\rho_{perm} = (a_1 + a_2 * t + a_3 * t^2 + a_4 * t^3 + a_5 * t^4) + (b_1 * S + b_2 * S * t + b_3 * S * t^2 + b_4 * S * t^3 + b_5 * S^2 * t^2)$$

Donde:

- $a_1 = 9.999 * 10^2$
- $a_2 = 2.034 * 10^{-2}$
- $a_3 = -6.162 * 10^{-3}$
- $a_4 = 2.261 * 10^{-5}$
- $a_5 = -4.657 * 10^{-8}$
- $b_1 = 8.020 * 10^2$
- $b_2 = -2.001$
- $b_3 = 1.677 * 10^{-2}$
- $b_4 = -3.060 * 10^{-3}$
- $b_5 = -1.613 * 10^{-5}$

Obtendremos un valor promedio para la permeabilidad en cada membrana.

## 5.2. Resultados

A continuación se muestran los resultados, numéricos y gráficos, obtenidos, teniendo en cuenta que hemos tomado fijos:

- Factor de Fouling = 0.85.
- $Q_{alim} = 8 \text{ m}^3/\text{h}$ .
- $\rho_{perm} = 1027 \text{ kg/m}^3$  (Se considera constante la densidad)

Se obtiene por tanto:

- Para la membrana SW30XHR440-i:

Tabla 5. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XHR440-i (50 bar).

SWXHR440-i (50 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0.39	16.00	40.90	17.16	107.42	0.55
Canary Island	0.6	20.00	40.90	22.68	73.65	0.65
Caribbean	0.71	26.00	40.90	22.44	87.59	0.77

Tabla 6. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XHR440-i (55 bar).

SWXHR440-i (55 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0.49	16.0	40.9	21.92	88.07	0.55
Canary Island	0.71	20.0	40.9	27.46	64.04	0.63
Caribbean	0.84	26.0	40.9	27.17	76.67	0.75

Tabla 7. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XHR440-i (60 bar).

SWXHR440-i (60 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0.58	16.0	40.9	26.69	75.71	0.53
Canary Island	0.82	20.0	40.9	32.24	57.35	0.62
Caribbean	0.96	26.0	40.9	31.91	69.10	0.73

Tabla 8. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XHR440-i (65 bar).

SWXHR440-i (65 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0.67	16.0	40.9	31.47	67.16	0.54
Canary Island	0.92	20.0	40.9	37.03	52.46	0.63
Caribbean	1.07	26.0	40.9	36.66	63.60	0.73

Se obtiene una permeabilidad al agua media de **0.65**.

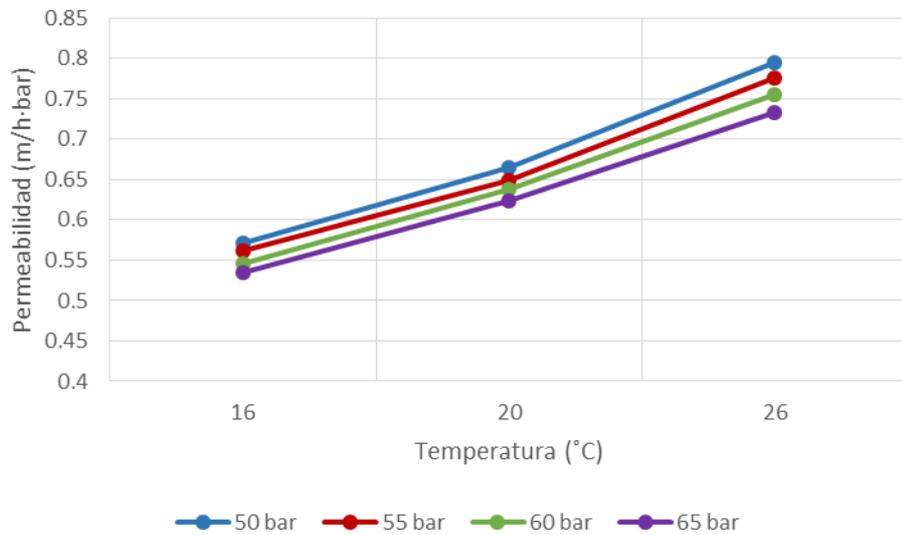


Figura 16. Permeabilidad en función de la temperatura (SW30XHR440-i).

- Para la membrana SW30HRLE440-i:

Tabla 9. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30HRLE440-i (50 bar).

SWXHR440-i (50 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0.47	16.0	40.9	16.97	122.46	0.70
Canary Island	0.74	20.0	40.9	22.43	85.40	0.83
Caribbean	0.85	26.0	40.9	22.16	103.18	0.96

Tabla 10. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30HRLE440-i (55 bar).

SWXHR440-i (55 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0.59	16.0	40.9	21.68	101.49	0.68
Canary Island	0.87	20.0	40.9	27.16	74.99	0.80
Caribbean	1.00	26.0	40.9	26.83	91.28	0.94

Tabla 11. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30HRLE440-i (60 bar).

SWXHR440-i (60 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0.7	16.0	40.9	26.4	87.99	0.67
Canary Island	0.99	20.0	40.9	31.89	67.78	0.78
Caribbean	1.14	26.0	40.9	31.52	83.10	0.91

Tabla 12. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30HRLE440-i (65 bar).

SWXHR440-i (65 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0.81	16.0	40.9	31.13	78.70	0.65
Canary Island	1.1	20.0	40.9	36.63	62.54	0.75
Caribbean	1.27	26.0	40.9	36.22	77.21	0.88

Obteniéndose una permeabilidad media de **0.77**.

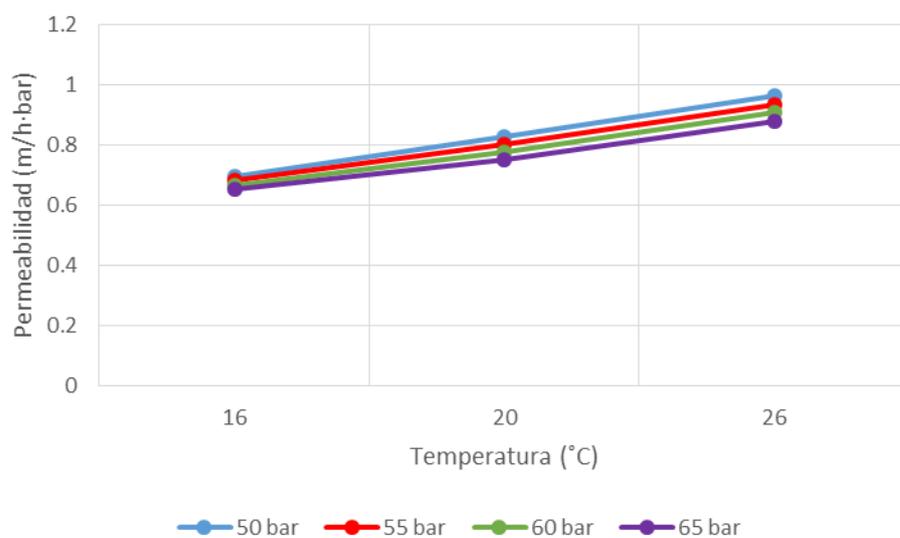


Figura 17. Permeabilidad en función de la temperatura (SW30HRLE440-i).

- Para la membrana SW30XLE440-i:

Tabla 13. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XLE440-i (50 bar).

SWXHR440-i (50 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0,56	16.0	40.9	16,78	125,92	0,84
Canary Island	0,86	20.0	40.9	22,17	88,91	0,97
Caribbean	0,99	26.0	40.9	21,87	108,80	1,14

Tabla 14. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XLE440-i (55 bar).

SWXHR440-i (55 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0,69	16.0	40.9	21,43	104,97	0,81
Canary Island	1,01	20.0	40.9	26,84	78,70	0,95
Caribbean	1,16	26.0	40.9	26,49	97,12	1,10

Tabla 15. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XLE440-i (60 bar).

SWXHR440-i (60 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0,82	16.0	40.9	26,1	91,66	0,79
Canary Island	1,15	20.0	40.9	31,53	71,69	0,92
Caribbean	1,31	26.0	40.9	31,12	89,14	1,06

Tabla 16. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XLE440-i (65 bar).

SWXHR440-i (65 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0,94	16.0	40.9	30,78	82,54	0,77
Canary Island	1,28	20.0	40.9	36,22	66,64	0,89
Caribbean	1,45	26.0	40.9	35,77	83,44	1,02

Obteniendo una permeabilidad media de **0.94**.

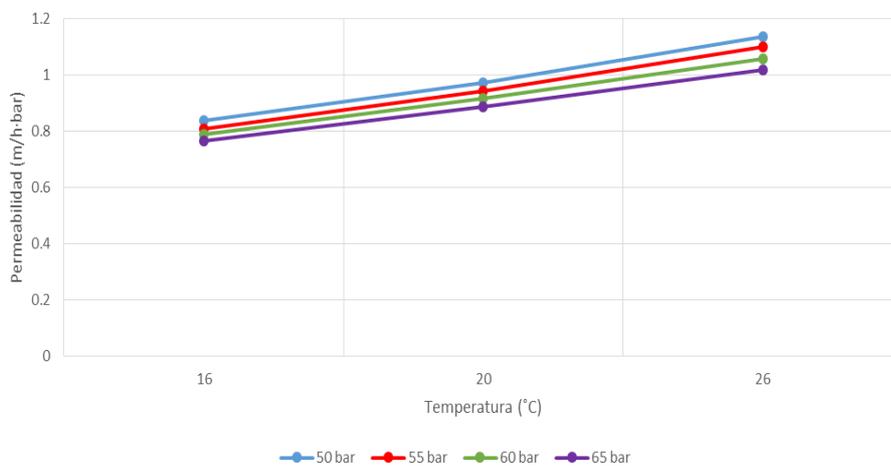


Figura 18. Permeabilidad en función de la temperatura (SW30XLE440-i).

- Para la membrana SW30ULE440-i:

Tabla 17. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30ULE440-i (50 bar).

SWXHR440-i (50 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0,66	16.0	40.9	16,6	198,66	1,00
Canary Island	1,01	20.0	40.9	21,91	141,15	1,16
Caribbean	1,14	26.0	40.9	21,59	175,35	1,33

Tabla 18. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XLE440-i (55 bar).

SWXHR440-i (55 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0,81	16.0	40.9	21,19	165,67	0,96
Canary Island	1,18	20.0	40.9	26,51	126,08	1,12
Caribbean	1,33	26.0	40.9	26,13	157,97	1,28

Tabla 19. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XLE440-i (60 bar).

SWXHR440-i (60 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	0,96	16.0	40.9	25,79	145,71	0,94
Canary Island	1,34	20.0	40.9	31,13	115,82	1,08
Caribbean	1,5	26.0	40.9	30,70	146,18	1,23

Tabla 20. Cálculo de permeabilidad para la membrana SW30XLE440-i (65 bar).

SWXHR440-i (65 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Surface (m <sup>2</sup> )	NDP (bar)	TDS (mg/l)	L (m/h·bar)
Persian Gulf	1,09	16.0	40.9	30,41	132,14	0,90
Canary Island	1,48	20.0	40.9	35,76	108,46	1,04
Caribbean	1,66	26.0	40.9	35,38	137,89	1,18

Obteniendo una permeabilidad media de **1.10**.

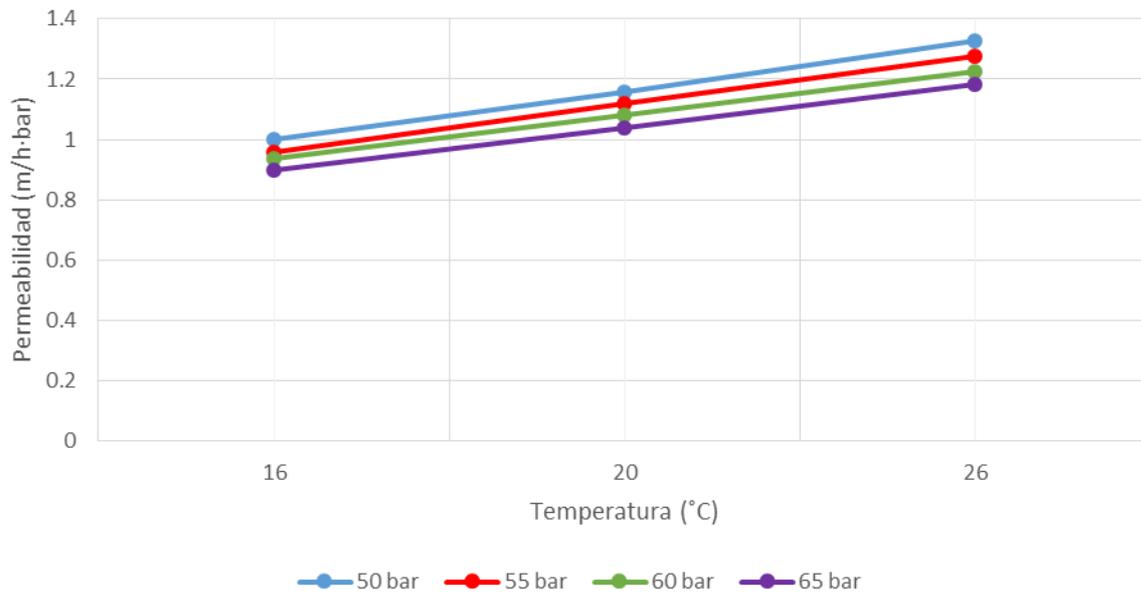


Figura 19. Permeabilidad en función de la temperatura (SW30ULE440-i).

La influencia de la composición del agua y de la presión de alimentación modifica la permeabilidad al paso del agua a lo largo de la membrana de forma notable, reduciéndose cuanto mayor sea la presión y sin mantener una clara relación entre la TDS y el valor de la misma, ya que se ve influenciada, además por la temperatura, que determinar en un porcentaje considerable el valor de la misma, aumentando cuanto mayor sea la temperatura del agua de alimentación.

### 5.3. Cálculo de $\Delta\pi$

A partir de los datos anteriores, calculamos el incremento de presión osmótica, obteniendo los siguientes resultados para cada membrana y manteniendo las mismas variables constantes que en el apartado anterior.

- Para la membrana SW30XHR440-i:

Tabla 21. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XHR440-i (50 bar).

SWXHR440-i (50 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	L	$\Delta\pi$ (bar)
Persian Gulf	0,39	50,00	0,61	49,70	0,57	49,68
Canary Island	0,6	50,00	0,58	49,71	0,66	49,69
Caribbean	0,71	50,00	0,56	49,72	0,80	49,70

Tabla 22. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XHR440-i (55 bar).

SWXHR440-i (55 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	L	$\Delta \Pi$ (bar)
Persian Gulf	0,49	55,00	0,60	54,70	0,56	54,68
Canary Island	0,71	55,00	0,58	54,71	0,65	54,68
Caribbean	0,84	55,00	0,56	54,72	0,78	54,69

Tabla 23. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XHR440-i (60 bar).

SWXHR440-i (60 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	L	$\Delta \Pi$ (bar)
Persian Gulf	0,58	60,00	0,60	59,70	0,55	59,67
Canary Island	0,82	60,00	0,58	59,71	0,64	59,68
Caribbean	0,96	60,00	0,56	59,72	0,76	59,69

Tabla 24. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XHR440-i (65 bar).

SWXHR440-i (65 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	L	$\Delta \Pi$ (bar)
Persian Gulf	0,67	65,00	0,60	64,70	0,54	64,67
Canary Island	0,92	65,00	0,58	64,71	0,62	64,67
Caribbean	1,07	65,00	0,56	64,72	0,73	64,68

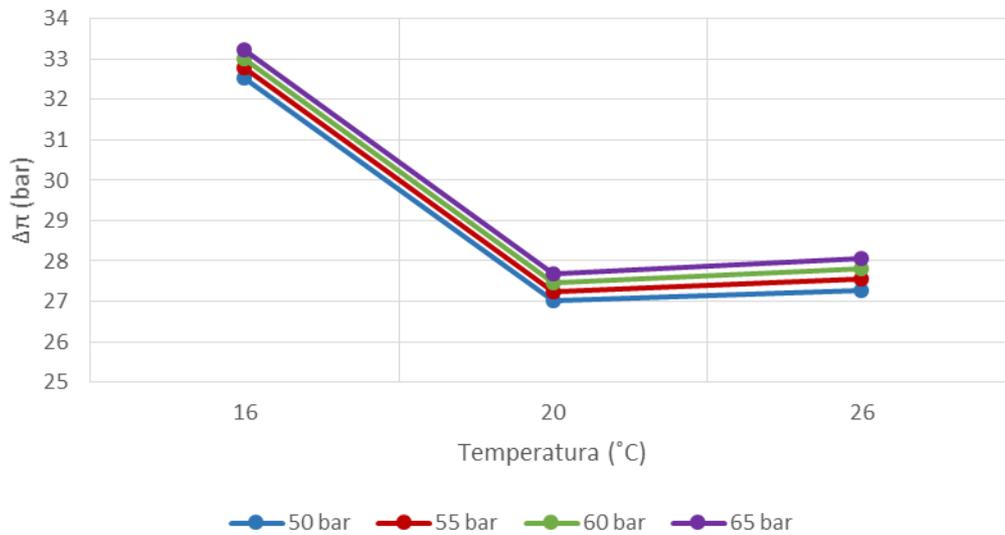


Figura 20. Resultados en función de la temperatura y la presión de alimentación (SW30XHR440-i).

- Para la membrana SW30HRLE440-i:

Tabla 25. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30HRLE440-i (50 bar).

SWHRLE440-i (50 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	ΔP (bar)	L	ΔΠ (bar)
Persian Gulf	0,47	50,00	0,60	49,70	0,70	49,68
Canary Island	0,74	50,00	0,58	49,71	0,83	49,69
Caribbean	0,85	50,00	0,56	49,72	0,96	49,70

Tabla 26. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30HRLE440-i (55 bar).

SWHRLE440-i (55 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	ΔP (bar)	L	ΔΠ (bar)
Persian Gulf	0,59	55,00	0,60	54,70	0,68	54,68
Canary Island	0,87	55,00	0,58	54,71	0,80	54,68
Caribbean	1,00	55,00	0,56	54,72	0,94	54,69

Tabla 27. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30HRLE440-i (60 bar).

SWHRLE440-i (60 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	L	$\Delta \Pi$ (bar)
Persian Gulf	0,7	60,00	0,60	59,70	0,67	59,67
Canary Island	0,99	60,00	0,58	59,71	0,78	59,68
Caribbean	1,14	60,00	0,55	59,73	0,91	59,69

Tabla 28. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30HRLE440-i (65 bar).

SWHRLE440-i (65 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	L	$\Delta \Pi$ (bar)
Persian Gulf	0,81	65,00	0,60	64,70	0,65	64,67
Canary Island	1,10	65,00	0,57	64,72	0,75	64,68
Caribbean	1,27	65,00	0,55	64,73	0,88	64,69

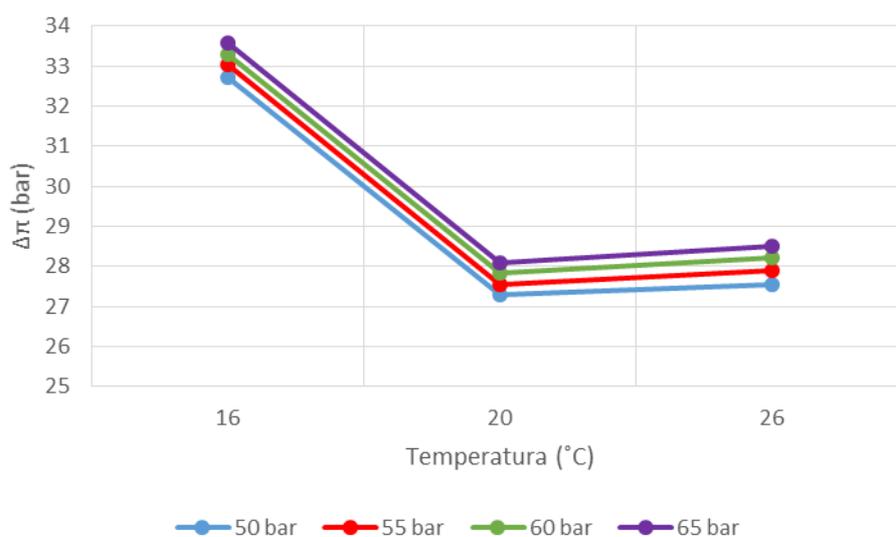


Figura 21. Resultados en función de la temperatura y la presión de alimentación (SW30HRLE440-i).

- Para la membrana SW30XLE440-i:

Tabla 29. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XLE440-i (50 bar).

SWXLE440-i (50 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	L	$\Delta \Pi$ (bar)
Persian Gulf	0,56	50,00	0,60	49,70	0,84	49,68
Canary Island	0,86	50,00	0,58	49,71	0,97	49,69
Caribbean	0,99	50,00	0,56	49,72	1,14	49,70

Tabla 30. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XLE440-i (55 bar).

SWXLE440-i (55 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	L	$\Delta \Pi$ (bar)
Persian Gulf	0,69	55,00	0,60	54,70	0,81	54,68
Canary Island	1,01	55,00	0,58	54,71	0,95	54,68
Caribbean	1,16	55,00	0,55	54,73	1,10	54,70

Tabla 31. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XLE440-i (60 bar).

SWXLE440-i (60 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	L	$\Delta \Pi$ (bar)
Persian Gulf	0,82	60,00	0,60	59,70	0,79	59,68
Canary Island	1,15	60,00	0,57	59,72	0,92	59,68
Caribbean	1,31	60,00	0,55	59,73	1,06	59,69

Tabla 32. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30XLE440-i (65 bar).

SWXLE440-i (65 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	L	$\Delta \Pi$ (bar)
Persian Gulf	0,94	65,00	0,60	64,70	0,77	64,67
Canary Island	1,28	65,00	0,57	64,72	0,89	64,68
Caribbean	1,45	65,00	0,55	64,73	1,02	64,69

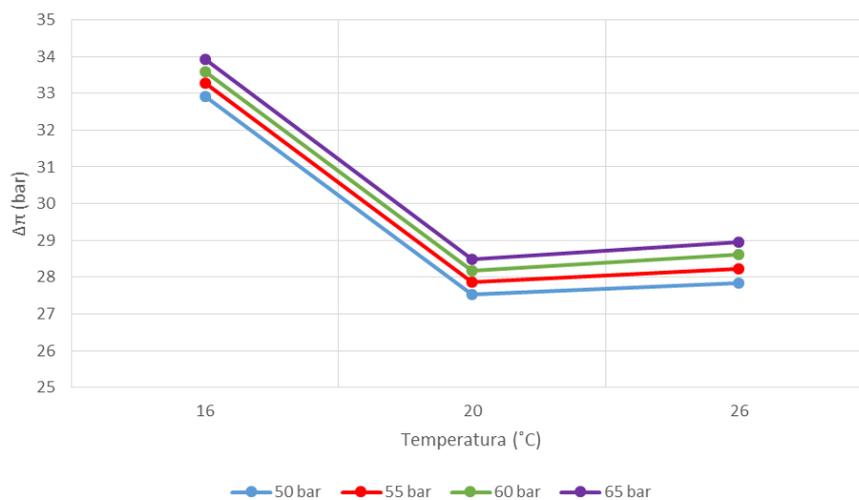


Figura 22. Resultados en función de la temperatura y la presión de alimentación (SW30XLE440-i).

- Para la membrana SW30ULE440-i:

Tabla 33. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30ULE440-i (50 bar).

SWULE440-i (50 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	L	$\Delta \Pi$ (bar)
Persian Gulf	0,66	50,00	0,60	49,70	0,99	49,68
Canary Island	1,01	50,00	0,58	49,71	1,16	49,69
Caribbean	1,14	50,00	0,55	49,73	1,33	49,70

Tabla 34. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30ULE440-i (55 bar).

SWULE440-i (55 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	L	$\Delta \Pi$ (bar)
Persian Gulf	0,81	55,00	0,60	54,70	0,96	54,68
Canary Island	1,18	55,00	0,57	54,72	1,12	54,69
Caribbean	1,33	55,00	0,55	54,73	1,28	54,70

Tabla 35. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30ULE440-i (60 bar).

SWULE440-i (60 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	L	$\Delta \Pi$ (bar)
Persian Gulf	0,96	60,00	0,60	59,70	0,94	59,67
Canary Island	1,34	60,00	0,57	59,72	1,08	59,68
Caribbean	1,5	60,00	0,55	59,73	1,23	59,70

Tabla 36. Cálculo de incremento de presión osmótica en la membrana SW30ULE440-i (65 bar).

SWULE440-i (65 bar)						
Point	q_permeate (m <sup>3</sup> /h)	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	$\Delta P$ (bar)	L	$\Delta \Pi$ (bar)
Persian Gulf	1,09	65,00	0,60	64,70	0,90	64,67
Canary Island	1,48	65,00	0,57	64,72	1,04	64,68
Caribbean	1,66	65,00	0,55	64,73	1,18	64,69

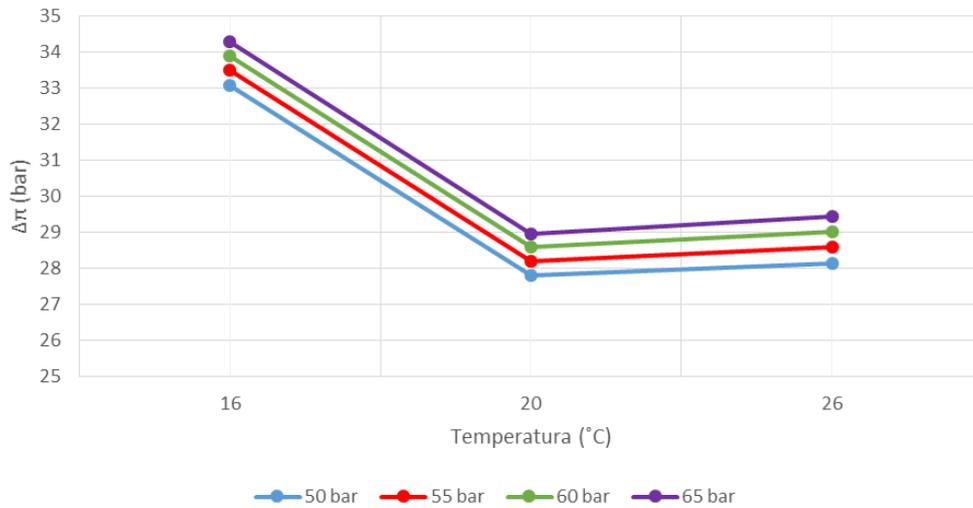


Figura 23. Resultados en función de la temperatura y la presión de alimentación (SW30ULE440-i).

Los resultados adjuntados muestran la escasa influencia de la tipología de membrana en el incremento de presión osmótica a través de la misma. No obstante, es notorio el aumento de dicho parámetro al incrementar la presión de alimentación, que se influenciado de forma destacable dando lugar a un incremento considerable. Como conclusión adicional, las diferencias existentes entre los distintos casos de estudio en función de la composición del agua tampoco muestran una influencia distante en el incremento de presión osmótica.

## 6 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

Una vez descritas las ecuaciones requeridas que simulan el proceso de desalación por medio de ósmosis inversa, y obtener los valores de aquellos parámetros que definen el comportamiento de las membranas ante variaciones y fluctuaciones de las condiciones de operación, de forma estática o variable, según su naturaleza, es posible la implementación del software que nos permita calcular los principales valores del proceso para evaluar el impacto de aplicaciones de recuperación energética, y ser comparado económicamente con las aplicaciones biotecnológicas desarrolladas en los últimos años gracias a los esfuerzos de I+D de las principales empresas, centros de investigación y universidades focalizadas en el sector.

El Software nos permitirá obtener una estimación de la producción de la membrana, extrapolada al pressure vessel, incluyendo las características de los flujos de salida para la aplicación de sistemas de recuperación energética. La siguiente figura muestra el diagrama de flujo que constituye dicho software implementado en software, en función de los datos de entrada, los cálculos intermedios y finales realizados, y los datos de salida:

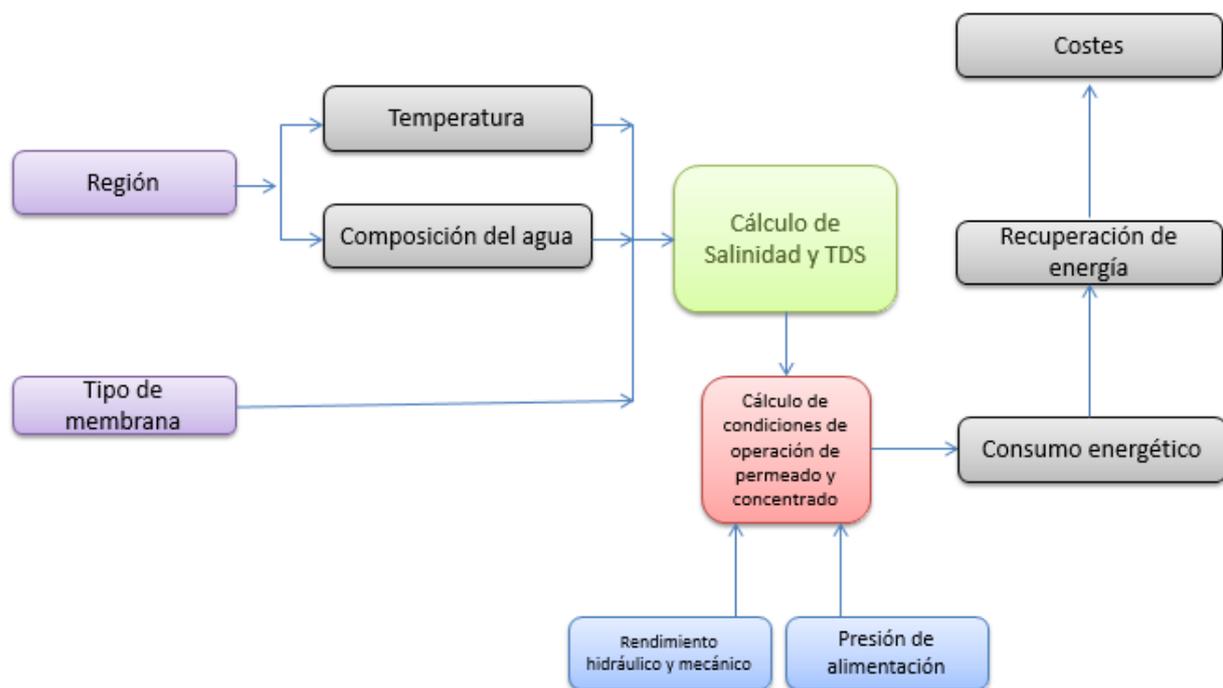


Figura 24. Diagrama de flujo de software.

### 6.1. Algoritmo

De acuerdo con los distintos módulos que componen el software, se ha establecido un algoritmo que describe la secuencia de operación del software para la obtención de los resultados, que nos permitirá llevar a cabo el análisis termoeconómico a partir de los datos obtenidos anteriormente por medio del software ROSA.

La siguiente figura muestra el algoritmo implementado, atendiendo a los módulos desarrollados, que serán descritos con posterioridad:

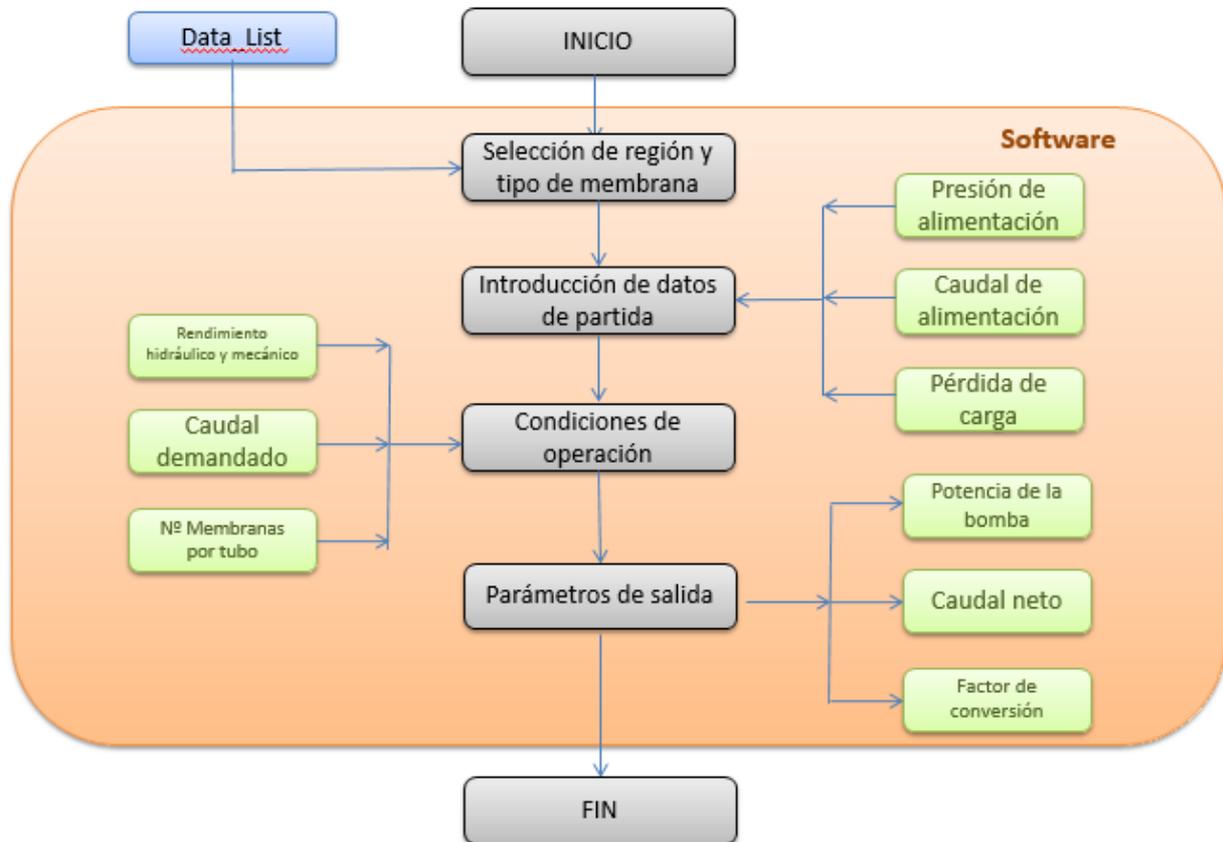


Figura 25. Algoritmo de obtención de parámetros de salida.

En el algoritmo adjuntado en Figura 25, se muestra la relación existente y vinculante ente los parámetros de entrada, modificables por el usuario y los resultados obtenidos, desde el punto de vista del proceso de desalación. No obstante, parte de esos parámetros de salida, son calculados mediante procesos previos y paralelos, ya que se ven condicionados por las características de las membranas y de la composición del agua, y han sido calculados de forma fija en función de la presión. La siguiente figura muestra la interacción entre los módulos de cálculo previo y el propio software, así como el análisis posterior, objetivo del presente proyecto para tratar en detalle el análisis termoeconómico de las aplicaciones biotecnológicas en el proceso de desalación como método de tratamiento de agua.

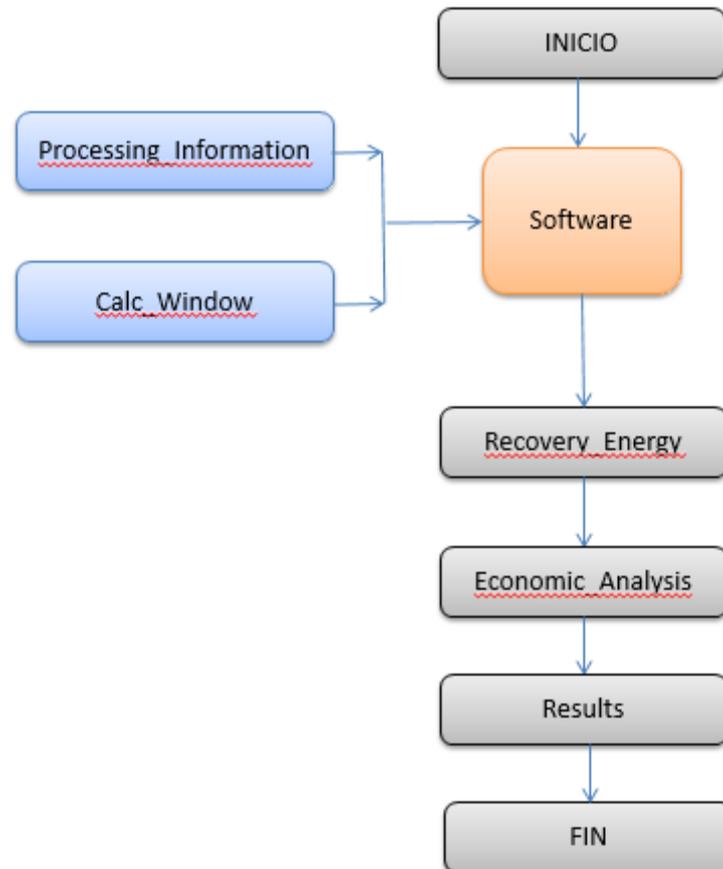


Figura 26. Interacción entre módulos de cálculos de procesamiento de la información.

## 6.2. Módulos del software

A continuación, serán detallados cada uno de los módulos existentes.

### 6.2.1 Data\_List

Data\_List incluye el listado con las posibilidades de selección que el usuario es capaz de elegir como punto de partida atendiendo a dos parámetros principales:

- Región, que define la composición del agua integrada en cada una de las zonas marítimas y oceánicas más relevantes en el mundo con una considerable actividad en el sector, como son:
  - Océano Atlántico.
  - Islas Canarias.
  - Mar del Caribe.
  - Mar Mediterráneo.
  - Océano Pacífico.
  - Golfo Pérsico.
  - Mar Rojo.
- Tipo de membrana, atendiendo a la capacidad de filtración de la misma y su porosidad, como ya ha sido

descrita en apartados anteriores, que modifica las características del flujo rechazado, concentrado y permeado, estando disponible en la versión preliminar del software:

- SW30XHR440-i.
- SW30HRLE440-i.
- SW30XLE440-i.
- SW30ULE440-i.

Dicho módulo es de origen auxiliar, únicamente proporcionará el formato correspondiente a la lista desplegable de la ventana principal del software, y no debe ser modificado por el usuario, a excepción de que se incluyen opciones adicionales, ya sean membranas de mejor tecnología y/o otras regiones con diferente composición de agua.

Las siguientes imágenes muestran la configuración del propio módulo y su repercusión en el software:

	A	B	C	D	E
1					
2		<b>Región</b>		<b>Tipo de membrana</b>	
3		Atlantic		SW30XHR-440i	
4		Canary Island		SW30HRLE-440i	
5		Caribbean		SW30XLE-440i	
6		Mediterranean		SW30ULE-440i	
7		Pacific			
8		Persian Gulf			
9		Red Sea			
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					

LISTO

Navigation: Data\_List | processing\_Information | Detailed\_view\_equations | Calc\_Window

Figura 27. Módulo Data\_List.

	A	B	C	D	E
1					
2		<b>Parámetros de entrada</b>			
3		<b>Parámetro</b>	<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Ud</b>
4		Región	Atlantic	-	-
5		Tipo de membrana	Atlantic	-	-
6		Caudal de Alimentación	Canary Island	8	m <sup>3</sup> /h
7		Pérdida de carga	Caribbean	0.345	
8		Presión a la salida	Mediterranean	0	
9		Presión a la entrada	Pacific	50	bar
10		Rendimiento Hidráulico	Persian Gulf	0.8	-
11		Temperatura	Red Sea	16	°C
12		Polarización de concentración	t	0	%
13		Área	CPF	40.9	m <sup>2</sup>
14		Rendimiento Mecánico	A	0.98	-
15		Cuadal demandado	$\eta_{mec}$	480	m <sup>3</sup> /día
16		Nº Membranas por tubo de presión	q_d	7	-
17			N/t		

Figura 28. Lista desplegable para selección de región.

	A	B	C	D	E
1					
2		<b>Parámetros de entrada</b>			
3		<b>Parámetro</b>	<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Ud</b>
4		Región	Atlantic	-	-
5		Tipo de membrana	SW30HRLE-440i	-	-
6		Caudal de Alimentación	SW30XHR-440i	8	m <sup>3</sup> /h
7		Pérdida de carga	SW30HRLE-440i	0.345	
8		Presión a la salida	SW30XLE-440i	0	
9		Presión a la entrada	SW30ULE-440i	50	bar
10		Rendimiento Hidráulico	P_in	0.8	-
11		Temperatura	$\eta_b$	16	°C
12		Polarización de concentración	t	0	%
13		Área	CPF	40.9	m <sup>2</sup>
14		Rendimiento Mecánico	A	0.98	-
15		Cuadal demandado	$\eta_{mec}$	480	m <sup>3</sup> /día
16		Nº Membranas por tubo de presión	q_d	7	-
17			N/t		

Figura 29. Lista desplegable para selección de tipo de membrana.

Cabe destacar que en la esquina superior izquierda de cada una de las hojas del Excel que forman el software, el usuario contará con un comentario que incluye una breve descripción del módulo en el que se sitúa.

	A	B	C	D	E
1		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #ffffcc;">                     Hoja Excel empleada para definir los elementos de la lista desplegable de selección de datos.                 </div>			
2					Tipo de membrana
3			At		SW30XHR-440i
4			Ca		SW30HRLE-440i
5			Caribbean		SW30XLE-440i
5			Mediterranean		SW30ULE-440i
7			Pacific		
8			Persian Gulf		
9			Red Sea		
0					
1					

Figura 30. Descripción módulo Data\_List.

### 6.2.2 Detailed\_View\_Equations

En este módulo, se esclarecen las ecuaciones empleadas con posterioridad con el fin de simular el proceso de desalación en función de la temperatura, la presión de alimentación y la composición del agua desde el punto de vista termodinámico, para resolver el balance másico y de concentraciones en el interior de la membrana.

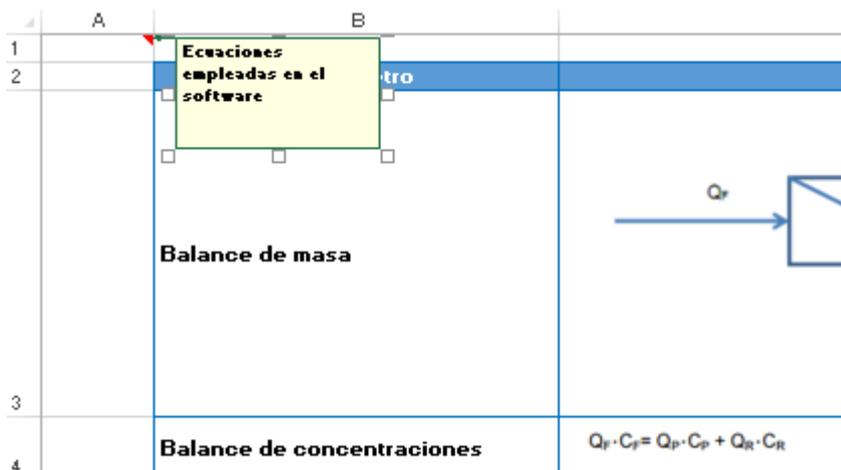
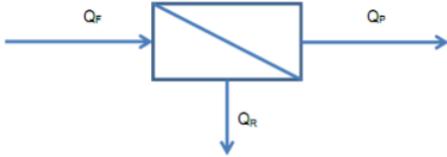


Figura 31. Descripción de Detailed\_View\_Equation

La siguiente tabla muestra las ecuaciones establecidas en dicho módulo:

Tabla 37. Ecuaciones empleadas en el software.

Parámetro	Ecuación	Unidad
Balance de masa		-
Balance de concentraciones	$Q_F \cdot C_F = Q_P \cdot C_P + Q_R \cdot C_R$	-
Concentración de Rechazo (C <sub>R</sub> )	$C_R = \frac{RS \cdot C_F}{1 - R}$	mg/l
Recovery (R)	$R = \frac{Q_P}{Q_F}$	-
Presión Osmótica	$\pi = 0,08308 \cdot \phi \cdot (Temp + 273,15) \cdot \sum m_i$	bar
Incremento de Presión ( $\Delta P$ )	$\Delta P = (P_{in} + P_{intake}) - P_{out}$	bar
Molalidad	$m_i = \frac{C_i}{(1000 \cdot M_i \cdot \left(\frac{10^6 - TDS}{10^6}\right))}$	mol/kg
Coefficiente Osmótico del disolvente	$\phi = 1 - \left(\frac{S}{3,375 \cdot 1}\right) \cdot \left(A - 2 \cdot \ln(A) - \left(\frac{1}{A}\right)\right) + B \cdot I' + C \cdot (I')^2$	-
Fuerza Iónica	$I = \left(\frac{1}{2}\right) \sum (m_i \cdot Z_i^2)$	-
Molalidad correspondiente a electrolito1-1	$I' = \left(\frac{1}{2}\right) \sum m_i$	-
Coefficiente Empírico (S)	$S = 1,17202 \cdot \left(\frac{\sum m_i \cdot Z_i^2}{\sum m_i}\right) \cdot \left(\frac{23375,556}{D \cdot (Temp + 273,15)}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \rho^{\frac{1}{2}}$	-

<b>Densidad (<math>\rho</math>)</b>	$\rho = 1,00157 - 1,56096 * 10^{-4} * Temp - 2,69491 * 10^{-6} * Temp^2$	kg/m <sup>3</sup>
<b>Coefficiente Empírico (A)</b>	$A = 1 + 1,5 * I^{\frac{1}{2}}$	-
<b>Coefficiente Empírico (B)</b>	$B = 16,72817 - \left(\frac{348,662}{Temp + 273,15}\right) - 0,971307 * Ln(Temp + 273,15)$	-
<b>Coefficiente Empírico (C)</b>	$C = \left(\frac{40,5016}{Temp + 273,15}\right) - 0,721404 + 0,103915 * Ln(Temp + 273,15)$	-
<b>Número de membranas (N)</b>	$N = \frac{Q_p}{J * \text{Área}}$	-
<b>Flujo Específico (J)</b>	$J = \frac{Q}{\text{Área}}$	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> *día)
<b>Factor Corrector Temp (f<sub>T</sub>)</b>	$f_T = EXP(2640 * \left(\left(\frac{1}{298}\right) - \left(\frac{1}{T_{em} + 273,15}\right)\right))$ Si $T \geq 25^\circ C$ $f_T = EXP(3020 * \left(\left(\frac{1}{298}\right) - \left(\frac{1}{T_{em} + 273,15}\right)\right))$ Si $T \leq 25^\circ C$	-
<b>Factor Corrector Presión (f<sub>p</sub>)</b>	$f_p = \frac{(P_m - \Delta\pi)_{operación}}{(P_m - \Delta\pi)_{prueba}}$	-
<b>Presión media</b>	$P_m = \frac{J_d}{\text{Área}} + \Delta\pi_{F-R}$	bar
<b>Caudal nominal corregido (Q<sub>d</sub>)</b>	$Q_d = Q_n * f_p * f_T * f_t$	m <sup>3</sup> /s

### 6.2.3 Processing\_Information

En el presente modulo, se calculan las concentraciones totales disueltas para cada composición del agua en función de la temperatura y de la presión de alimentación, lo que supondrá una variación fundamental en los resultados finales obtenidos.

	A	B	C	D	E
1		Cálculos de TDS en el caudal rechazado y permeado.			
2			membrana	Caudal Nominal	
3		Atl	R-440i	25	
4		Ca	E-440i	31	
5		Caribbean	SW30XLE-440i	37.5	
6		Mediterranean	SW30ULE-440i	45.4	
7		Pacific			
8		Persian Gulf			
9		Red Sea			
10					

Figura 32. Descripción de Processing\_Information.

Para ello, partiendo de la molalidad de cada uno de los elementos calculada a partir de la masa molar y la valencia de cada uno de los elementos disueltos en el agua, así como las sales totales disueltas en el agua de alimentación, equivalente a la suma total de cada uno de los elementos, se obtiene la concentración de sales disueltas en el rechazo y en el permeado, de acuerdo con el caudal de alimentación, el factor de reconversión y el porcentaje de paso de sales de la membrana, tal y como se define en el módulo de detailed\_view\_equations, donde se esclarecen las ecuaciones empleadas.

A partir de los parámetros adimensionales calculados, de la salinidad y del caudal nominal de cada membrana, que varía en función de la tipología seleccionada, se calculan las variables mencionadas.

Las siguientes figuras muestran la correlación entre el caudal nominal y el tipo de membrana y los cálculos realizados para cada una de las regiones, respectivamente:

	A	B	C	D	E
1					
2		Región	Tipo de membrana	Caudal Nominal	
3		Atlantic	SW30XHR-440i	25	
4		Canary Island	SW30HRLE-440i	31	
5		Caribbean	SW30XLE-440i	37.5	
6		Mediterranean	SW30ULE-440i	45.4	
7		Pacific			
8		Persian Gulf			
9		Red Sea			
10					

Figura 33. Asociación caudal nominal y tpo de membrana.

A	B	C	D	E	F	G	Rechazo				Permeado				
							SW30XHR-440I	SW30HRL-440I	SW30XLE-440I	SW30ULE-440I	SW30XHR-440I	SW30HRL-440I	SW30XLE-440I	SW30ULE-440I	
DATOS	Canary Island (mg/l)	Masa Molar (g/mol)	Molalidad (mol de soluto/kg de disolvente)	Valencia de ion	Molalidad total										
Amonio(NH4)	0.08	18.04	4.60545E-06	1	4.60545E-06	0.086406423	0.086405123	0.086404649	0.086397757	0.000800803	0.000800644	0.000800586	0.00079972		
Potasio	438	39.0983	0.011634158	1	0.011634158	473.0751636	473.0680473	473.0656752	473.0277214	4.384395455	4.383505913	4.383209399	4.378465173		
Sodio	11080	22.989769	0.500522791	1	0.500522791	11967.28953	11967.10951	11967.0495	11966.08939	110.911191	110.8868894	110.8811875	110.7611728		
Magnesio	1486	24.305	0.063495345	2	0.12699069	602.6847975	602.677315	602.6727095	602.6243574	5.585599689	5.58466437	5.584088651	5.578044673		
Calcio	558	40.078	0.014459286	2	0.028918572	602.6847975	602.677315	602.6727095	602.6243574	5.585599689	5.58466437	5.584088651	5.578044673		
Estroncio	0.12	87.62	1.42232E-06	2	2.84464E-06	0.129609634	0.129607684	0.129607034	0.129596636	0.001201204	0.001200961	0.001200879	0.001199579		
Bario	0	137.327	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Carbonato (CO3)	5.53	60.01	9.57018E-05	2	0.000382807	5.972843961	5.972754113	5.972724164	5.972244976	0.055355495	0.055344264	0.05534052	0.055280622		
Bicarbonato (HC)	158.6	61.0168	0.002699432	1	0.002699432	171.3007328	171.2981559	171.297297	171.2835539	1.587591596	1.587269493	1.587162125	1.585444239		
Nitrato (NO3)	6.1	62.0049	0.00010217	1	0.00010217	6.588489722	6.588390613	6.588357577	6.587828996	0.061061215	0.061048827	0.061044697	0.060978625		
Cloro	20926.32	35.453	0.61299732	1	0.61299732	22602.10561	22601.76562	22601.65228	22599.83896	209.4732016	209.4307019	209.4165354	209.1898706		
Fluor	1.71	18.998403	9.34755E-05	1	9.34755E-05	1.846937283	1.8469095	1.846900239	1.846752063	0.01711716	0.017113687	0.01711253	0.017094008		
Sulfato (SO4)	2400	96.06	0.025947013	2	0.051894026	2592.192677	2592.153684	2592.140686	2591.93272	24.02408468	24.01921048	24.01758575	23.99158999		
Silicato (SiO2)	34	122.06	0.000289284	2	0.000578568	36.7227296	36.72217719	36.72199305	36.71904687	0.3403412	0.340272148	0.340249131	0.339880858		
Boro (H3BO3)	5.299	10.811	0.000509034	3	0.001527102	5.723345416	5.723259321	5.723230623	5.722771451	0.053043177	0.053032415	0.053028828	0.052971431		
rho (temp)	0.998382567					40070.71817	40070.1154	40069.91448	40066.69969	371.3698967	371.2945501	371.2694346	370.8675861		
temp	16														
i	0.91														
TDS	37,100														
S	1.447289981		1.232851038		1.549787467										
I	0.774893734														
I'	0.616425519														
D	81.7617291														
A	2.320420729														
B	0.018017145														
C	0.007546643														
sal	0.899991341														

Figura 34. Cálculos de TDS para Islas Canarias.

A	B	C	D	E	F	Rechazo				Permeado					
						SW30XHR-440I	SW30HRL-440I	SW30XLE-440I	SW30ULE-440I	SW30XHR-440I	SW30HRL-440I	SW30XLE-440I	SW30ULE-440I		
DATOS	Atlantic (mg/l)	Masa Molar (g/mol)	Molalidad (mol de soluto/kg de disolvente)	Valencia de ion	Molalidad total										
Amonio(NH4)	0	18.04	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Potasio	389	39.0983	0.010332619	1	0.010332619	420.1512298	420.1449096	420.1428029	420.109095	3.893903726	3.893113699	3.892850356	3.888636876		
Sodio	10812	22.989769	0.488416283	1	0.488416283	11677.82801	11677.65235	11677.59379	11676.6569	108.2285015	108.2065432	108.1992238	108.0821129		
Magnesio	1302	24.305	0.055633203	2	0.111266406	1406.264528	1406.243373	1406.236322	1406.123501	13.03306594	13.03042169	13.02954027	13.01543757		
Calcio	410	40.078	0.010624207	2	0.021248414	442.8329157	442.8262543	442.8240339	442.7885063	4.104114467	4.10328179	4.103004232	4.09856329		
Estroncio	0	87.62	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Bario	0	137.327	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Carbonato (CO3)	15.138	60.01	0.000261977	2	0.000523954	16.35025531	16.35000936	16.34992738	16.34881563	0.151531914	0.15150117	0.151490922	0.151326954		
Bicarbonato (HC)	143	61.0168	0.002433914	1	0.002433914	154.4514804	154.449157	154.4483825	154.4359912	1.431435046	1.431144624	1.431047817	1.429498904		
Nitrato (NO3)	0	62.0049	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Cloro	19441	35.453	0.569487655	1	0.569487655	20997.84077	20997.5249	20997.41961	20995.735	194.605096	194.5656129	194.5524519	194.3418754		
Fluor	0	18.998403	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Sulfato (SO4)	2713	96.06	0.029330936	2	0.058661872	2930.257806	2930.213727	2930.199034	2929.963945	27.15722573	27.15171585	27.14987922	27.12049319		
Silicato (SiO2)	0	122.06	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Boro (H3BO3)	4.091	10.811	0.000392991	3	0.001178977	4.418608435	4.418541967	4.418519811	4.418165316	0.040951054	0.040942746	0.040939976	0.040895664		
rho (temp)	0.997370116					38050.3956	38049.82322	38049.63243	38046.57973	352.6458254	352.5742777	352.5504284	352.1688408		
temp	20														
i	0.91														
TDS	35,229														
S	1.448080408		1.166913785		1.457608679										
I	0.728804339														
I'	0.583456893														
D	80.24888997														
A	2.280550571														
B	0.021125085														
C	0.00706314														
sal	0.900974127														

Figura 35. Cálculos de TDS para Océano Atlántico.

DATOS	Caribbean (mg/l)	Masa Molar (g/mol)	Molalidad (mol de soluto/kg de disolvente)	Valencia de ion	Molalidad total	Rechazo				Permeado							
						SW30XHR-440i	SW30HRL-440i	SW30XLE-440i	SW30ULE-440i	SW30XHR-440i	SW30HRL-440i	SW30XLE-440i	SW30ULE-440i				
Amonio(NH4)	0	18.04	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Potasio	386	39.0983	0.010252933	1	0.010252933	416.910989	416.9047175	416.902627	416.8691791	3.86387362	3.863089686	3.862828374	3.85864739				
Sodio	11322	22.989769	0.511454787	1	0.511454787	12228.66896	12228.42369	12227.44261	113.3336195	113.3106254	113.3029608	113.1803258					
Magnesio	1160	24.305	0.049565668	2	0.19826272	1252.893127	1252.874281	1252.867998	1252.767481	11.61164093	11.60928507	11.60849978	11.59593516				
Calcio	477	40.078	0.012360358	2	0.049441431	515.1982946	515.1905447	515.1879613	515.1466281	4.774786831	4.773818083	4.773495167	4.768328511				
Estroncio	0	87.62	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Bario	0	137.327	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Carbonato (CO3)	29.394	60.01	0.000508691	2	0.002034763	31.74787982	31.74740224	31.74724305	31.744659599	0.294234977	0.29417528	0.294155381	0.293836998				
Bicarbonato (HC)	137	61.0168	0.002331792	1	0.002331792	147.9709987	147.9687728	147.9680308	147.9561594	1.371374834	1.371096598	1.371003853	1.369519929				
Nitrato (NO3)	0	62.0049	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Cloro	20034	35.453	0.586858479	1	0.586858479	21638.32838	21638.00288	21637.89438	21636.15838	200.5410469	200.5003595	200.486797	200.2697975				
Fluor	0	18.998403	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Sulfato (SO4)	2600	96.06	0.028109264	2	0.112437055	2808.208734	2808.166491	2808.15241	2807.927113	26.02609174	26.02081135	26.01905122	25.99088916				
Silicato (SiO2)	0	122.06	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Boro (H3BO3)	4.725	10.811	0.000453894	3	0.004085048	5.103379334	5.103302565	5.103276975	5.102867542	0.047297417	0.047287821	0.047284622	0.047233443				
rho (temp)	0.995689745					39045.03073	39044.44339	39044.24761	39041.11511	361.8639668	361.7905488	361.7660762	361.3745138				
temp	26																
TDS	36,150																
S	1.440205312		1.201895877		1.477150008												
I	0.738579504																
I'	0.600947939																
D	78.03338509																
A	2.289109725																
B	0.025299648																
C	0.006397595																
sal	0.904310561																

Figura 36. Cálculos de TDS para Mar del Caribe.

DATOS	Mediterranean (mg/l)	Masa Molar (g/mol)	Molalidad (mol de soluto/kg de disolvente)	Valencia de ion	Molalidad total	Rechazo				Permeado			
						SW30XHR-440i	SW30HRL-440i	SW30XLE-440i	SW30ULE-440i	SW30XHR-440i	SW30HRL-440i	SW30XLE-440i	SW30ULE-440i
Amonio(NH4)	0	18.04	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Potasio	481	39.0983	0.012776324	1	0.012776324	519.5186158	519.5108008	519.5081958	519.466516	4.814826972	4.8138501	4.813524477	4.808314494
Sodio	12200	22.989769	0.551117152	1	0.551117152	13176.97944	13176.78123	13176.71515	13175.65799	122.124305	122.0976533	122.0893942	121.9572491
Magnesio	1557	24.305	0.066529107	2	0.266116427	1681.685	1681.659702	1681.65127	1681.516352	15.58562494	15.5824628	15.58140875	15.56454401
Calcio	483	40.078	0.012515834	2	0.050063336	521.6787763	521.6709289	521.6683131	521.6264599	4.834847043	4.833866109	4.833539131	4.828307486
Estroncio	0	87.62	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bario	0	137.327	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbonato (CO3)	18.544	60.01	0.000320921	2	0.001283685	20.02900875	20.02870746	20.02860703	20.02700015	0.185626094	0.185588433	0.185575879	0.185375019
Bicarbonato (HC)	162	61.0168	0.002757302	1	0.002757302	174.9730057	174.9703737	174.9694963	174.9554586	1.621625716	1.621296707	1.621187038	1.619432324
Nitrato (NO3)	0	62.0049	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cloro	22599	35.453	0.661995346	1	0.661995346	24408.7343	24408.36713	24408.24473	24406.28647	226.2167874	226.1708907	226.1555918	225.9108093
Fluor	1.4	18.998403	7.65296E-05	1	7.65296E-05	1.51212395	1.512089649	1.512082067	1.511960753	0.014014049	0.014011206	0.014010258	0.013995094
Sulfato (SO4)	3186	96.06	0.034444659	2	0.137778637	3441.135779	3441.084015	3441.066761	3440.790686	31.89197242	31.88550191	31.88334508	31.84883571
Silicato (SiO2)	1.6	122.06	1.36134E-05	2	5.44534E-05	1.728128452	1.728102456	1.728093791	1.727955147	0.016016056	0.016012807	0.016011724	0.015994393
Boro (H3BO3)	5.249	10.811	0.000504231	3	0.004538078	5.669941402	5.669256119	5.669227692	5.668772853	0.052542675	0.052532015	0.052528461	0.052471607
rho (temp)	0.998856454					43953.64351	43952.98233	43952.76193	43949.23563	407.3563139	407.2736661	407.2461168	406.8053285
temp	14												
I	40,695												
TDS	40,695												
S	1.44263346		1.343051019		1.688557269								
I'	0.844278635												
I''	0.671525509												
D	82.52912405												
A	2.378269541												
B	0.01636068												
C	0.007800938												
sal	0.900564888												

Figura 37. Cálculos de TDS para Mar Mediterráneo.

DATOS	Pacífic (mg/l)	Masa Molar (g/mol)	Molalidad (mol de soluto/kg de disolvente)	Valencia de ion	Molalidad total	Rechazo				Permeado			
						SW30XHR-440i	SW30HRL-440i	SW30XLE-440i	SW30ULE-440i	SW30XHR-440i	SW30HRL-440i	SW30XLE-440i	SW30ULE-440i
Amonio(NH4)	0	18.04	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Potasio	380	39.0983	0.010093561	1	0.010093561	410.4305073	410.4243333	410.4222753	410.3893473	3.803813408	3.803041659	3.80278441	3.798668415
Sodio	10200	22.989769	0.460770078	1	0.460770078	11016.81888	11016.65316	11016.59792	11015.71406	102.1023599	102.0816445	102.0747394	101.9642575
Magnesio	1300	24.305	0.055547745	2	0.222190979	1404.104367	1404.083245	1404.076205	1403.963557	13.01304587	13.01040568	13.00952561	12.99544458
Calcio	440	40.078	0.011401588	2	0.045606352	475.2353242	475.2281754	475.2257924	475.1876653	4.404415526	4.403521921	4.403224053	4.398458165
Estroncio	0	87.62	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bario	0	137.327	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbonato (CO3)	17.647	60.01	0.000305398	2	0.001221591	19.06017674	19.05989002	19.05979445	19.0582653	0.176647093	0.176611253	0.176599307	0.176408162
Bicarbonato (HC)	170	61.0168	0.002893465	1	0.002893465	183.613648	183.6108859	183.6099653	183.5952343	1.701705998	1.701360742	1.701245657	1.699404291
Nitrato (NO3)	0	62.0049	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cloro	18500	35.453	0.541922824	1	0.541922824	19981.48522	19981.18465	19981.08445	19979.48138	185.1856528	185.1480808	185.1355568	184.9351728
Fluor	0	18.998403	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sulfato (SO4)	300	96.06	0.003243377	2	0.012973506	324.0240847	324.0192105	324.0175857	323.99159	3.003010586	3.00240131	3.002198218	2.998948749
Silicato (SiO2)	0	122.06	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Boro (H3BO3)	5.005	10.811	0.000480792	3	0.004327125	5.405801813	5.405720495	5.405693389	5.405259693	0.050100227	0.050090062	0.050086674	0.050032462
rho (temp)	0.997370116					33820.17801	33819.66926	33819.49968	33816.78636	313.4407514	313.377158	313.3559601	313.0167951
temp	20												
i	0.91												
TDS	31.313												
S	1.389018729		1.086658827		1.301999482								
I	0.650999741												
I'	0.543329413												
D	80.24888997												
A	2.210268324												
B	0.021125085												
C	0.00706314												
sal	0.905073442												

Figura 38. Cálculos de TDS para Océano Pacífico.

DATOS	Persian Gulf (mg/l)	Masa Molar (g/mol)	Molalidad (mol de soluto/kg de disolvente)	Valencia de ion	Molalidad total	Rechazo				Permeado			
						SW30XHR-440i	SW30HRL-440i	SW30XLE-440i	SW30ULE-440i	SW30XHR-440i	SW30HRL-440i	SW30XLE-440i	SW30ULE-440i
Amonio(NH4)	0	18.04	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Potasio	530	39.0983	0.014077862	1	0.014077862	572.4425496	572.4339385	572.4310682	572.3851423	5.305318701	5.304242314	5.303883519	5.29814279
Sodio	14099	22.989769	0.636901699	1	0.636901699	15228.0519	15227.82283	15227.74647	15226.52476	141.1314875	141.1028536	141.0933089	140.9405947
Magnesio	1672	24.305	0.071442946	2	0.285771782	1805.894232	1805.867066	1805.858011	1805.713128	16.736779	16.7333833	16.7322514	16.71414103
Calcio	478	40.078	0.012386271	2	0.049545082	516.2783749	516.2706087	516.26802	516.2266001	4.784796866	4.783826087	4.783502494	4.778325007
Estroncio	0	87.62	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bario	0	137.327	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbonato (CO3)	1.603	60.01	2.77414E-05	2	0.000110966	1.731368692	1.731342648	1.731333967	1.731195063	0.016046087	0.016042831	0.016041746	0.016024383
Bicarbonato (HC)	154	61.0168	0.002621139	1	0.002621139	166.3323635	166.3298614	166.3290273	166.3156829	1.541545434	1.541232673	1.541128419	1.539460358
Nitrato (NO3)	0	62.0049	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cloro	24927	35.453	0.730189742	1	0.730189742	26923.1612	26922.7562	26922.6212	26920.46121	249.5201496	249.4695249	249.45265	249.1826515
Fluor	0	18.998403	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sulfato (SO4)	3314	96.06	0.0358285	2	0.1433314	3579.386055	3579.332212	3579.314264	3579.027097	33.17325694	33.16652647	33.16428298	33.12838718
Silicato (SiO2)	0	122.06	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Boro (H3BO3)	5.534	10.811	0.000531609	3	0.004784477	5.977164282	5.977074369	5.977044398	5.976564863	0.055395535	0.055384296	0.05538055	0.055320608
rho (temp)	0.998382567					48799.2552	48798.52113	48798.27644	48794.36138	452.2647756	452.1730164	452.14243	451.6530476
temp	16												
i	0.91												
TDS	45.181												
S	1.429427079		1.504007508		1.867316749								
I	0.933658375												
I'	0.752003754												
D	81.7617291												
A	2.44938999												
B	0.018017145												
C	0.007546643												
sal	0.904660394												

Figura 39. Cálculos de TDS para Golfo Pérsico.

DATOS	Red Sea (mg/l)	Masa Molar (g/mol)	Molalidad (mol de soluto/kg de disolvente)	Valencia de ion	Molalidad total	Rechazo				Permeado					
						SW30XHR-440i	SW30HRE-440i	SW30XLE-440i	SW30ULE-440i	SW30XHR-440i	SW30HRE-440i	SW30XLE-440i	SW30ULE-440i		
Amonio(NH4)	0	18.04	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Potasio	490	39.0983	0.013015382	1	0.013015382	529.2393383	529.2313771	529.2287234	529.1862637	4.90491729	4.90392214	4.903590423	4.898282957		
Sodio	13300	22.989769	0.600808043	1	0.600808043	14365.06775	14364.85166	14364.77963	14363.62716	133.1334693	133.1064581	133.0974543	132.9533945		
Magnesio	1540	24.305	0.065802713	2	0.263210852	1663.323635	1663.298614	1663.290273	1663.156829	15.41545434	15.41232673	15.41128419	15.39460358		
Calcio	500	40.078	0.01295635	2	0.0518254	540.0401411	540.0320175	540.0293096	539.9859833	5.005017643	5.004002183	5.003663697	4.998247915		
Estroncio	0	87.62	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Bario	0	137.327	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Carbonato (CO3)	8.074	60.01	0.000139728	2	0.000558912	8.720568199	8.720437018	8.720393291	8.719693659	0.080821025	0.080804627	0.080799161	0.080711707		
Bicarbonato (HC)	126.8	61.0168	0.002158184	1	0.002158184	136.9541798	136.9521196	136.9514329	136.9404454	1.269272474	1.269014954	1.268929114	1.267555671		
Nitrato (NO3)	0	62.0049	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Cloro	23180	35.453	0.679014652	1	0.679014652	25036.26094	25035.88433	25035.75879	25033.75019	232.0326179	231.9855412	231.969849	231.7187733		
Fluor	0	18.998403	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Sulfato (SO4)	3204	96.06	0.034639262	2	0.138557048	3460.577224	3460.525168	3460.507816	3460.230181	32.07215305	32.06564599	32.06347697	32.02877264		
Silicato (SiO2)	0	122.06	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Boro (H3BO3)	4.955	10.811	0.000475989	3	0.004283897	5.351797799	5.351717293	5.351690458	5.351261095	0.049599725	0.049589662	0.049586307	0.049532637		
rho (temp)	0.998382567					45745.53558	45744.84744	45744.61807	45740.948	423.9633228	423.8773056	423.8486332	423.389875		
temp	16														
i	0.91														
TDS	42,354														
S	1.432744888		1.409010302		1.75343237										
I	0.876716185														
I'	0.704505151														
D	81.7617291														
A	2.404496855														
B	0.018017145														
C	0.007546643														
sal	0.903167857														

Figura 40. Cálculos de TDS para Mar Rojo.

### 6.2.4 Calc\_Window

En dicho módulo, se resumen los cálculos de los principales parámetros que repercuten sobre los resultados obtenidos en el proceso de desalación, filtrando la información presente en el módulo Processing\_Information.

	A	B	C	D	E	F	
		Resumen de cálculos procedentes de "Processing_Information"			Canary Island	Caribbean	Mediterranean P
	rho			0.99838257	0.99838257	0.99838257	
	temp			16	16	16	
	TDS		35229.229	37099.759	36150.119	40694.793	
	S		1.44808041	1.45731032	1.44020531	1.44263346	
	I		0.72880434	0.77489373	0.7385795	0.84427863	
	I'		0.58345689	0.61642552	0.60094794	0.67152551	
	D		80.24889	80.24889	78.0333851	82.529124	
	A		2.28055057	2.32042073	2.28910973	2.37826954	

Figura 41. Descripción de Calc\_Window.

En dicho módulo se asocian los cálculos correspondientes a cada una de las regiones y a las membranas, siendo la fuente de información a la que accederá el software según los datos de entrada, tal y como muestran las siguientes figuras, respectivamente:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2		<b>Parameter</b>	<b>Atlantic</b>	<b>Canary Island</b>	<b>Caribbean</b>	<b>Mediterranean</b>	<b>Pacific</b>	<b>Persian Gulf</b>	<b>Red Sea</b>
3		<b>rho (temp)</b>	0.99838257	0.99838257	0.99838257	0.99838257	0.99838257	0.99838257	0.99838257
4		<b>temp</b>	16	16	16	16	16	16	16
5		<b>TDS</b>	35229.229	37099.759	36150.119	40694.793	31312.652	45181.137	42353.829
6		<b>S</b>	1.44808041	1.45731032	1.44020531	1.44263346	1.38901873	1.42942708	1.43274489
7		<b>I</b>	0.72880434	0.77489373	0.7385795	0.84427863	0.65099974	0.93365837	0.87671618
8		<b>I'</b>	0.58345689	0.61642552	0.60094794	0.67152551	0.54332941	0.75200375	0.70450515
9		<b>D</b>	80.24889	80.24889	78.0333851	82.529124	80.24889	81.7617291	81.7617291
10		<b>A</b>	2.28055057	2.32042073	2.28910973	2.37826954	2.21026832	2.44938999	2.40449686
11		<b>B</b>	0.02112509	0.02112509	0.02529965	0.01636068	0.02112509	0.01801714	0.01801714
12		<b>C</b>	0.00706314	0.00706314	0.0063976	0.00780094	0.00706314	0.00754664	0.00754664
13		<b>sal</b>	0.90097413	0.90093427	0.90431056	0.90056489	0.90507344	0.90466039	0.90316786
14		<b>Mi</b>	1.16691379	1.23285104	1.20189588	1.34305102	1.08665883	1.50400751	1.4090103
15		<b>SW30XHR-440i</b>	38050.3956	40070.7182	39045.0307	43953.6435	33820.178	48799.2552	45745.5356
16		<b>SW30HRLE-440i</b>	38049.8232	40070.1154	39044.4434	43952.9823	33819.6693	48798.5211	45744.8474
17		<b>SW30XLE-440i</b>	38049.6324	40069.9145	39044.2476	43952.7619	33819.4997	48798.2764	45744.6181
18		<b>SW30ULE-440i</b>	38046.5797	40066.6997	39041.1151	43949.2356	33816.7864	48794.3614	45740.948
19									

Figura 42. Resumen de cálculos de Processing\_Information por región.

19							
20							
21							
22		<b>SW30XHR-440i</b>	0.65394934		<b>FILA</b>	15	
23		<b>SW30HRLE-440i</b>	0.79599473		<b>COLUMNA</b>	2	
24		<b>SW30XLE-440i</b>	0.93629356				
25		<b>SW30ULE-440i</b>	1.10004292				
26							
27		<b>SW30XHR-440i</b>	14.00				
28		<b>SW30HRLE-440i</b>	15.00				
29		<b>SW30XLE-440i</b>	16.00				
30		<b>SW30ULE-440i</b>	17.00				
31		<b>Atlantic</b>	2.00				
32		<b>Canary Island</b>	3.00				
33		<b>Caribbean</b>	4.00				
34		<b>Mediterranean</b>	5.00				
35		<b>Pacific</b>	6.00				
36		<b>Persian Gulf</b>	7.00				
37		<b>Red Sea</b>	8.00				
38							

Figura 43. Resumen de cálculos por tipo de membrana y posición de acceso por el software.

### 6.2.5 Software

En dicho módulo, se ejecutarán los cálculos pertinentes en función de los datos introducidos por el usuario.

The screenshot shows a spreadsheet with columns A, B, and C. A yellow text box in column B contains the text: "Cálculos realizados en función de los datos introducidos por el usuario". To the right, a table lists parameters. The first row is a header "Parámetros de entrada" in a dark blue shaded cell. The following rows are: "Tipo de membrana" (SW30HRL), "Caudal de Alimentación" (q\_fee), "Pérdida de carga" (P\_inta), "Presión a la salida" (P\_ou), "Presión a la entrada" (P\_in), and "Rendimiento Hidráulico" (ph).

Parámetros de entrada	
Tipo de membrana	SW30HRL
Caudal de Alimentación	q_fee
Pérdida de carga	P_inta
Presión a la salida	P_ou
Presión a la entrada	P_in
Rendimiento Hidráulico	ph

Figura 44. Descripción de Software.

Dicho módulo se compone de dos partes:

- Parámetros de entrada: datos a introducir, que se diferencian del resto de casillas al no estar sombreadas en ningún color.
- Parámetros de salida: parámetros calculados por el programa.

Datos a introducir	
Datos a calcular	

Figura 45. Leyenda de datos.

	A	B	C	D	E	F
1						
2		<b>Parámetros de entrada</b>				
3		<b>Parámetro</b>	<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Ud</b>	
4		Región	Atlantic	-	-	
5		Tipo de membrana	SW30HRLE-440i	-	-	
6		Caudal de Alimentación	q_feed	8	m <sup>3</sup> /h	
7		Pérdida de carga	P_intake	0.345		
8		Presión a la salida	P_out	0		
9		Presión a la entrada	P_in	50	bar	
10		Rendimiento Hidráulico	$\eta_b$	0.8	-	
11		Temperatura	t	16	°C	
12		Polarización de concentración	CPF	0	%	
13		Área	A	40.9	m <sup>2</sup>	
14		Rendimiento Mecánico	$\eta_{mec}$	0.98	-	
15		Caudal demandado	q_d	480	m <sup>3</sup> /día	
16		Nº Membranas por tubo de presión	N/t	7	-	

Figura 46. Parámetros de entrada.

En cambio, los parámetros de salidas, serán calculados de forma automática por el programa, y serán de interés aquellos que estén sombreados en un color más oscuro, ya que serán los datos de entrada para el estudio económico y el estudio de las medidas de recuperación energética, tal y como podemos ver en la siguiente imagen:

<b>Parámetros de salida</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Ud</b>
Presión Osmótica Alimentación	$\pi_f$	32,69	bar
Incremento de presión	$\Delta P$	65,35	bar
Potencia bomba	P_bomba	<b>18,51</b>	kW
Permeabilidad	L_w	0,57	m/bar*h
Net Driving Pressure	NDP	31,97	bar
Caudal Permeado	q_p	<b>0,75</b>	m <sup>3</sup> /h
Caudal Rechazado	q_r	<b>7,25</b>	m <sup>3</sup> /h
Recovery	R	<b>10,30%</b>	-
Concentración Rechazo	C_r	50228,89	g/kg
TDS	TDS	-3802,58	g/kg
Caudal Nominal	q_n	25,00	m <sup>3</sup> /día
Flujo Específico	J	0,61	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·día)
Factor de corrección de Temperatura	f_T	0,73	-
Presión en la membrana	P_m	32,70	bar
Factor de corrección de Presión	f_P	1,00	-
Factor de corrección de Tiempo de Operación	f_t	0,80	-
Caudal producto	q_pro	<b>14,58</b>	m <sup>3</sup> /h

Figura 47. Parámetros de salida.

## 6.2.6 Results

Dicha pestaña, denominada “Results”, recoge los datos comparativos arrojados por ROSA, así como los obtenidos por el propio software para las mismas condiciones. De esta forma es posible comparar y evaluar la

viabilidad del software, que será descrita en profundidad en apartados posteriores.

En la siguiente ilustración se percibe una previsualización de dicha pestaña de forma general:

SWXHR440-i (50 bar)										
Point	q_feed (m³/h)	q_permeate (m³/h)	Temperature (°C)	Surface (m²)	NDP (bar)	Density (kg/m³)	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	ΔP (bar)	TDS (mg/l)
Persian Gulf	8	0,39	16	40,9	17,16	998,38	50	0,61	49,695	107,42
Canary Island	8	0,6	20	40,9	22,68	997,37	50	0,58	49,71	73,65
Caribbean	8	0,71	26	40,9	22,44	995,69	50	0,56	49,72	87,59
SWXHR440-i (55 bar)										
Point	q_feed (m³/h)	q_permeate (m³/h)	Temperature (°C)	Surface (m²)	NDP (bar)	Density (kg/m³)	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	ΔP (bar)	TDS (mg/l)
Persian Gulf	8	0,49	16	40,9	21,92	998,38	55	0,6	54,7	88,07
Canary Island	8	0,71	20	40,9	27,46	997,37	55	0,58	54,71	64,04
Caribbean	8	0,84	26	40,9	27,17	995,69	55	0,56	54,72	76,67
SWXHR440-i (60 bar)										
Point	q_feed (m³/h)	q_permeate (m³/h)	Temperature (°C)	Surface (m²)	NDP (bar)	Density (kg/m³)	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	ΔP (bar)	TDS (mg/l)
Persian Gulf	8	0,58	16	40,9	26,69	998,38	60	0,6	59,7	75,71
Canary Island	8	0,82	20	40,9	32,24	997,37	60	0,58	59,71	57,35
Caribbean	8	0,96	26	40,9	31,91	995,69	60	0,56	59,72	69,1
SWXHR440-i (65 bar)										
Point	q_feed (m³/h)	q_permeate (m³/h)	Temperature (°C)	Surface (m²)	NDP (bar)	Density (kg/m³)	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	ΔP (bar)	TDS (mg/l)
Persian Gulf	8	0,67	16	40,9	31,47	998,38	65	0,6	64,7	67,16
Canary Island	8	0,92	20	40,9	37,03	997,37	65	0,58	64,71	52,46
Caribbean	8	1,07	26	40,9	36,66	995,69	65	0,56	64,72	63,6

Figura 48. Previsualización de pestaña de "Results".

### 6.2.7 Cálculo del consumo de la bomba de alta presión

Uno de los aspectos más importantes a la hora de solventar los cálculos del proceso de desalación a través del software es el cálculo de la bomba de alta presión, que alimenta cada uno de los tubos. Para calcular dicha potencia, se tendrá en cuenta la siguiente ecuación:

$$P_{Bomba} = \frac{Q * H}{\eta}$$

Donde:

- Q: Caudal de alimentación empleado.
- H: presión medida en mca (al emplear bar como unidad de referencia, se deberá aplicar factor de conversión).
- $\eta$ : Rendimiento de la bomba, compuesto por rendimiento hidráulico (0,8), rendimiento mecánico (0,98) y rendimiento eléctrico (0,95).

De acuerdo a dicha ecuación, bajo las mismas condiciones a través de las cuales se ha aplicado el análisis comparativo de las membranas, los resultados obtenidos han sido:

Tabla 38. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXHR440-i (Presión de alimentación = 50 bar)

<b>SWXHR440-i (50 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	50	1,10	15,30
Canary Island	8	20	997,37	50	0,90	15,24
Caribbean	8	26	995,69	50	0,73	15,21

Tabla 39. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXHR440-i (Presión de alimentación = 55 bar)

<b>SWXHR440-i (55 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	55	1,10	16,79
Canary Island	8	20	997,37	55	0,92	16,74
Caribbean	8	26	995,69	55	0,74	16,71

Tabla 40. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXHR440-i (Presión de alimentación = 60 bar)

<b>SWXHR440-i (60 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	60	1,13	18,29
Canary Island	8	20	997,37	60	0,94	18,24
Caribbean	8	26	995,69	60	0,76	18,20

Tabla 41. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXHR440-i (Presión de alimentación = 65 bar)

<b>SWXHR440-i (65 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	65	1,15	19,79
Canary Island	8	20	997,37	65	0,96	19,74
Caribbean	8	26	995,69	65	0,79	19,70

Tabla 42. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWHRLE440-i (Presión de alimentación = 50 bar)

<b>SWHRLE440-i (50 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	50	0,89	15,36
Canary Island	8	20	997,37	50	0,72	15,30
Caribbean	8	26	995,69	50	0,60	15,25

Tabla 43. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWHRLE440-i (Presión de alimentación = 55 bar)

<b>SWHRLE440-i (55 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	55	0,90	16,85
Canary Island	8	20	997,37	55	0,74	16,80
Caribbean	8	26	995,69	55	0,62	16,74

Tabla 44. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWHRLE440-i (Presión de alimentación = 60 bar)

<b>SWHRLE440-i (60 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	60	0,93	18,35
Canary Island	8	20	997,37	60	0,77	18,30
Caribbean	8	26	995,69	60	0,62	18,24

Tabla 45. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWHRLE440-i (Presión de alimentación = 65 bar)

<b>SWHRLE440-i (65 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	$\Delta P_{loss}$ (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	65	0,94	19,85
Canary Island	8	20	997,37	65	0,78	19,79
Caribbean	8	26	995,69	65	0,64	19,74

Tabla 46. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXLE440-i (Presión de alimentación = 50 bar)

<b>SWXLE440-i (50 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	50	0,74	15,25
Canary Island	8	20	997,37	50	0,61	15,21
Caribbean	8	26	995,69	50	0,51	15,18

Tabla 47. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXLE440-i (Presión de alimentación = 55 bar)

<b>SWXLE440-i (55 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	55	0,76	16,75
Canary Island	8	20	997,37	55	0,63	16,71
Caribbean	8	26	995,69	55	0,52	16,68

Tabla 48. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXLE440-i (Presión de alimentación = 60 bar)

<b>SWXLE440-i (60 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	60	0,78	18,25
Canary Island	8	20	997,37	60	0,64	18,21
Caribbean	8	26	995,69	60	0,54	18,18

Tabla 49. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWXLE440-i (Presión de alimentación = 65 bar)

<b>SWXLE440-i (65 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	65	0,80	19,75
Canary Island	8	20	997,37	65	0,66	19,70
Caribbean	8	26	995,69	65	0,56	19,67

Tabla 50. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWULE440-i (Presión de alimentación = 50 bar)

<b>SWULE440-i (50 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	50	0,62	15,21
Canary Island	8	20	997,37	50	0,52	15,18
Caribbean	8	26	995,69	50	0,43	15,16

Tabla 51. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWULE440-i (Presión de alimentación = 55 bar)

<b>SWULE440-i (55 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	55	0,64	16,71
Canary Island	8	20	997,37	55	0,53	16,68
Caribbean	8	26	995,69	55	0,44	16,65

Tabla 52. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWULE440-i (Presión de alimentación = 60 bar)

<b>SWULE440-i (60 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	60	0,66	18,21
Canary Island	8	20	997,37	60	0,54	18,18
Caribbean	8	26	995,69	60	0,46	18,15

Tabla 53. Cálculo de Bomba de Alta presión para SWULE440-i (Presión de alimentación = 65 bar)

<b>SWULE440-i (65 bar)</b>						
Point	q_feed (m <sup>3</sup> /h)	Temperature (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	P_feed (bar)	ΔP_loss (bar)	P_Bomba kW (Software)
Persian Gulf	8	16	998,38	65	0,69	19,71
Canary Island	8	20	997,37	65	0,56	19,67
Caribbean	8	26	995,69	65	0,48	19,65

Tal y como se muestran en dichos resultados, se percibe una disminución de la potencia requerida por la bomba de alta presión en base a las características de la membrana. Es decir, para XHR, la potencia requerida ante una presión de alimentación constante, es mayor que para una membrana ULE. Esto se debe, en parte, a la variación de la permeabilidad al paso del agua. De forma similar, y en base a la permeabilidad de igual modo, es notable una variación de potencia vinculada a la composición de agua. Cuanto menor sea el contenido en sales menor será la necesidad de potencia requerida.

A continuación, se llevará a cabo una comparativa con los resultados proporcionados por el software ROSA.

### 6.2.8 Comparación del modelo con el software ROSA

En base a los resultados proporcionados, de forma gráfica para cada membrana y por presión de alimentación la comparativa de dichos resultados se muestra a continuación:

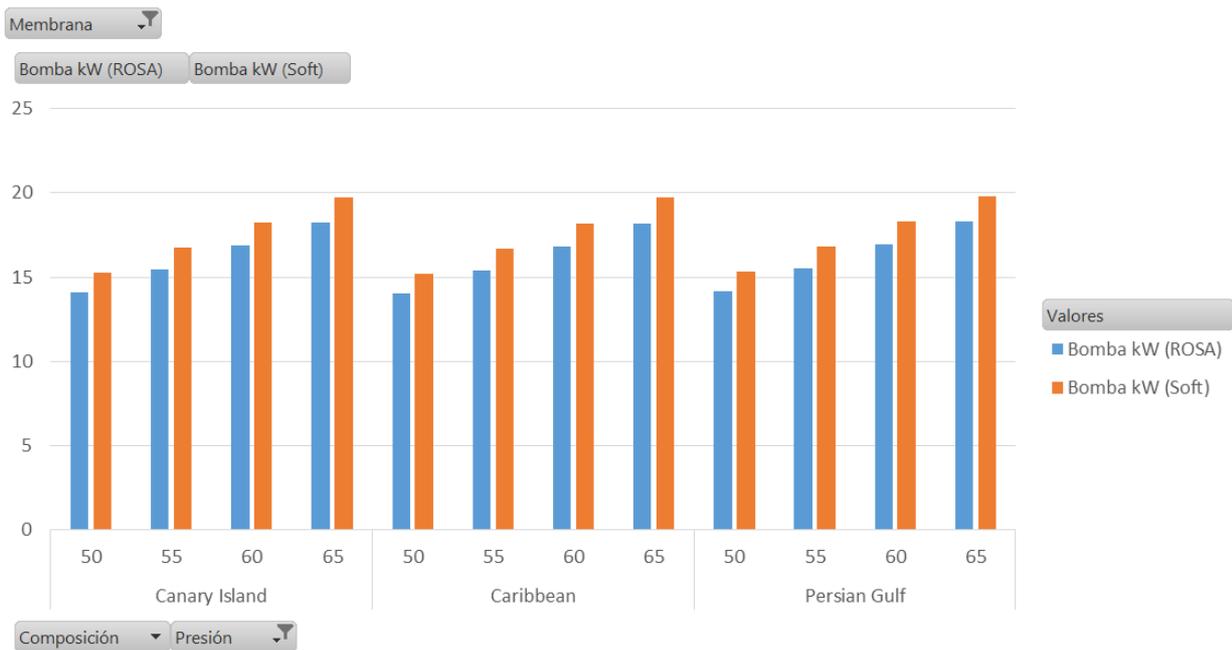


Figura 49. Comparativa para membrana SWXHR440-i.

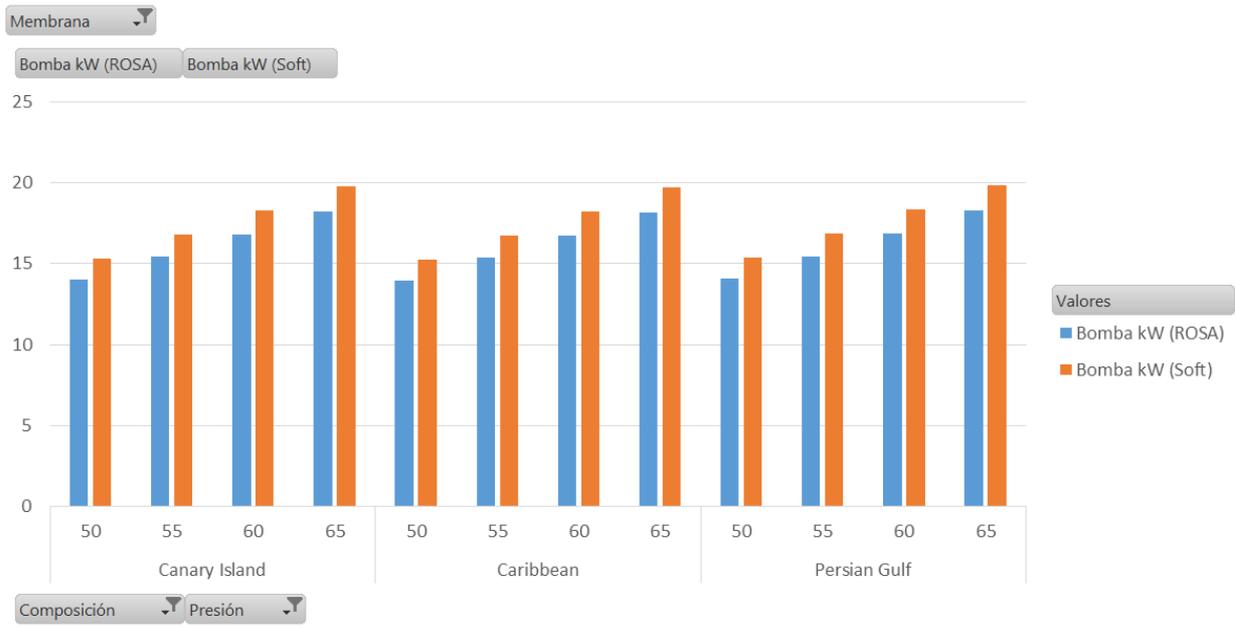


Figura 50. Comparativa para membrana SWHRLE440-i.

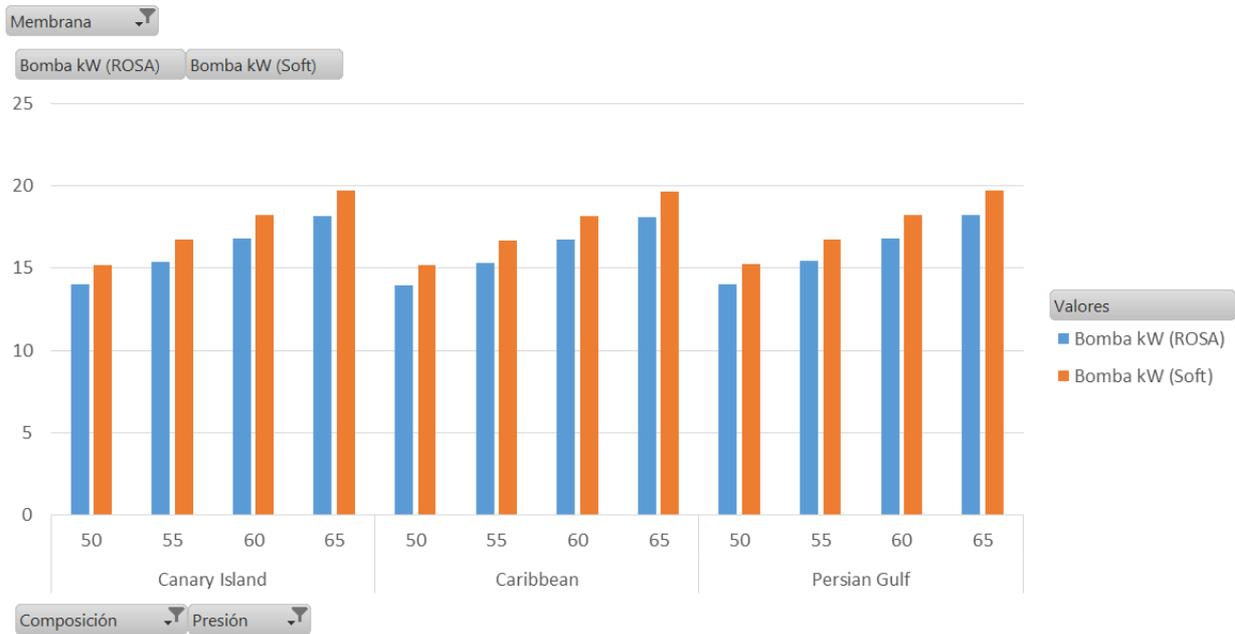


Figura 51. Comparativa para membrana SWXLE440-i.

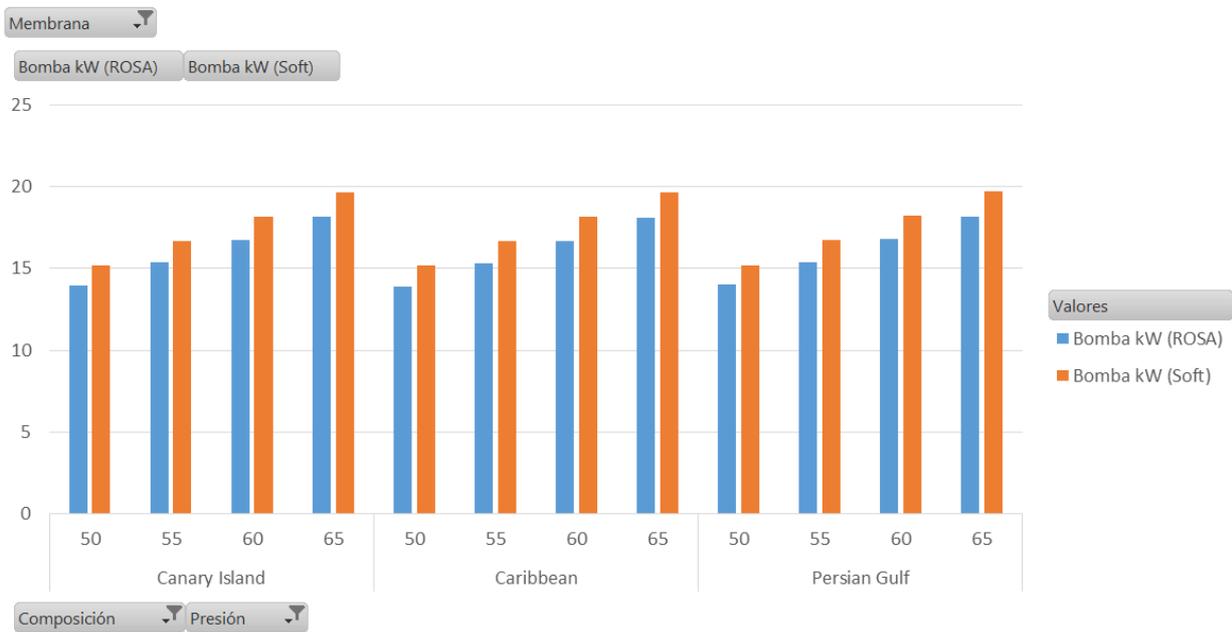


Figura 52. Comparativa para membrana SWULE440-i.

La desviación total obtenida entre ambas metodologías equivale a una variación porcentual de **7,91%**. Al ser inferior al 10% establecido como umbral de aceptación, se consideran válidos los resultados obtenidos.

## 7 CONCLUSIONES Y FUTUROS PASOS

---

Tal y como se ha descrito durante el desarrollo del proyecto, dicho software proporciona las siguientes ventajas:

- Permite conocer de forma detallada la interacción de las distintas variables que definen cada uno de los procesos termodinámicos de la desalación.
- Proporciona una visión preliminar del efecto originado por cada una de las membranas a nivel comercial, habiéndose seleccionado en este caso las de Dow Solutions.
- Al ser de desarrollo sencillo, permite su ampliación de forma indefinida, integrando nuevas composiciones así como diferentes membranas pertenecientes a otros fabricantes.
- Al estar basado en Office, no requiere instalar ningún sistema adicional, por lo que es fácil y ágil a la hora de comenzar a utilizarse.
- Se ha desarrollado de forma intuitiva, con el objetivo de cada una de las pestañas siga una evolución lógica de flujo de trabado.

En base a dichas ventajas, la desviación generada respecto al software ROSA es de tan sólo un 7,91%, considerándose múltiples afectos en el rendimiento de la bomba.

Respecto a los futuros pasos, la integración de la tecnología en la industria y en el sector energético abre una ventana bastante ambiciosa para unir ambos campos de conocimiento. Uno de los primeros pasos a seguir sería, desde este punto de vista, trasladar el software a un entorno web de acceso global que leyera la información necesaria desde un servidor con el objetivo de centralizar el flujo de datos.

Una vez llevada a cabo esa tarea, dicho software podría constituir un producto mínimo viable enfocado a la determinación de setpoints dentro de una planta de desalación que, conectado con un SCADA, indique a los operadores la diferencia entre el caso ideal y el caso real. Adicionalmente, tras aplicar dichos pasos, podrían incluirse modelos predictivos que optimizasen tanto el diseño como el funcionamiento de la planta desde el punto de vista económico mediante técnicas de inteligencia artificial que pudieran predecir ciertos comportamientos a partir de datos históricos de operación.

## REFERENCIAS

---

- [1] F. R. Ruiz, Desalación de agua de mar en planta termosolar de cilindroparabólico de 50 MW, Sevilla: Universidad de Sevilla.
- [2] Q. Nova, «Scielo,» 2009. [En línea]. Available: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422009000200037](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422009000200037). [Último acceso: 16 Abril 2017].
- [3] D. Solutions. [En línea]. Available: <http://www.dow.com/en-us/water-and-process-solutions>.
- [4] Autor, «Este es el ejemplo de una cita,» *Tesis Doctoral*, vol. 2, nº 13, 2012.
- [5] O. Autor, «Otra cita distinta,» *revista*, p. 12, 2001.





# ÍNDICE DE CONCEPTOS

---

*No se encuentran entradas de índice.*



# GLOSARIO

---

**No se encontraron elementos de tabla de autoridades.**

*No se encuentran entradas de índice.*