

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Industrial

Desarrollo de herramientas en VBA para el diseño y diagnóstico de plantas de desalación.

Autor: Jesús Enrique Morán Marín

Tutores: Dra. Lourdes García Rodríguez

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

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

Desarrollo de herramientas en VBA para el diseño de plantas innovadoras.

Autor:
Jesús Enrique Morán Marín

Tutores: Dra. Lourdes García Rodríguez, Catedrática de Universidad

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Máster: Desarrollo de herramientas en VBA para el diseño de plantas innovadoras.

Autor: Jesús Enrique Morán Marín

Tutores: Dra. Lourdes García Rodríguez, Catedrática de
Universidad

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia, amigos y a Triana.

Agradecimientos

Quiero dedicar estas líneas a todas y cada una de las personas que me rodean en mi día a día, desde mi familia hasta mis amigos y compañeros de cada una de las clases por las que he pasado, así como especialmente a tantos profesores y profesoras que durante años se han sucedido en la tarea de completar mi formación, desde el primero hasta el último, a todos ellos le doy las gracias.

Resumen

El rápido crecimiento de la población, los cambios climáticos y demográficos que se vienen experimentando en los últimos años o la mayor demanda de servicios por la sociedad moderna son solo algunos de los motivos por los que la preocupación por el abastecimiento de agua dulce va en aumento.

La industria de la desalación juega un papel fundamental en esta nueva realidad, dicha industria está sufriendo una auténtica revolución desde hace unas décadas, el desarrollo de nuevos sistemas de recuperación de energía, cambios legislativos o nuevas configuraciones son algunas de las razones del cambio, y es la necesidad de mejorar los procesos de simulación, dotando a estas herramientas de la mayor flexibilidad posible la justificación de este documento.

En este trabajo se desarrollan múltiples softwares que permiten por un lado caracterizar la membrana en cuestión, y por otro simular una planta real, obteniéndose los consumos energéticos de cada una de las partes y las propiedades termodinámicas de los flujos implicados en el proceso.

Abstract

There are some reasons why the concern for the supply of drinking water is increasing: the population growth; the climate and demographic changes that have happened during the last years and the increased demand for services by modern societies.

In this new reality, desalination industry plays a fundamental role. During the last decades, this industry has suffered a real revolution because of different reasons such as: the development of new energy recovery device; legislative changes and new configurations.

The justification of this document is the need to improve the simulation processes, providing these new tools with the maximum possible flexibility. In this work, we have developed a multiple software that allow to characterize the membrane in question and, on the other hand, to simulate a real plant. Using this new software, we are able to obtain the energy consumption of each of the parts and the thermodynamic characteristics of the fluids involved in the process.

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract.....	13
Índice	15
Índice de Tablas.....	17
Índice de Figuras	19
Notación.....	21
1 Contexto actual y objetivo	23
2 Conceptos previos.....	27
3 Configuraciones antiguas	33
3.1 Configuración estándar.....	35
3.2 Configuración Lanzarote IV	36
4 Modernización de plantas.....	37
4.1 Retrofit configuración estándar	38
4.1.1 Alternativas a la configuración estándar	38
4.1.2 Estudio termo-económico alternativas planteadas	41
4.2 Retrofit Lanzarote IV.....	45
4.2.1 Plan estratégico para Canarias.....	45
4.2.2 Configuraciones propuestas para Lanzarote IV.....	47
4.3 Reconfiguración de los trenes y tamaño del modulo.....	49
4.4 Optimización de la localización del Split-Partial en el segundo paso.....	53
4.5 Split Partial en paso único.....	60
5 Método de cálculo de permeabilidades	65
6 Herramienta para cálculo de permeabilidades.....	69
6.1 Guía de uso del software para cálculo de permeabilidades	69
6.2 Ejemplo de aplicación	72
7 Herramienta de uso industrial para cálculo de permeabilidades	87
7.1 Método de cálculo del software de uso industrial para cálculo de permeabilidades.....	88
7.2 Guía de uso del software de uso industrial para cálculo de permeabilidades	90
7.3 Ejemplo de aplicación del software de uso industrial	92
8 Software de simulación	95
8.1 Método de cálculo de la simulación.....	97
8.2 Guía de uso del software de simulación de plantas.....	99
8.3 Ejemplo de aplicación del software de simulación	102
9 Análisis de sensibilidad	109
9.1 Influencia de la salinidad	109
9.2 Influencia de la temperatura	110
9.3 Influencia de la presión de operación	111
9.4 Influencia permeabilidades.....	111
9.5 Influencia número de elementos	113
10 Trabajos futuros	115
11 Conclusiones.....	117
Anexo I. Cálculo de Propiedades termodinámicas.....	121
Referencias	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de las configuraciones propuestas [15].	40
Tabla 2. Comparación termo-económica de las distintas configuraciones propuestas [17].	41
Tabla 3. Comparación con la propuesta por Peñate y García-Rodríguez en Lanzarote IV [19].	47
Tabla 4. Membranas empleadas en las configuraciones propuestas [20].	50
Tabla 5. Variaciones y combinaciones bajo estudio [20].	50
Tabla 6. Comparación de propuestas de retrofit de Lanzarote IV [20].	52
Tabla 7. Características de las configuraciones propuestas con un producto [21].	56
Tabla 8. Características de las configuraciones propuestas con dos productos [21].	57
Tabla 9. Características de las configuraciones propuestas con tres productos [21].	59
Tabla 10. Presión osmótica en función de SPP	61
Tabla 11. Composición del agua de las Islas Canarias. (Instituto Tecnológico de Canarias).	72
Tabla 12. Casos de estudio para validar método de cálculo.	72
Tabla 13 Resultados de ROSA caso 1 y membrana SW30ZHR 440i.	73
Tabla 14. Característica membrana propuestas en BIBLIOGRAFIA para SW30HRLE 440i.	74
Tabla 15. Resultados obtenidos tras primera iteración.	74
Tabla 16. Resultado de cada una de las iteraciones, caso 1.	74
Tabla 17. Diferencia entre x_i e y_i en cada iteración, caso 1.	75
Tabla 18. Resultado de cada una de las iteraciones, casos 1,2 y 3.	75
Tabla 19. Resultado de cada una de las iteraciones, casos 1, 2 y 3, SW30XLE-440i.	79
Tabla 20. Resultado de cada una de las iteraciones, casos 1,2 y 3, SW30ULE-440i.	82
Tabla 21. Datos obtenidos en industria.	92
Tabla 22. Valores de diseño en escenario 1, software de simulación.	102
Tabla 23. Valores de ROSA, escenario software simulación.	102
Tabla 24. Valores del software de aplicación, escenario de uso.	103
Tabla 25. Comparación del caudal permeado.	103
Tabla 26. Comparación de la concentración en el caudal permeado.	103
Tabla 27. Comparación resultados escenario 1, software simulación.	104
Tabla 28. . Valores de diseño en escenario 2, software de simulación.	105
Tabla 29. Solución ROSA, escenario 2 software de simulación.	106
Tabla 30. Solución aplicación, escenario 2 software de simulación.	107
Tabla 31. Comparación resultados escenario 2, software simulación.	107
Tabla 32. Comparación dispositivos ERD.	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Salinidad en los océanos [2].	23
Figura 2. Estado actual de la industria de la desalación [5].	25
Figura 3. Publicaciones relativas a desalación por categorías [5].	26
Figura 4: Influencia de concentración y temperatura en la presión osmótica.	28
Figura 5. Diseño sistema R.O. [10].	29
Figura 6. Desglose de costes para producir agua en la planta de SADARA [12].	33
Figura 7. Configuraciones obsoletas de configuraciones de plantas de ósmosis inversa [14]	34
Figura 8. Configuración obsoleta de planta de desalación por ósmosis inversa [15].	35
Figura 9. Configuración de los 4 primeros trenes de Lanzarote IV [16]	36
Figura 10. Configuración del quinto tren de Lanzarote IV [16].	36
Figura 11. Retrofit N.1 [15].	38
Figura 12. Retrofit N.2 [15].	38
Figura 13. Retrofit N.3 [15].	39
Figura 14. Retrofit N.4 [15].	39
Figura 15. Configuraciones de retrofit propuestas [17].	41
Figura 16. Costes de cada fluido en cada una de las configuraciones propuestas [17].	42
Figura 17. SEC y rendimiento exergético en las configuraciones propuestas [17].	42
Figura 18. Coste del producto en cada una de las configuraciones propuestas [17].	43
Figura 19 Influencia del rendimiento de alta presión [17].	43
Figura 20. Influencia de la salinidad y coste de la electricidad [17].	44
Figura 21. Propuesta para los trenes 1-4 en Lanzarote IV según Peñate y García-Rodríguez [19].	47
Figura 22. Propuesta de configuración para el tren 5 en Lanzarote IV según Peñate y García-Rodríguez. [19].	48
Figura 23. Configuración existente en los trenes 1-4 Lanzarote IV .	49
Figura 24. Disposición propuesta de Lanzarote IV [20].	49
Figura 25. Configuración propuesta de Lanzarote IX [20]	50
Figura 26. Desglose de precios para las configuraciones propuestas 1/2 [20].	51
Figura 27. Desglose de precios para las configuraciones propuestas 2/2 [20].	51
Figura 28. Funcionamiento de FCV [21].	53
Figura 29. Aumento de la concentración en el permeado del segundo paso [22].	53
Figura 30. Evolución del caudal de permeado en el segundo paso [22].	54
Figura 31. Posible configuración con un producto final [21].	55
Figura 32. Desglose de costes en función de las membranas y configuración adoptada [21].	56
Figura 33. Posible configuración con dos productos finales [21].	57
Figura 34. Posible configuración con tres productos finales [21].	58
Figura 35. Configuración Partial two pass [23].	60
Figura 36. Configuración SPSP [23].	60
Figura 37. Configuración SSP [23].	60
Figura 38. Configuración inversa propuesta para SPP RO [23].	61
Figura 39. Influencia en la presión osmótica y flujo en función de la posición del SP [23].	62
Figura 40. Comparación del consumo de la tecnología SPP en función de SSP [23].	62
Figura 41. Desglose precios de distintas configuraciones [23].	63
Figura 42. Estrategia de cálculo de L_w .	66
Figura 43. Estrategia de cálculo de L_s .	66
Figura 44. Aspecto de software de cálculo de permeabilidades.	70
Figura 45 Caudal de permeado para la membrana bajo los casos de estudio.	73
Figura 46. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 1, SW30XHR-440i.	76
Figura 47. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 2, SW30XHR-440i.	76

Figura 48. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 3, SW30XHR-440i.....	77
Figura 49. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 1, SW30XHR-440i.....	77
Figura 50. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 2, SW30XHR-440i.....	78
Figura 51. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 3, SW30XHR-440i.....	78
Figura 52. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 1, SW30XLE-440i.....	79
Figura 53. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 2, SW30XLE-440i.....	80
Figura 54. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 3, SW30XLE-440i.....	80
Figura 55. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 1, SW30XLE-440i.....	81
Figura 56. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 2, SW30XLE-440i.....	81
Figura 57. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 3, SW30XLE-440i.....	82
Figura 58. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 1, SW30ULE -440i.....	83
Figura 59. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 2, SW30ULE -440i.....	83
Figura 60. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 3, SW30ULE -440i.....	84
Figura 61. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 1, SW30ULE -440i.....	84
Figura 62. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 2, SW30ULE -440i.....	85
Figura 63. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 3, SW30ULE -440i.....	85
Figura 64. Estrategia de cálculo de permeabilidad en software de uso industrial.....	88
Figura 65. Estrategia de cálculo de permeabilidad en software de uso industrial.....	89
Figura 66. Aspecto del software de uso industrial para cálculo de permeabilidades.....	90
Figura 67. Resultados de permeabilidad en cada iteración.....	92
Figura 68. Valores de permeabilidad en elementos.....	93
Figura 69. Valores de concentración del permeado en elementos.....	93
Figura 70. Estrategia de cálculo software de simulación.....	97
Figura 71. Aspecto del software de simulación.....	99
Figura 72. Información a rellenar software simulación.....	100
Figura 73. Solución obtenida en software de simulación.....	101
Figura 74. Comparación de resultados, escenario 1.....	104
Figura 75. Representación caudal permeado escenario 2, software simulación.....	108
Figura 76. Influencia en el consumo específico de la salinidad.....	109
Figura 77. Influencia en el consumo específico de la temperatura.....	110
Figura 78. Influencia en el consumo específico de la presión de operación.....	111
Figura 79. Influencia en el consumo específico de permeabilidad al agua.....	111
Figura 80. Influencia en el consumo específico de permeabilidad a las sales.....	112
Figura 81. Influencia en el consumo específico del número de elementos.....	113

Notación

OMS	Organización Mundial de la Salud
ERD	Energy Recovery Device
Sw	Agua de mar
SEC	Consumo específico de energía [kW m^{-3}]
RO	Reverse Osmosis
μ	Potencial Químico
ϕ	Coefficiente osmótico
Π	Presión osmótica [bar]
P	Presión estática [bar]
R	Constante de los gases [$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$]
ρ	Densidad [kg/m^3]
T	Temperatura [K o $^{\circ}\text{C}$]
W	Potencia [kW] o Densidad de potencia por unidad de área [W m^{-2}]
S	Concentración másica [kg/kg]
M_i	Masa molar del componente i
b	Molalidad [n kg^{-1}]
TFC	Compuestos de película delgada
M	Molaridad [M]
NDP	Net driving pressure
PV	Pressure Vessel
$q_{v,w}$	Caudal permeado de agua [L h^{-1}]
L_w	Permeabilidad de la membrana al disolvente [$\text{L m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{bar}^{-1}$]
A	Área [m^2]
$q_{v,P}$	Caudal permeado medio [L h^{-1}]
P_{F-BD}	Presión media caudal alimentación [bar]
P_F	Presión entrada caudal alimentación [bar]
A_1	Constante ec. Pérdida de carga
B_1	Constante ec. Pérdida de carga
C_{F-BD}	Concentración media caudal de alimentación [mg Nm^{-3}]
r_v	Recuperación
C_{BD}	Concentración salida caudal de alimentación [mg Nm^{-3}]
CPF	Polarización membrana
a_{CPF1}	Constante cálculo CPF
a_{CPF1}	Constante cálculo CPF
q_s	Caudal másico de sales [mg h^{-1}]
L_s	Permeabilidad de la membrana al soluto [$\text{L m}^{-2} \text{h}^{-1}$]

C_p	Concentración caudal permeado [mg Nm^{-3}]
ε	Eficiencia
P_{brine}	Presión de entrada del caudal salino [bar]
q_f	Caudal alimentación agua de mar a ERD [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
$P_{\text{W,ERD}}$	Consumo i-Save [W]
PV	Pressure Vessel
SP	Split Partial
SPSP	Split Partial Second Pass
FCV	Flow Control Valve
TDS	Total de sales disueltas
x_i	Valores ROSA
y_i	Valores calculados
n	Número de pares de valores
Q_f	Caudal de alimentación [m^3]

1 CONTEXTO ACTUAL Y OBJETIVO

*“Reflexiona y delibera antes de efectuar un movimiento”
Sun-Tzu*

El aumento exponencial de la población en el último siglo, la mayor demanda de servicios, la mala distribución o la falta de infraestructura, son algunos de los motivos que explican la falta de acceso a determinados recursos naturales de primera necesidad por parte de la población mundial, dentro de estos recursos de primera necesidad se puede destacar el agua desalada, y es que un 40% de la población mundial sufre escasez de agua [1]. Además del uso directo por parte de la población, esta se utiliza de forma intensiva en la industrial, la agricultura o la ganadería.

En la Tierra, el agua dulce corresponde a algo menos del 2% del agua total y además esta se encuentra gravemente concentrada en pequeñas zonas. El resto del agua se encuentra en los diversos océanos y mares que cubren la superficie terrestre, cabe destacar que los diez países más poblados del mundo cuentan con acceso a algún océano o mar, al igual que los diez países más industrializados, lo cual revela el potencial para estas economías que tendría un aprovechamiento eficiente de este recurso.

El parámetro principal del agua de mar es la salinidad, esta no es uniforme ni constante en los distintos océanos que bañan cada uno de los continentes, lo cual tiene un efecto directo sobre el proceso de desalación, pese a ello las variaciones son muy pequeñas y la distribución prácticamente homogénea como se observa en la Figura 1, donde se representa la concentración en gramos de NaCl por kg de agua.

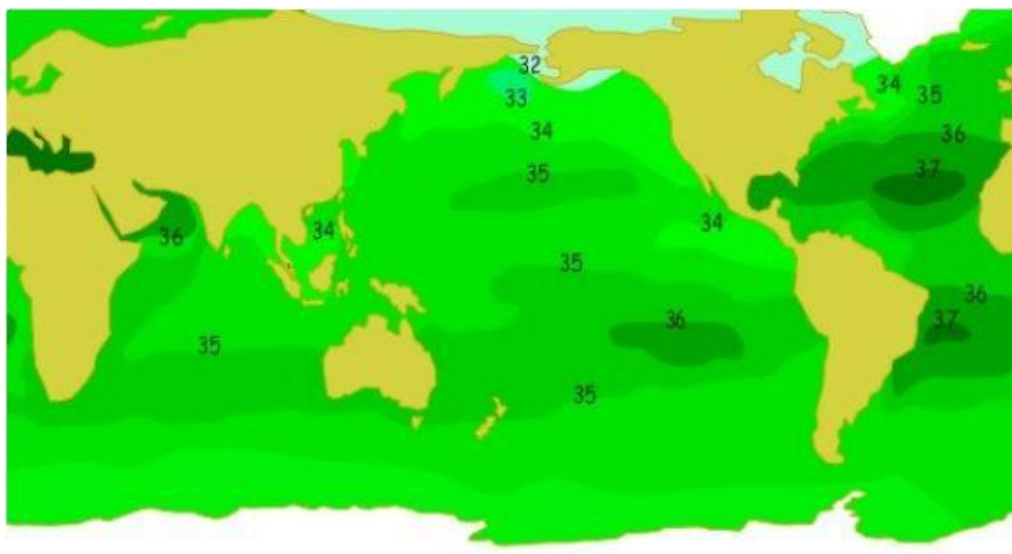


Figura 1. Salinidad en los océanos [2].

Por lo extensamente distribuido que se encuentra este recurso, la desalación de agua de mar siempre ha sido una propuesta de estudio para aquellas regiones con escasez de agua dulce. Esta tecnología cobra especial importancia en pequeñas islas o archipiélagos como las Islas Canarias, donde gran parte del agua que se consume proviene de plantas desaladoras. Sin embargo, la desalación implica un gran consumo energético por lo que las técnicas de ahorro y eficiencia juegan un papel crucial en esta industria.

La configuración y tecnologías empleadas en este tipo de plantas ha sido relativamente homogéneo hasta principios de este siglo, protagonizados por la necesidad de cumplir con los requisitos de partículas sólidas disueltas y en especial, por la obligatoriedad de cumplir la legislación relacionado con el Boro, parámetro del que se requería una baja concentración para poder cumplir con las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Otra de las características propias de las plantas construidas en el siglo anterior era el uso generalizado de las turbinas Pelton [3], con eficiencias típicas entre 70 y 80 %, mediante las cuales se reducía la potencia requerida en la bomba de alta presión.

Sin embargo, en los últimos años nuevos estudios han llevado a la OMS a rebajar las exigencias en cuanto a la concentración de Boro [4], a lo que se une un profundo desarrollo en el diseño de las membranas, lo cual ha revolucionado la forma de construir nuevas plantas, siendo ahora innecesario en la mayor parte del planeta que el permeado obtenido como producto tenga que ser introducido de nuevo en un segundo proceso de desalación para mejorar la calidad de este.

Además, el desarrollo de nuevos equipos sustitutivos de las turbinas Pelton, conocidos como ERD (Energy Recovery Device), han logrado porcentajes de recuperación energética mucho mayores a las ya existentes, por todo ello, las nuevas plantas que se construyen hoy día poco tienen que ver con las que se construían solo unas décadas atrás.

Este rápido proceso de evolución y cambio de tecnología no solo afecta a las nuevas plantas que se construyen, las plantas ya construidas tratan de reducir de forma constante su consumo energético, por lo que la modernización de estas plantas, lo cual se conoce como "Retrofit", es una realidad que ha golpeado de lleno la industria de la desalación en los últimos años.

El empuje de la sociedad moderna por reducir la dependencia de fuentes energéticas fósiles y la toma de conciencia en temas transversales como el ahorro o la eficiencia energética no es ajeno a esta industria.

Y es en el enfoque de la eficiencia donde se centra este trabajo, dentro de la industria no existe actualmente ninguna tecnología de recuperación energética que predomine de forma absoluta, ni una configuración generalizada que aplicar a las nuevas plantas en construcción o a las ya construidas que abordan un proceso de retrofit, es decir, un proceso de modernización. Este proceso puede afrontarse desde dos perspectivas diferentes:

- Reducir el consumo energético produciendo el mismo caudal de agua desalada.
- Aumentar la cantidad de caudal producido con el mismo consumo energético.

A priori, la primera solución parece más sencilla de abordar, al no requerir ingeniería civil ante la posible necesidad de aumentar el diámetro de las tuberías o instalaciones tanto dentro de la planta como fuera de ella.

Sin embargo, el aumento de agua consumida por las grandes urbes o nuevas necesidades industriales requiere de una mayor capacidad de producción, por lo que se presenta un problema dual entre reducir el consumo de las plantas existente y proyectar nuevas instalaciones, o aumentar la capacidad nominal de producción de las plantas existentes.

Este trabajo por tanto, se abordará desde la perspectiva del ahorro energético, donde se buscará de manera constante aquella configuración que reduzca el coste de caudal producido.

Para ello, se evaluará la energía necesaria para producir un determinado caudal buscando la minimización de esta relación, lo que se denomina el consumo específico (SEC, Specific Energy Consumption).

Este trabajo se centra en el proceso en el cual el agua de mar atraviesa la membrana semipermeable para producir un caudal con baja concentración de sales, obviando los procesos de pre-tratamiento y post-tratamiento, ya que estos son semejantes para cualquier tipo de configuración propuesta.

La situación actual de la industria de la desalación es de expectación y optimismo ante los grandes cambios experimentados en los últimos años, en la siguiente Figura se observan todas las plantas desaladoras existentes en 2019.

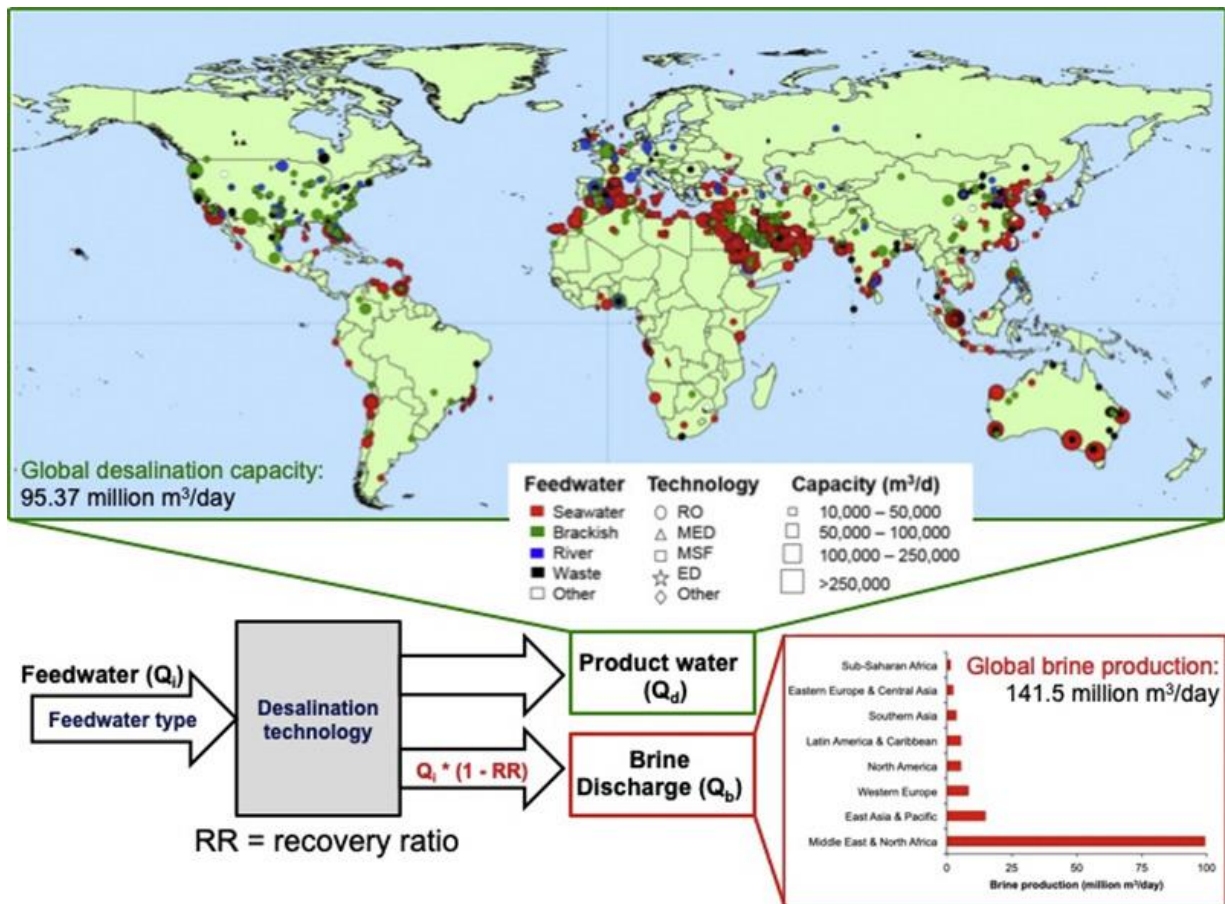


Figura 2. Estado actual de la industria de la desalación [5].

Como se puede apreciar en la anterior imagen, la capacidad nominal de producción mundial de agua desalada es de 95,37 Mm³/día, estando concentrada el 48 % de dicha producción en la región de oriente próximo. Existen en total 15.906 plantas destinadas a la desalación [3]. En Europa occidental hay 2.337, donde la mayoría se concentran principalmente en la costa Mediterránea y los archipiélagos de este mar. Destacándose de forma notoria las Islas Canarias, la cual ha sido siempre una zona puntera en lo relativo a esta industria.

También se aprecia como la mayoría de las plantas en suelo estadounidense están dedicadas a agua salobre de concentración muy inferior a la de agua de mar, y que como se verá más adelante, mucho menos costosa de explotar.

Pese a la necesidad de reinventar la manera de consumir agua por las sociedades modernas y los grandes esfuerzos en investigación e innovación que se están realizando en torno a la tecnología de Osmosis Inversa, RO (Reverse Osmosis), esta no está exenta de problemas medioambientales como cualquier otra actividad humana.

El gran consumo de energía es su principal debilidad, esto en la época de la transición energética desde una economía fósil hacia otra más verde y eficiente es un gran hándicap a solventar y no exento de oposición social y política.

El segundo de los problemas a abordar son los residuos que esta industria genera, y es que el caudal rechazado en el proceso de desalación se devuelve a los océanos, causando un gran impacto en el ecosistema local, ya que se trata de grandes caudales con una concentración salina que dobla a la del agua de mar.

La preocupación por la sostenibilidad de esta tecnología ha crecido acompañada del interés que ha despertado en las últimas décadas como puede observarse en la Figura 3.

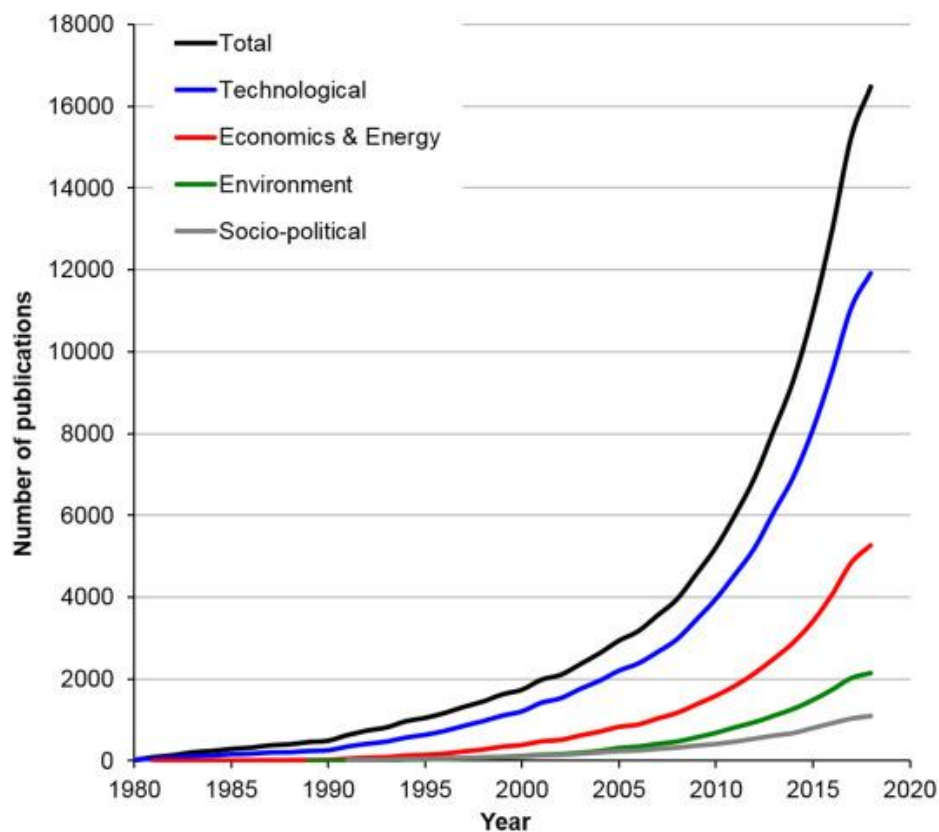


Figura 3. Publicaciones relativas a desalación por categorías [5].

Queda claro de la observación de la Figura anterior el gran interés que ha despertado esta tecnología desde el año 2.000, momento desde el cual el crecimiento del número de publicaciones se ha disparado de forma exponencial.

Pese a los problemas intrínsecos a esta tecnología, la necesidad imperante de producir agua apta para el consumo humano provoca una imprescindible necesidad de consumo energético y generación de residuos, coste que las sociedades de hoy día deben de abordar desde el punto de vista de la eficiencia y la sobriedad.

Este documento trata por tanto de aportar claridad y soluciones a los procesos de diseño y modernización de plantas desaladoras, con el foco puesto en maximizar el ahorro energético.

2 CONCEPTOS PREVIOS

El mecanismo físico que origina el flujo de disolvente a través de una membrana es el proceso conocido como ósmosis, este proceso se observa tanto de forma natural, por ejemplo, en mantener el equilibrio hídrico y de electrolitos en los seres vivo, como de forma artificial, uno de los mayores exponentes de esto es la obtención de agua dulce a partir de agua salada de mar.

La tecnología detrás del proceso de desalación más extendida hoy día y objeto de este estudio es conocida como ósmosis inversa (Reverse Osmosis, RO). La presión aplicada en el lado concentrado, es decir, en el lado donde se localiza el agua salada es el motor de dicho proceso, mientras que la presión osmótica, dependiente de las concentraciones de soluto en los fluidos, se oponen al transvase de disolvente por medio de la membrana semipermeable.

Por lo que queda claro, que para que parte del disolvente pase de un fluido a otro más concentrado es necesario vencer la diferencia de presión osmótica entre ambos fluidos.

Para definir la presión osmótica se parte del coeficiente osmótico del disolvente (φ), el cual mide la desviación del comportamiento de un disolvente respecto a su comportamiento ideal, el coeficiente osmótico se define en función del potencial químico del disolvente puro (μ_A^*) y del potencial químico del disolvente en la solución (μ_A).

$$\varphi = (\mu_A^* - \mu_A) / (R \cdot T \cdot M_A \cdot \sum_i b_i) \quad (1)$$

En la Ecuación 1, R es la constante universal de los gases, T la temperatura del fluido, M_A es la masa molar del disolvente y b_i la molalidad del soluto i.

Los potenciales químicos por su parte se obtienen a partir de la derivada parcial respecto a las cantidades de materia de la función de Gibbs, manteniendo constantes sus variables naturales, temperatura y presión.

La presión osmótica (Π), puede expresarse en función del coeficiente osmótico de acuerdo con la Ecuación 2.

$$\Pi = \varphi \cdot \rho_A^* \cdot R \cdot T \cdot b_B \quad (2)$$

Donde ρ_A^* es la densidad del disolvente puro y b_B la molalidad de la disolución.

La presión osmótica puede expresarse en función de la fracción másica en lugar que dependiente de la molalidad, como se observa en la Ecuación 4. El agua de mar puede tratarse como una disolución de un electrolito fuerte 1-1, con masa molar cercana a la del NaCl [6]. El valor de la masa molar de las sales disueltas en agua de mar (M_B) es de 62,808 g/mol.

$$\Pi = \varphi \cdot \rho \cdot R \cdot T \cdot 2 \cdot \frac{S}{M_B \cdot (1 - S)} \quad (3)$$

Como se comentó anteriormente, el proceso de RO ocurrirá siempre que la diferencia de presión hidrostática sea superior a la diferencia de presión osmótica, a esta diferencia se la conoce como Net Driving pressure, NDP y se expresa como:

$$(P_1 - P_2) - (\Pi_1 - \Pi_2) > 0 \quad (4)$$

Como fracción másica de sales en el agua de mar, se toma un valor medio de 0.03516504 kg/kg [7], que corresponde a la concentración denominada agua de mar estándar, lo que supone una presión osmótica de 25,6 bar, al finalizar el proceso de desalación las concentraciones se elevan hasta valores típicos de 45 o 55 bar de presión osmótica. Sin embargo, la presión osmótica no solo depende de la concentración de este, sino además de la temperatura del fluido.

En este estudio se hará uso de las ecuaciones termodinámicas propuestas por Sharqawy, tanto para el cálculo de las variables independientes de la presión [8], como para la posterior revisión que se realizó en 2016 y en la que sí que se imputaba la influencia de la presión a la que está sometido el fluido al cálculo de las propiedades termodinámicas [9].

A continuación, se realiza un estudio de sensibilidad sobre la repercusión en la presión osmótica de las principales variables de las que esta depende.

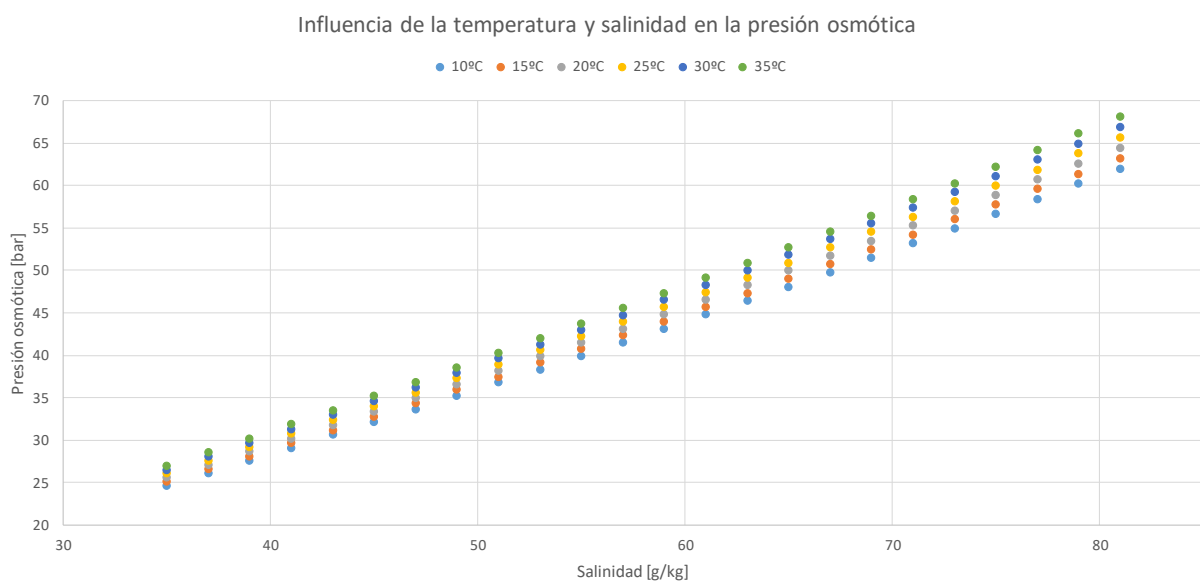


Figura 4: Influencia de concentración y temperatura en la presión osmótica.

Como se observa en la Figura anterior, la principal dependencia de la presión osmótica es con la salinidad, existiendo una relación casi lineal entre estas variables. En segundo lugar, un aumento de la temperatura también se ve reflejado en un aumento de la presión osmótica, esta dependencia se ve acrecentada para valores altos de salinidad, donde una diferencia de temperatura de 20 °C se traduce en unos 5 bar aproximados de diferencia.

De lo anterior se deduce lo interesante que resulta, a priori, trabajar con agua de mar de la menor concentración salina posible y a una baja temperatura, sobre todo en la parte final de las membranas donde la concentración del fluido va aumentando, como se explicará próximamente.

El flujo de disolvente no está únicamente marcado por la diferencia de presiones, la salinidad de los fluidos o la temperatura de estos. La membrana semipermeable cuya función es separar ambos fluidos que se enfrentan es el corazón del proceso de ósmosis y el factor limitante que regula el flujo de disolvente, por lo que las características de esta definen el comportamiento que tendrá la planta en su conjunto. Además, supone uno de los elementos más caros tanto en la inversión inicial como en el mantenimiento de la planta en operación.

Una membrana ideal destinada a RO debe de satisfacer altas exigencias de calidad, especialmente si el agua producida se va a dedicar al consumo humano, entre las exigencias que se le piden a una membrana podemos distinguir:

- Alta permeabilidad al disolvente.
- Baja permeabilidad a las sales.
- Baja permeabilidad de Boro.
- Estructura mecánica robusta, que le permita soportar presiones relativamente altas sin sufrir perforaciones.
- Mínimas pérdidas en ambos fluidos que atraviesan la membrana.

Las membranas se integran en un tubo de presión (Pressure Vessel, PV), donde típicamente cuentan con un diámetro de 8" y en ella se integran hasta 7-8 membranas en serie, tradicionalmente se empleaba la misma tipología de membrana en el tubo de presión hasta que en los últimos años se han comenzado a desarrollar diseños híbridos de PV. Estos diseños consisten en utilizar modelos de membranas diferentes en el mismo tubo de presión. En la Figura 5 se observa un diseño de una instalación de R.O., donde los tubos de presión se colocan siempre horizontalmente y en el cual se introduce agua de mar normalmente obteniéndose un caudal sin concentración de sales y un residuo con una elevada concentración salina.

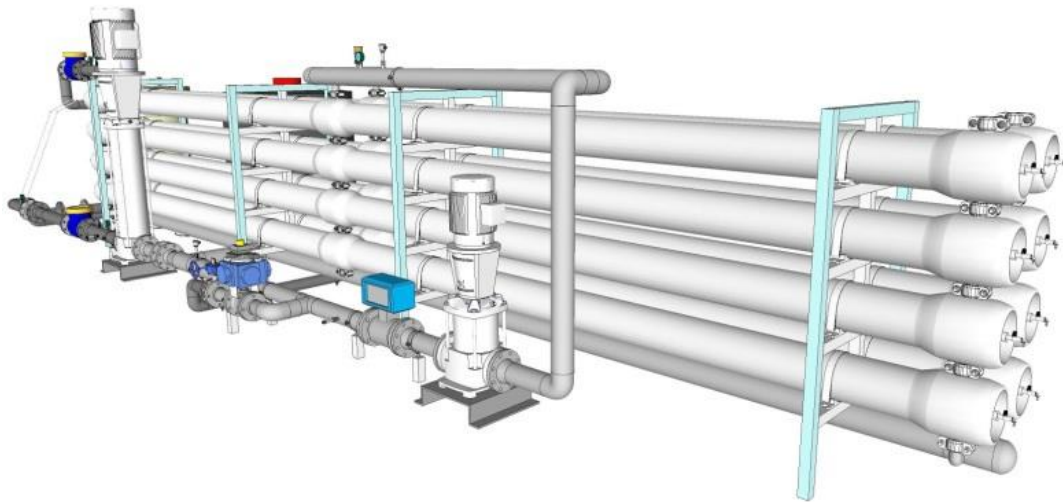


Figura 5. Diseño sistema R.O. [10].

La ecuación que domina la transferencia de disolvente a través de la membrana está gobernada por la permeabilidad de la membrana L_w [$L/(m^2 \text{ h bar})$], valor típico que varía entre 1 y 2,5 $L/(m^2 \text{ h bar})$. A partir de este valor puede calcularse el caudal volumétrico de disolvente que atravesará la membrana.

$$q_{v,w} = L_w \cdot A \cdot (\Delta P - \Delta \Pi) \quad (5)$$

Dicho valor se ve menguado con el paso del tiempo, principalmente por el ensuciamiento de la membrana, por lo que al anterior caudal volumétrico se suele multiplicar por un factor f menor que 1 para tener en cuenta el deterioro de la membrana, como valor de f normalmente se escoge 0,85. Por lo que el caudal real que cruza la membrana puede expresarse como:

$$q_{v,p} = f \cdot q_{v,w} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta ahora las pérdidas en la membrana por parte del caudal sometido a alta presión hidráulica, se puede presuponer una presión media de dicho caudal a lo largo del tubo de presión tal que:

$$P_{F-BD} = P_F - \frac{\Delta P_{loss}}{2} \quad (7)$$

Lo cual permite describir la ecuación que domina el caudal de flujo que atraviesa la membrana de forma que:

$$q_{v,w} = f \cdot L_{w,0} \cdot A \cdot [(P_{F-BD} - P_P) - (\Pi_{F-BD} - \Pi_P)] \quad (8)$$

Sobre las pérdidas experimentadas en la membrana, estas pueden calcularse mediante la ecuación propuesta por Wilf 2007 [11], según la cual:

$$\Delta P_{loss} = A_1 \cdot (q_{v,F-BD})^{B_1} \quad (9)$$

Siendo A_1 y B_1 constantes específicas dependientes de cada membrana y $q_{v,F-BD}$ el caudal medio de la fuente de alimentación. Para simplificar el cálculo de la pérdida de energía se sugiere cambiar $q_{v,F-BD}$ por $q_{v,F}$.

También se define una concentración media C_{F-BD} para el fluido de alta concentración a partir de la tasa de recuperación r_v .

$$C_{F-BD} = C_F \cdot \frac{\ln \frac{1}{1-r_v}}{r_v} \quad (10)$$

Mientras que la concentración del caudal rechazado o brine puede expresarse como:

$$C_{BD} = C_F \cdot \frac{1}{1-r_v} \quad (11)$$

Además de la relación de la pérdida de carga y la concentración media, en Wilf 2007 [11] se propone una solución matemática para contabilizar el aumento de la concentración salina en la zona más próxima a la membrana que delimita ambos fluidos, provocado por el tránsito de disolvente semi puro a través de la membrana, así se define CPF como factor que cuantifica la concentración polar.

Wilf propuso que existía una relación lineal entre CPF y el valor de recuperación r_v , de esta forma:

$$CPF = a_{CPF1} \cdot r_v + a_{CPF2} \quad (12)$$

Asumiendo que la polarización en el caudal permeado es mínima puede describirse nuevamente la ecuación que domina el flujo de permeado como:

$$q_{v,w} = f \cdot L_{w,0} \cdot A \cdot \left((P_F - \frac{\Delta P_{loss}}{2} - P_P) - (\Pi \cdot (CPF \cdot C_{F-BD}) - \Pi_P) \right) \quad (13)$$

Respecto al transporte de sales, esto es un efecto no deseado que provoca que partículas sólidas crucen la membrana semipermeable, el flujo másico está gobernado por

$$q_s = L_s \cdot A \cdot (\Delta C) \quad (14)$$

Siendo ΔC la diferencia de concentración entre ambos fluidos que se enfrentan.

La concentración final del caudal permeado finalmente resulta:

$$C_p = \frac{q_s}{q_{v,p}} \quad (15)$$

Finalmente, el caudal volumétrico de permeado puede expresarse como:

$$q_{v,P} = \frac{A}{\rho_P} \{L_S \cdot (CPF \cdot C_{F-BD} - C_P) + f \cdot L_w \cdot (P_F - \frac{\Delta P_{loss}}{2} - P_P) - (\Pi \cdot (CPF \cdot C_{F-BD}) - \Pi_P)\} \cdot \rho_W \quad (16)$$

Y la concentración del caudal de permeado puede expresarse como.

$$C_P = \frac{L_S \cdot (CPF \cdot C_{F-BD} - C_P)}{\frac{1}{\rho_P} \{L_S \cdot (CPF \cdot C_{F-BD} - C_P) + f \cdot \left((P_F - \frac{\Delta P_{loss}}{2} - P_P) - (\Pi \cdot (CPF \cdot C_{F-BD}) - \Pi_P) \right) \} \cdot \rho_W} \quad (17)$$

Respecto a los equipos recuperadores de energía que se emplean para tratar de reducir el consumo global de la planta destacan:

- Turbochargers, tales como los fabricados por la empresa ERI.
- Cámaras isobáricas como el ERI-PX.
- i-Save, siendo este un tipo muy particular de turbocharger.

Gracias a su mayor eficiencia energética, la proliferación de dispositivos como ERI-PX o i-Save han terminado por sustituir a los antiguos equipos de recuperación fabricados, como las antiguas turbinas Pelton o los primeros turbochargers.

Respecto al ERI-PX, la presión de salida se obtiene como:

$$P_{f,out} = \frac{\varepsilon \cdot \{q_{v,f} \cdot (P_{f,in} - P_E) + q_{v,B} \cdot (P_{B,in} - P_E)\} - q_{v,B} \cdot (P_{B,out} - P_E)}{q_{v,f}} + P_E \quad (18)$$

El pequeño salto de presión restante hasta alcanzar la presión de salida de la bomba de alto presión es proporcionado por una segunda bomba.

Por otro lado, también se dispone de un dispositivo i-Save, estos consiguen llegar a la presión de la salida de la turbina de alta presión, pero con un consumo interno de potencia. Este consumo obedece a la siguiente ecuación:

$$P_{W,ERD} = \frac{q_f \cdot (P_{f,out} - P_{f,in}) - \varepsilon \cdot q_B \cdot (P_{B,in} - P_{B,out})}{\varepsilon} \quad (19)$$

3 CONFIGURACIONES ANTIGUAS

El enfoque de este trabajo es el desarrollo de herramientas que puedan ayudar en el desarrollo de nuevas configuraciones, por lo que en primer lugar se realiza una búsqueda bibliográfica para tratar de vislumbrar hacia donde se dirige la industria de la desalación.

En este trabajo, se obvia el pretratamiento y post-tratamiento del agua de alimentación o de los productos. Para justificar este enfoque, a continuación se va a analizar el consumo en operación de una planta real.

La planta bajo este estudio no es otra que SADARA, situada en el Golfo Pérsico, la cual fue completada en Diciembre de 2016 y tiene una capacidad nominal de 178.560 m³/día, cuenta con una configuración de dos pasos y un valor de energía específica consumida, SEC, de 4,35 kWh/m³ a nivel global de planta y 3,1 en el sistema de RO, con un sistema instalado de ERI-PX y membranas DOW [12]. En la Figura 6 se muestra una descomposición de costes de operación de dicha planta:

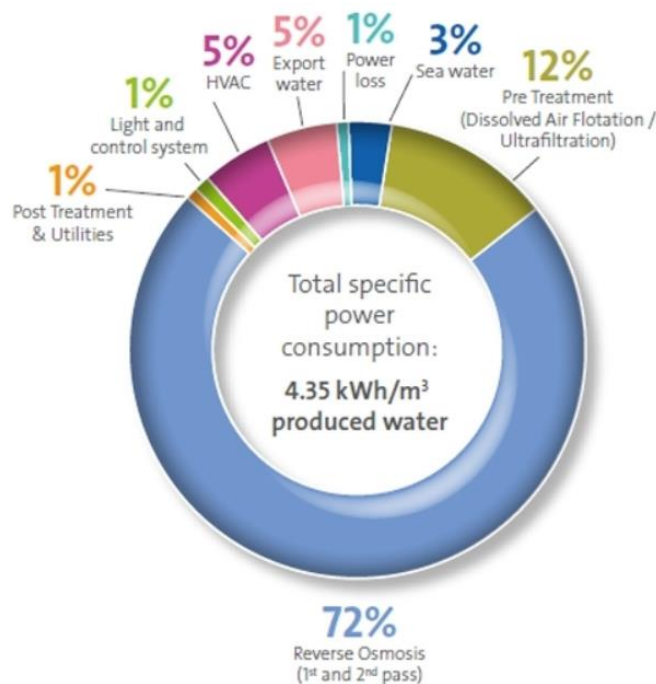


Figura 6. Desglose de costes para producir agua en la planta de SADARA [12].

De la observación directa de la estructura de costes de operación, se aprecia que aproximadamente el 70% del consumo energético tiene su raíz en el sistema de RO, en el cual es necesario producir las condiciones termodinámicas adecuadas para un flujo opuesto al espontaneo de permeado, desde el fluido más concentrado hacía uno de menor concentración.

Del mix de consumo energético restante destaca, aunque a mucha distancia, el proceso de pre-tratamiento con un 12% del coste de operación.

Con toda esta información se justifica que el presente documento se centre de forma exclusiva en tratar de reducir el consumo energético atacando el sistema de R.O., por lo que de aquí en adelante se omitirá en mayor o menor medida el resto de los procesos necesarios en una planta de desalación, en favor de una mayor profundización en la principal área de consumo de las plantas de la industria desaladora.

A continuación, se relata la nomenclatura típica de este tipo de plantas.

En la tecnología de desalación, el producto de una primera serie de membranas es a veces la alimentación de la siguiente membrana, a esta segunda membrana se le conoce como segundo paso. Otra posible configuración es que el rechazo de la primera serie de membranas sea la alimentación de la próxima membrana aguas abajo, en cuyo caso se habla de segunda etapa.

El agua de mar tradicionalmente experimentaba dos pasos antes de obtenerse el producto final. Por otra parte, el concentrado o salmuera (brine), el cual posee una alta concentración es introducido en una segunda etapa [13] con el fin lograr un mayor caudal de permeado en esta segunda etapa.

La existencia de un segundo paso provoca una menor concentración de soluto en el producto, sin embargo aumenta la cantidad de caudal rechazado y un mayor consumo energético, típicamente el motivo que justificaba la existencia de este segundo paso eran las estrictas restricciones sobre la concentración de Boro y en general el mejorar la calidad del permeado.

Además, el rechazo del segundo paso, con concentraciones no muy elevadas, puede recircularse a la entrada del sistema con el propósito de disminuir la concentración de entrada en la primera membrana y conseguir así aumentar la eficiencia global del sistema.

Otra justificación a la existencia de dos pasos hoy día puede ser el deseo de obtener diferentes fluidos con distinta calidad, ya que si todos los caudales de permeados se mezclan, el resultado es un nuevo caudal con una calidad media,

La instalación de un divisor de caudal (Split Partial, SP) tiene el objetivo de obtener en la parte inicial de la primera membrana un permeado de mayor calidad que el que se obtiene en la cola de esta membrana o en el segundo paso en caso de que lo hubiere. Por lo que finalmente se obtiene un primer caudal de una excelente calidad y un segundo con una calidad que dista mucho del anterior, este caudal como se verá más adelante puede obtenerse como producto o recircularse.

En la siguiente Figura se aprecia en primer lugar un segundo paso, en esta configuración se recupera la energía del caudal rechazado en el primer paso y se recircula el caudal rechazado del segundo. Se puede observar como el caudal rechazado es introducido en una segunda etapa mezclándose finalmente el permeado de ambos bastidores de membranas.

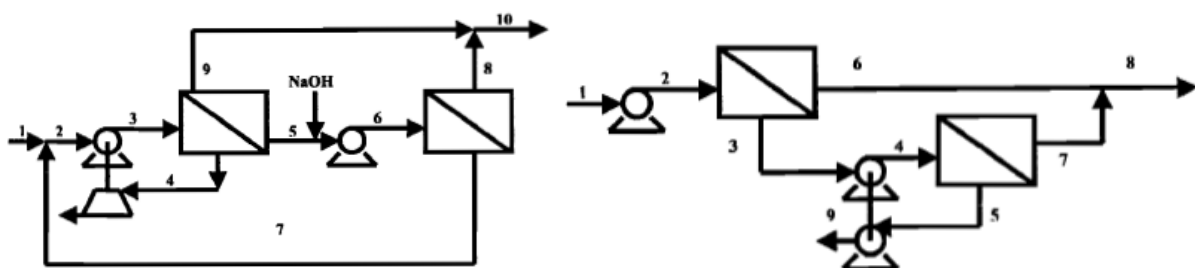


Figura 7. Configuraciones obsoletas de configuraciones de plantas de ósmosis inversa [14]

3.1 Configuración estándar

Los autores Baltasar Peñate y Lourdes García-Rodríguez plantearon en 2.010 una modernización determinada a la configuración-obsoleta de una planta compuesta por 2 trenes de 5.000 m³/(día tren), esta instalación propuesta cuenta con un SEC de 3,27 kWh/m³ [15]. En la Figura 8 se muestra la configuración antigua.

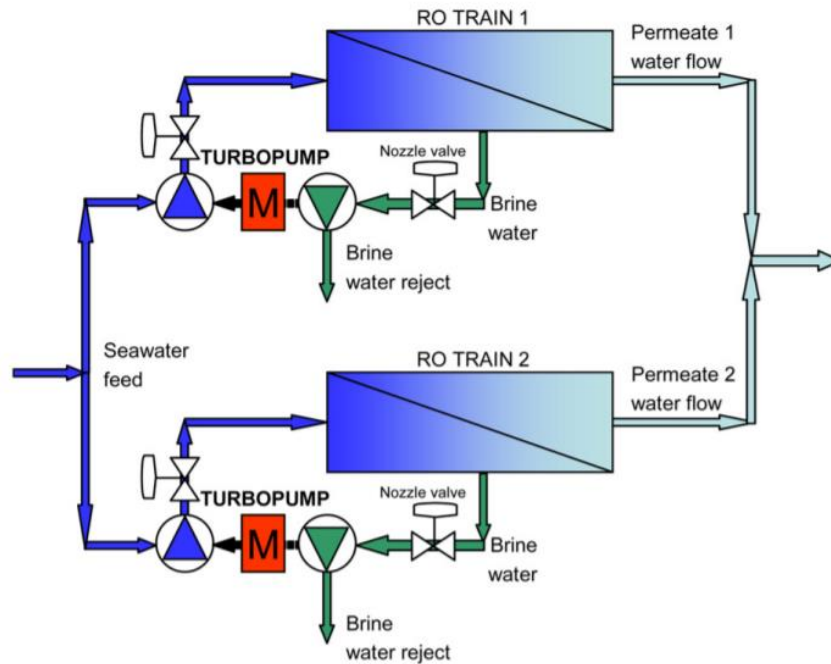


Figura 8. Configuración obsoleta de planta de desalación por ósmosis inversa [15].

Dicha configuración está formada por dos trenes iguales, con dos bombas de alta presión y dos turbinas Pelton, a posteriori se comentarán las propuestas de configuración aportada por los autores y las principales características de estas.

3.2 Configuración Lanzarote IV

El archipiélago Canario tradicionalmente ha sido la punta de lanza del continente europeo donde probar e instalar las nuevas tecnologías y avances que experimentaba el sector de la desalación, el número de plantas instaladas asciende hasta las 319, distribuyéndose 278 en la provincia de Las Palmas y las 41 restantes en Santa Cruz de Tenerife.

La capacidad estimada de todas estas plantas asciende hasta los 663.463 m³/día, es decir, una capacidad de producción anual de 242,16 hm³/año. Habiendo experimentado un incremento en comparación con la capacidad de producción de 187,5 hm³/año en el año 2.010 [16].

Dentro del panorama canario, se puede destacar la planta de Lanzarote IV en la Isla de Lanzarote por su producción de agua y documentación de la que se dispone. En 2.010 esta instalación contaba con 5 trenes, 4 de ellos iguales, los cuales pueden observarse en la Figura 9 y un quinto y distinto tren que se aprecia en la Figura 10.

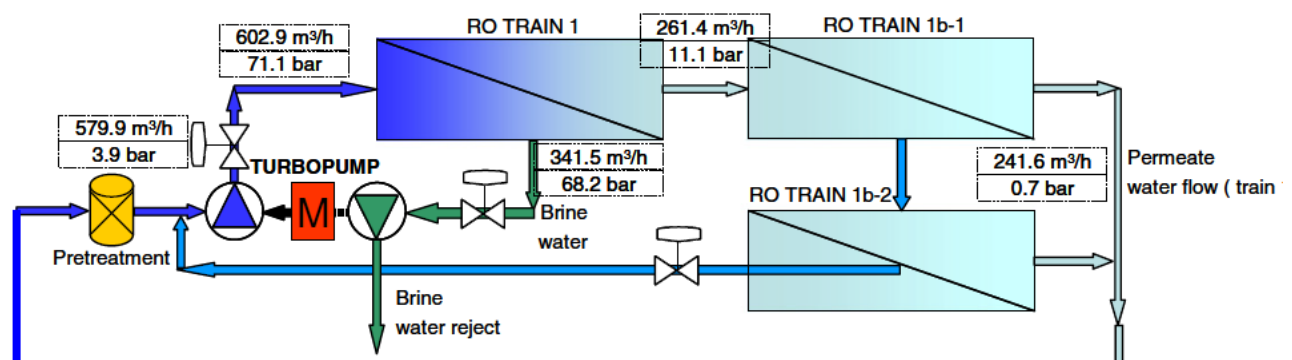


Figura 9. Configuración de los 4 primeros trenes de Lanzarote IV [16] ¹.

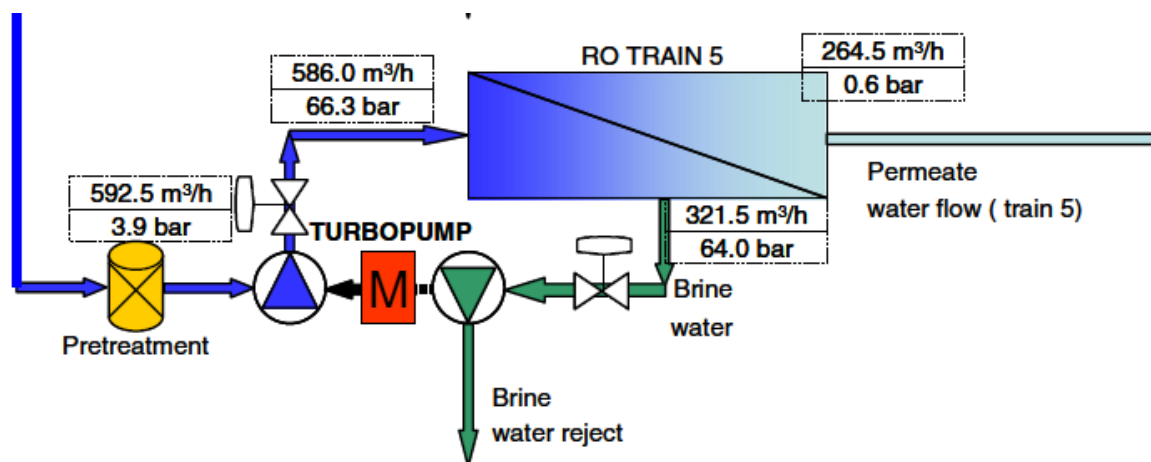


Figura 10. Configuración del quinto tren de Lanzarote IV [16].

Ambos trenes emplean turbinas Pelton con porcentajes de recuperación de energía que varían entre el 70 y 90%. Además de existir una diferencia clara en la configuración empleada entre ambos trenes, cada uno de estos emplea un número distinto de tipos de membranas.

En conjunto la instalación es capaz de producir 1.217.3 m³/h con una concentración de 259 ppm.

¹ Existe una errata en la representación de la segunda etapa del segundo paso, la línea que representa la membrana debe de dibujarse en la otra diagonal a la representada.

4 MODERNIZACIÓN DE PLANTAS

La gran cantidad de avances científicos y la evolución continua de la técnica ha provocado en los últimos años una revolución permanente en el sector de la desalación y no solo en el plano teórico, sino que la práctica totalidad de las instalaciones de desalación han experimentado procesos de modernización, conocido como Retrofit, en el que bien o se realizan pequeños cambios de equipos por equipos, o se afrontan auténticas revoluciones en la configuración de dichas instalaciones.

Los cambios en estas instalaciones pueden radicar de diferentes motivaciones:

- Desear bajar el consumo de la instalación manteniendo constante la capacidad de producción.
- Conseguir un aumento en la producción con el mismo consumo energético.

A continuación, se muestran configuraciones propuestas para las instalaciones explicadas en el punto 3, además de otras soluciones tecnológicas a estudiar que de una manera u otra han ofrecido nuevas oportunidades de mejora.

Todo ello motivado por el deseo de lograr una perspectiva histórica de hacia donde se dirige la industria de la desalación, para la posterior elaboración de un software capaz de integrar los últimos avances experimentados y ofrecer una solución óptima en la fase de diseño.

4.1 Retrofit configuración estándar

Anteriormente en el punto 3.1 se comentó una de las configuraciones obsoletas, que era la configuración estándar hasta principios de siglo XXI. Como ya se ha comentado, la aparición de elementos sustitutivos de las turbinas Pelton con valores de recuperación energética mucho mayores protagoniza las propuestas de configuraciones alternativas, como se comenta a continuación.

4.1.1 Alternativas a la configuración estándar

Las siguientes configuraciones son propuestas para la modernización de la planta antigua comentada anteriormente en el punto 3.1 en la página 35 por los autores Baltasar Peñate y Lourdes García-Rodríguez [15], en función del objetivo que se persiga, se puede distinguir:

- Si el objetivo es mantener constante la capacidad de la planta y reducir la energía consumida se propone las siguientes configuraciones:
 1. Empleando la misma bomba de alta presión e instalando una cámara isobárica.

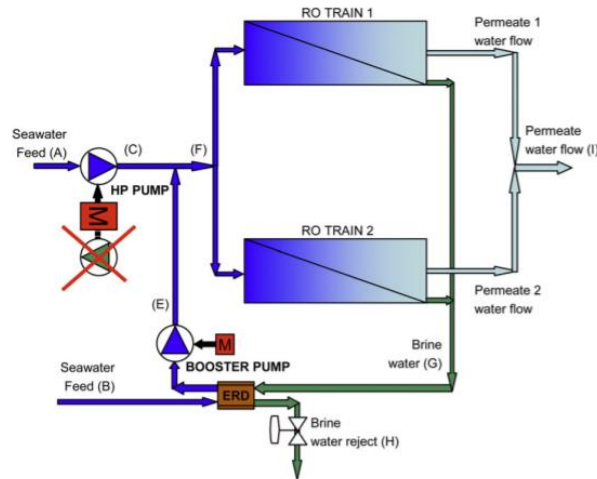


Figura 11. Retrofit N.1 [15].

2. Instalación de una comba de baja presión y añadiendo una cámara isobárica.

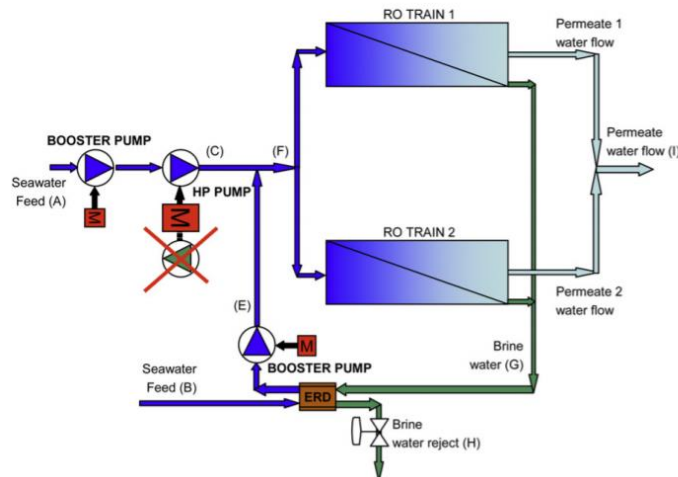


Figura 12. Retrofit N.2 [15].

Ambas configuraciones ganadoras tienen en común:

- La instalación de sendas cámaras isobáricas.
- La presencia de bombas de refuerzo (Booster Pump) .
- La eliminación de sendas turbinas Pelton.

A continuación, se muestra en la Tabla 1 un resumen de las diferencias entre la configuración estándar y las propuestas.

Tabla 1. Comparación de las configuraciones propuestas [15].

	Estándar	Retrofit N. 1	Retrofit N. 2	Retrofit N. 3	Retrofit N. 4
Capacidad [m ³ /h]	10.000	10.000	10.000	14.400	15.386
Aumento de capacidad [%]	--	0,0%	0,0%	44,2%	53,8%
Energía requerida [kW]	1.363,6	1.014,2	1.029,2	1,424,1	1.933,2
Ahorro de energía	--	25,6%	24,5%	0,0%	0,0%
SEC [kWh/m ³]	3,27	2,43	2,47	2,39	3,02
Coste de Retrofit [c€/m ³]	--	54,2	53,1	56,7	66,0

4.1.2 Estudio termo-económico alternativas planteadas

Empleando la misma filosofía antes propuesta para estudiar la repercusión termo-económica de las propuestas de retrofit planteadas, las distintas configuraciones planteadas se observan en la siguiente Figura a partir de la configuración estándar que se aprecia en el punto 3.1.

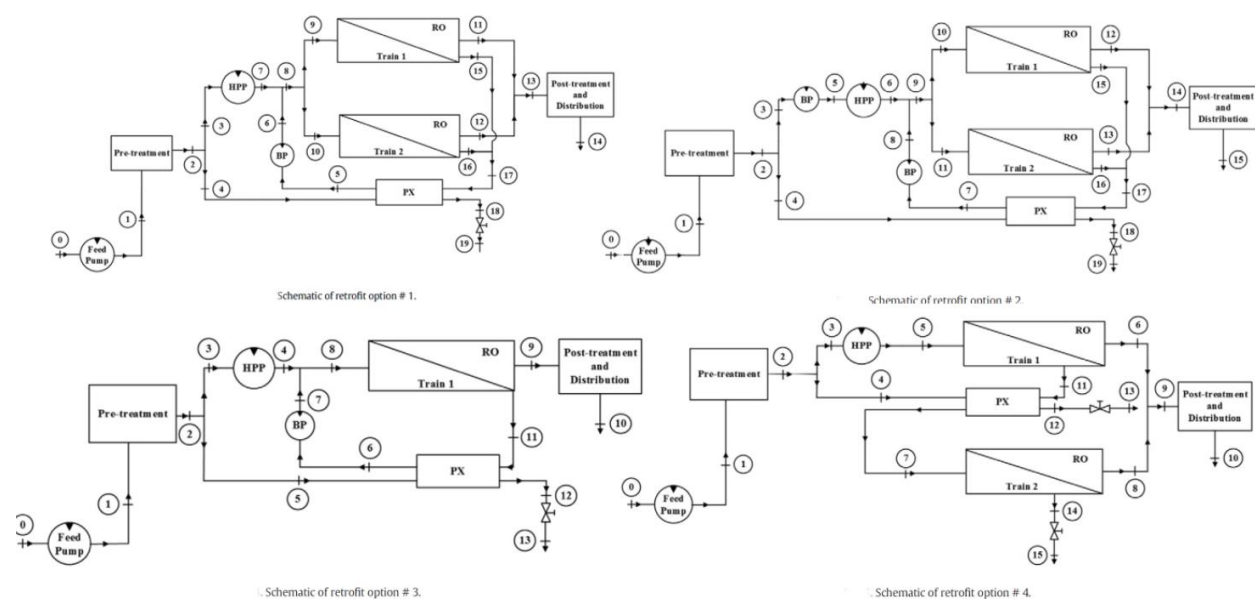


Figura 15. Configuraciones de retrofit propuestas [17].

De las configuraciones propuestas, las dos primeras están enfocadas a la reducción del consumo energético mientras que las dos últimas al aumento de la capacidad de producción. Los datos termodinámicos de cada una de las configuraciones propuestas frente a la estándar se aprecian en la siguiente Tabla.

Tabla 2. Comparación termo-económica de las distintas configuraciones propuestas [17].

	Antigua	Retrofit N°1	Retrofit N°2	Retrofit N°3	Retrofit N°4
Caudal de alimentación [m ³ /h]	926	926	926	1.334	1.436
Caudal por HPP [m ³ /h]	2 x 463	2 x 416	463	300	463
Caudal permeado [m ³ /h]	416	416	416	600	640
Energía requerida [kW]	1.573	1.248	1.268	1.788	2.472
SEC planta [kWh/m ³]	3,78	3,00	3,05	2,98	3,86
Energía ahorrada [%]	--	20,63	24,15	24,70	-2,18

Para el presente estudio termo-económico, se tiene en cuenta un coste de la energía eléctrica de 0,1344 \$/kWh, una tasa de impuestos del 0,35. Un periodo de amortización de 8 años y una estimación de vida de la planta de 15 años. Una tasa de interés de 0,06 y una inflación del 2%.

En la Figura 16 se aprecia el coste de los principales fluidos de las 4 configuraciones de Retrofit propuestas, el primer número corresponde a la opción de configuración propuesta anteriormente y el segundo al caudal en cuestión. Se aprecia como en el subsistema 2, donde se produce el proceso de desalación tras el pre-tratamiento y previo al post tratamiento del caudal permeado, se produce el mayor aumento de valor, como se comentó anteriormente en el punto 4.1.1.

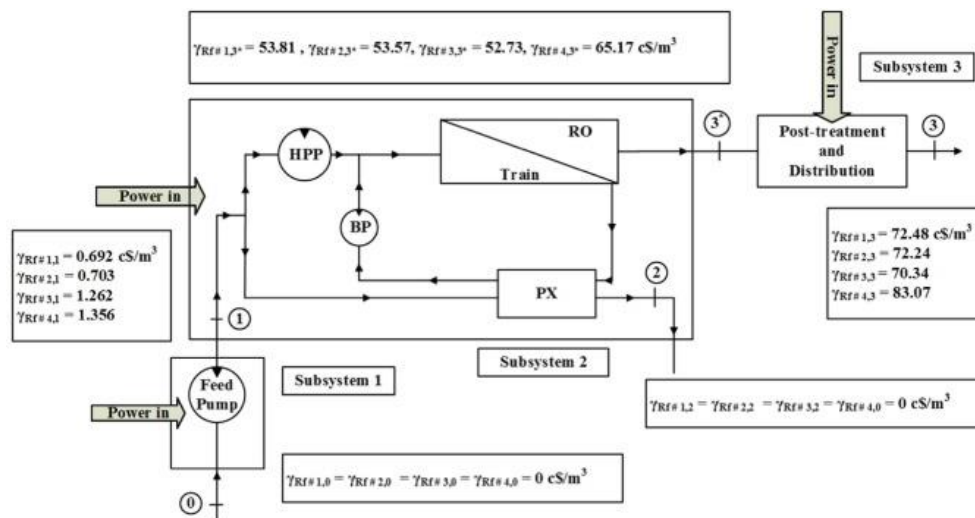


Figura 16. Costes de cada fluido en cada una de las configuraciones propuestas [17].

En la Figura 17 se aprecia en primer lugar el valor del consumo energético por unidad de caudal permeado producido, donde de forma análoga a lo visto anteriormente en la Tabla 2, la configuración número 3 resulta la de menor coste por caudal producido y la número 4 la de mayor caudal.

En segundo lugar se muestra el rendimiento exergético de las distintas configuraciones, en este caso se ve claramente como las dos primeras configuraciones, es decir, aquellas que se concibieron con la idea de reducir el consumo a igual caudal producido, son las que experimental un mayor rendimiento exergético.

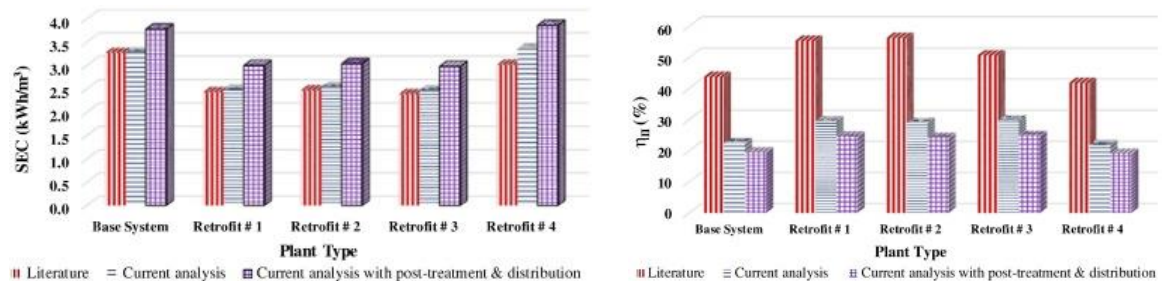


Figura 17. SEC y rendimiento exergético en las configuraciones propuestas [17].

En la Figura 18, se aprecia una comparativa del coste específico del producto, cabe reseñar una significativa diferencia entre el coste propuesto por el autor en cuestión [17] y la mayoría de la bibliografía existente, pudiendo residir tal diferencia en diferentes costes asociados en los procesos de pre-tratamiento y post-tratamiento.

Analizando el coste específico de los distintos productos, se aprecia una escasa diferencia entre las 3 primeras configuraciones de retrofit propuestas, con valores cercanos a los 60 c\$/m³.

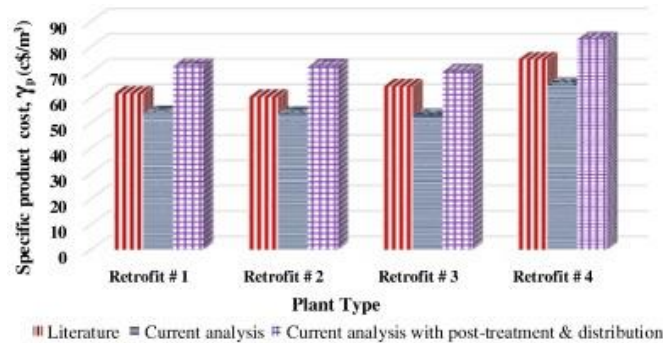


Figura 18. Coste del producto en cada una de las configuraciones propuestas [17].

Por último, se realiza un estudio de sensibilidad de parámetros claves, los cuales han quedado fijados hasta ahora, tales como el rendimiento de la bomba de alta presión y su influencia en el coste específico en el precio por caudal de permeado y en el rendimiento exergético. Esto se puede observar en la Figura 19.

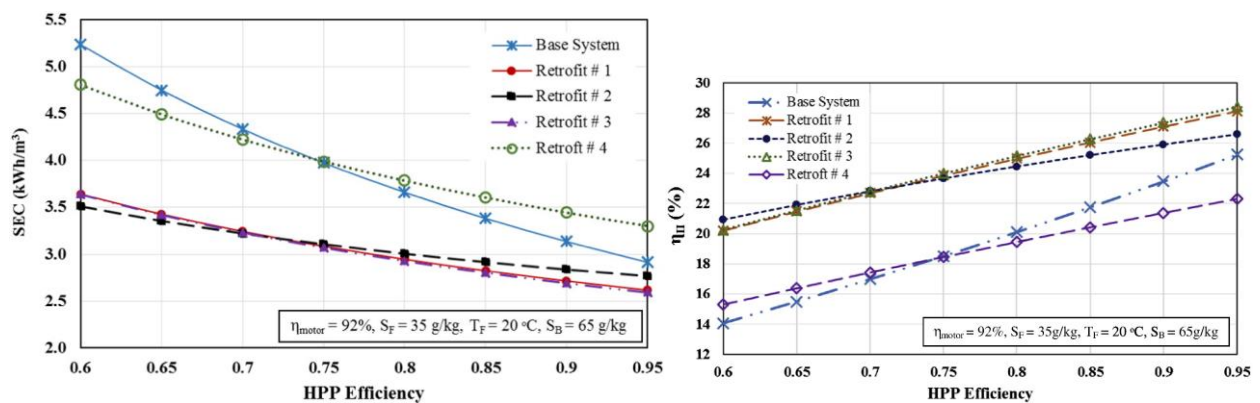


Figura 19 Influencia del rendimiento de alta presión [17].

Otros parámetros que han quedado fijados desde el inicio son la salinidad de la corriente de alimentación y el coste de la electricidad, como se puede apreciar en la Figura 20.

La influencia de la salinidad en el rendimiento exergético es muy acusada y uno de los principales problemas en regiones donde el acceso a agua se da en pequeños mares con concentraciones que pueden superar en algunos casos las 40.000 ppm. Otro parámetro fundamental para asegurar el presente y futuro de la industria de la desalación es el coste de la electricidad, ya que este es el mayor gasto en la operación de este tipo de plantas, asegurar un coste del kWh asequible para estas plantas es fundamental para lograr beneficios en esta industria.

En relación con lo comentado anteriormente, cabe señalar los grandes avances experimentados en los últimos años en la integración de energías renovables y plantas desaladoras, tratando de aprovechar el bajo coste de estas en horas de bajo consumo energético por exceso de oferta energética. Esta entre otras muchas es uno de los principales atractivos para fomentar dicha integración.

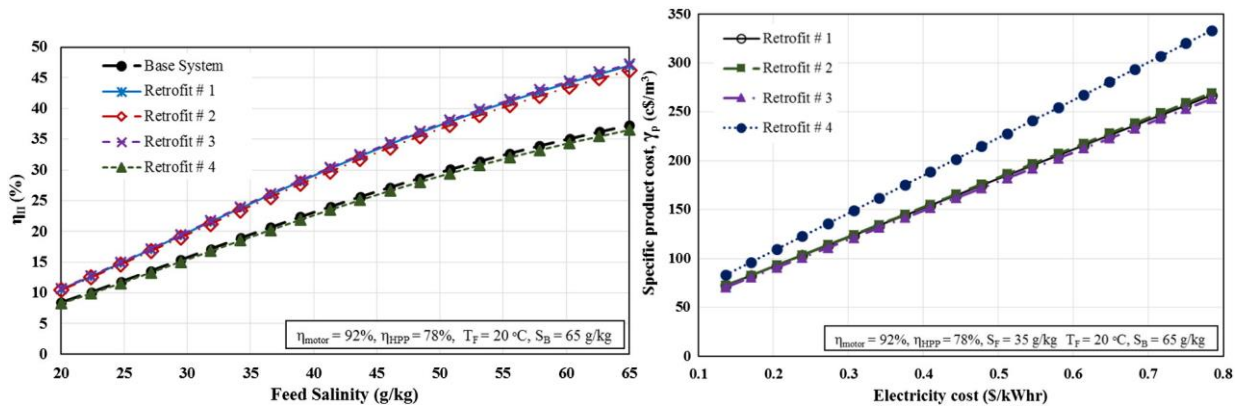


Figura 20. Influencia de la salinidad y coste de la electricidad [17].

4.2 Retrofit Lanzarote IV

Como ya se ha comentado varias veces a lo largo de este documento, las Islas Canarias son sinónimo de innovación y desarrollo en la industria de la desalación, y de todas las islas destaca la más occidental, donde se encuentra la planta de Lanzarote IV, a la cual históricamente se le han ido incorporado los avances que se experimentaban en esta industria, siendo pionera en números casos y mostrándose al exterior como un modelo a emular para el resto de las plantas de ósmosis inversa a partir de agua de mar.

4.2.1 Plan estratégico para Canarias

Las líneas estratégicas marcada por las autoridades canarias quedan bien reflejadas en el documento “Plan de ECOGESTIÓN en la producción y distribución de agua de Canarias” [18]. Este documento reconoce que:

“El agua es ya un recurso escaso; se requiere energía para obtenerla y tratarla; el consumo energético asociado crece de forma acelerada (desalación, depuración y regeneración)”.

Entre los objetivos que se fija en la línea estratégica cabe señalar el eje estratégico 1.

Eje estratégico 1. Mejoras de procesos para disminuir los consumos energéticos y aumentar la eficiencia de las plantas de producción de agua.

Que se pretende alcanzar mediante:

1. Incremento de la eficiencia en bombeos mejorando el rendimiento y los mecanismos de regulación.
2. Mejora de la eficiencia energética en el ámbito de la desalación.
3. Mejora de la eficiencia energética en el ámbito de la depuración.
4. Mejora de la eficiencia y la gestión energética en el ámbito de la reutilización.

A efectos de este documento, el segundo de los anteriores puntos es el objeto principal de estudio.

Se estable como objetivo para 2.020 lograr consumos específicos, exclusivos del proceso de desalación, inferiores a un valor de 3,5 kWh/m³. Para ello se establecen diversas líneas de actuación.

- Línea de actuación L.A.1.2.1 - Plan Renove (Retrofitting) de sistemas de recuperación de energía más eficientes – Sustitución de turbinas por cámaras isobáricas.

Centrada en la recuperación de la energía existente en la salmuera en forma de elevada presión hidrostática, la cuales alcanza valores típicos entre 55 y 69 bar.

Esto supondría una nueva vuelta de tuerca a los cambios experimentados durante los años 80, en los cuales se sustituyeron las turbinas Francis por turbinas Pelton.

Los principales fabricantes de estas cámaras isobáricas, llamadas a liderar una nueva revolución en el sector de la desalación son: Calder (DWEERTM), KSB (SalTec DT), ERI® (PX) y RO Kinetic®.

- Línea de actuación L.A.1.2.2 - Introducción de variadores de velocidad en el control de caudal y presión.
- Línea de actuación L.A.1.2.3 - Diseño eficiente de bastidores de presión de ósmosis inversa.

A su vez en esta línea podemos distinguir:

- Sustitución e hibridación de membranas de ósmosis inversa de última generación. Donde se busca aumentar la superficie específica, aumentar el rechazo de sales y reducir la presión de operación sin que ello conlleve una pérdida de caudal producido.

Los fabricantes han logrado membranas con rechazo de sales por encima del 99,7%. Aunque la mayor novedad en los últimos años es la hibridación (mezcla) de membranas en un mismo tubo de osmosis inversa, estos tubos de presión suelen estar compuestos por 6 o 7 elementos, un diseño híbrido de membranas de alta capacidad y de bajo requerimiento presenta una nueva realidad a la que enfrentarse para lograr un menor consumo energético.

- Dimensionamiento hidráulico óptimo. Un redimensionamiento óptimo de las líneas hidráulicas conlleva una reducción de las pérdidas experimentadas por los fluidos y la consiguiente mejora del rendimiento global.
- Sectorización de los consumos en las instalaciones de plantas desaladoras. Se pretende fomentar un mayor control de los principales parámetros para sectorizar los consumos específicos, los tres sectores más destacados y con mayor incidencia energética son:
 - Proceso de captación de agua de mar.
 - Proceso de osmosis inversa.
 - Proceso de bombeo de agua producto.

El documento que se ha comentado anteriormente deja bien definida la línea que la Administración Canaria pretende marcar a las plantas desaladoras, tanto de índole pública como privada en el archipiélago con el fin de reducir el consumo energético del archipiélago y aumentar la capacidad de producción de agua desalada.

Durante estos años, multitud de plantas han experimentado procesos de modernización, motivadas muchas de ellas por distintas razones pero todas compartiendo la misma tendencia que ha quedado desglosada anteriormente, buscando la instalación de nuevos sistemas de recuperación de energía y mejorando el diseño de los bastidores, implementando sistemas híbridos en los tubos de presión.

4.2.2 Configuraciones propuestas para Lanzarote IV

Continuando con la metodología ya comentada, a continuación se muestran alternativas a la configuración existente y comentada en el punto 3.1 Configuración Lanzarote IV en la página 35.

De acuerdo con Baltasar Peñate y Lourdes García-Rodríguez [19], se presentan varias propuestas de configuración alternativa a la existente en la planta de Lanzarote IV, de las distintas propuestas destaca en la que proponen sustituir la turbina Pelton por una cámara isobárica como se observa en la Figura 21.

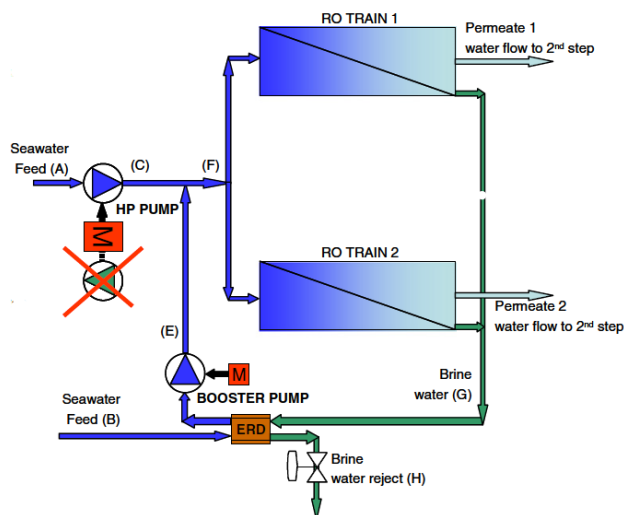


Figura 21. Propuesta para los trenes 1-4 en Lanzarote IV según Peñate y García-Rodríguez [19].

En la Tabla 3 se observa una comparación de la situación antigua y la propuesta:

Tabla 3. Comparación con la propuesta por Peñate y García-Rodríguez en Lanzarote IV [19].

	Configuración existente (2 trenes)	Retrofit propuesto
HPP [kW]	2.011	1.170
BOP [kW]	--	130
Potencia requerida [kW]	2.011	1.300
SEC [kWh]	3,43	2,41

Respecto al quinto tren, la propuesta de dichos autores es la que se observa en la siguiente Figura.

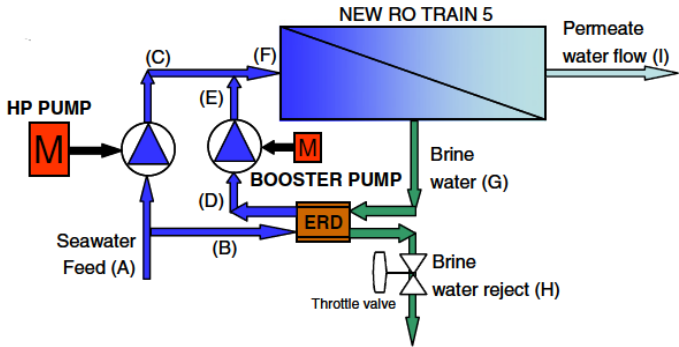


Figura 22. Propuesta de configuración para el tren 5 en Lanzarote IV según Peñate y García-Rodríguez. [19].

4.3 Reconfiguración de los trenes y tamaño del módulo.

El tamaño óptimo de los trenes que forman la configuración existente en una planta depende también del número de tubos de presión o Pressure Vessel (P.V.), los cuales están típicamente formados por membranas de 8" de tamaño. Sin embargo, en los últimos años se han venido desarrollando de forma experimental membranas de 16" de diámetro por parte de los principales fabricantes.

Algunos estudios computacionales [11] han venido a demostrar como un aumento en el diámetro de las membranas pueden suponer un ahorro de hasta un 12,4% en costes de capital, operación y mantenimiento.

También se estima una reducción del consumo energético entre el 12-16 %, continuando con esta línea de investigación, en 2017 se realizó un estudio termo-económico con el fin de aportar más conocimiento sobre lo oportuno de esta revolución en el tubo de presión y el tamaño de las membranas [20].

La configuración esquemática existente en Lanzarote IV con información sobre las membranas empleadas se observa en la Figura 23.

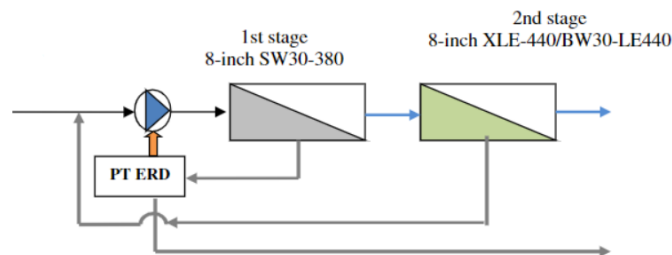


Figura 23. Configuración existente en los trenes 1-4 Lanzarote IV².

El autor del artículo en cuestión [20], recoge la configuración propuesta para Lanzarote IV siguiendo las recomendaciones del estudio comentado anteriormente en el documento estratégico para 2.020.

Configuraciones propuestas para Lanzarote IV. La cual se observa a continuación:

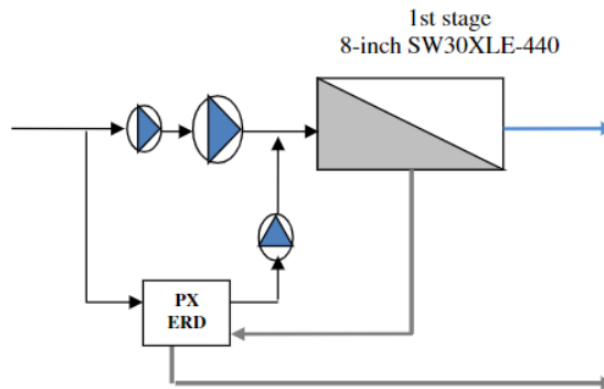


Figura 24. Disposición propuesta de Lanzarote IV [20].

² Existe una errata en la segunda membrana, esta no es la segunda etapa sino el segundo paso y la membrana es BWXLE.

Así mismo este autor propone una alternativa para Lanzarote IV.

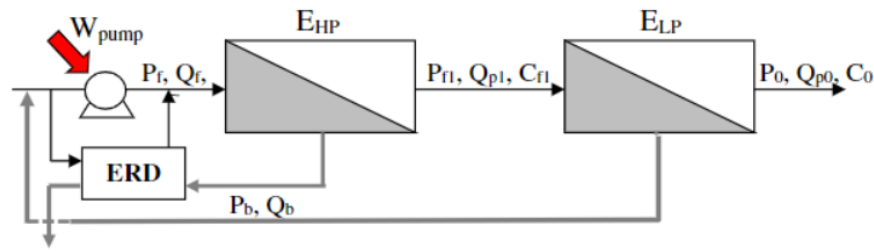


Figura 25. Configuración propuesta de Lanzarote IX [20]

Finalmente, el autor del estudio [20] recoge las propiedades de las membranas empleadas o propuestas en los dos casos anteriores como se aprecia en la siguiente Tabla:

Tabla 4. Membranas empleadas en las configuraciones propuestas [20].

Specifications	High-rejection modules (for HP stage)				High-flux modules (for LP stage)			
	AE-1600 ^a	AE-400 ^a	SW30XLE-440i ^a	SW30-380 ^a	AG-1600 ^a	AG-400 ^a	BW30-LE440 ^a	XLE 440 ^a
Diameter, inch	16.0	8.0	8.0	8.0	16.0	8.0	8.0	8.0
Length, inch	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
Operating pressure, bar	54–82	54–82	52–69	55–69	13–40	13–40	5–11.7	5–6.9
Maximum pressure drop, bar	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Average permeate flow, m ³ /day	136.3	34.1	23	34	159.0	37.2	44	48
Average NaCl rejection, %	99.80	99.80	99.70	99.40	99.80	99.80	99.00	99.00
Minimum boron rejection, %	90.0	90.0	90.0	90.0	n/a	n/a	90.0	90.0
Active area, m ²	148.6	37.2	35.3	35.3	148.6	37.2	40.9	40.9
Feedwater	NTU < 1	NTU < 1	NTU < 1	NTU < 1	NTU < 1	NTU < 1	NTU < 1	NTU < 1
	SDI < 5	SDI < 5	SDI < 5	SDI < 5	SDI < 5	SDI < 5	SDI < 5	SDI < 5
Module price, €	1790	447	967	621	1486	367	511	491
Manufacturer	GE	GE	Dow	Dow	GE	GE	Dow	Dow

^a Obtained from Lenntech (www.lenntech.com).

Donde cabe señalar AE-1600 y AG-1600, que son las membranas de 16” de diámetro objeto principal de estudio por parte de estos autores.

A continuación, se establece una numeración para identificar cada una de las variaciones y combinaciones de tipos de módulos y configuraciones de trenes que se presentan bajo estudio.

Tabla 5. Variaciones y combinaciones bajo estudio [20].

Train capacity (m ³ /day)	Existing configuration	1st stage SW30XLE-400i no 2nd stage**	Symmetrical train(s)	Asymmetric train(s)	Symmetrical train(s)	Asymmetric train(s)
	1st stage SW30-380 2nd stage BW30-LE440 2nd stage XLE-440 [*]		1st stage AE-1600 2nd stage AG-1600	1st stage AE-1600 2nd stage AG-1600	1st stage AE-1600 2nd stage BW30-LE440 2nd stage XLE-440	1st stage AE-1600 2nd stage BW30-LE440 2nd stage XLE-440
1 × 25,000		A1B1	A2B1		A3B1	
1 × 20,000, 1 × 5000		A1B2		A2B6		A3B6
1 × 15,000, 1 × 10,000		A1B3		A2B7		A3B7
2 × 12,500			A2B2		A3B2	
2 × 10,000, 1 × 5000		A1B4		A2B8		A3B8
3 × 8300			A2B3		A3B3	
4 × 6250			A2B4		A3B4	
5 × 5000	A0B0		A2B5		A3B5	

** and * based on our unpublished work.

Tras realizar un estudio termo-económico se obtienen los costes de cada una de las configuraciones antes propuestas, en dicho estudio el coste de producción queda desmenuzado en:

- Z^M : Coste de reemplazo de membranas.
- Z^{OM} : Coste de la inversión de capital.
- C_{energy} : Coste de la energía.
- $C_{contingency}$: Coste de contingencia.
- C_D : Coste de la exergía destruida.

Dicho desglose se observa en la Figura 26 y Figura 27.

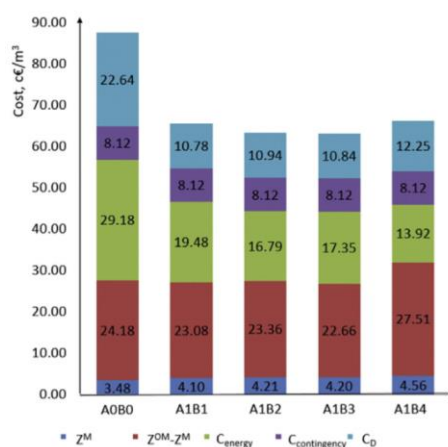


Figura 26. Desglose de precios para las configuraciones propuestas 1/2 [20].

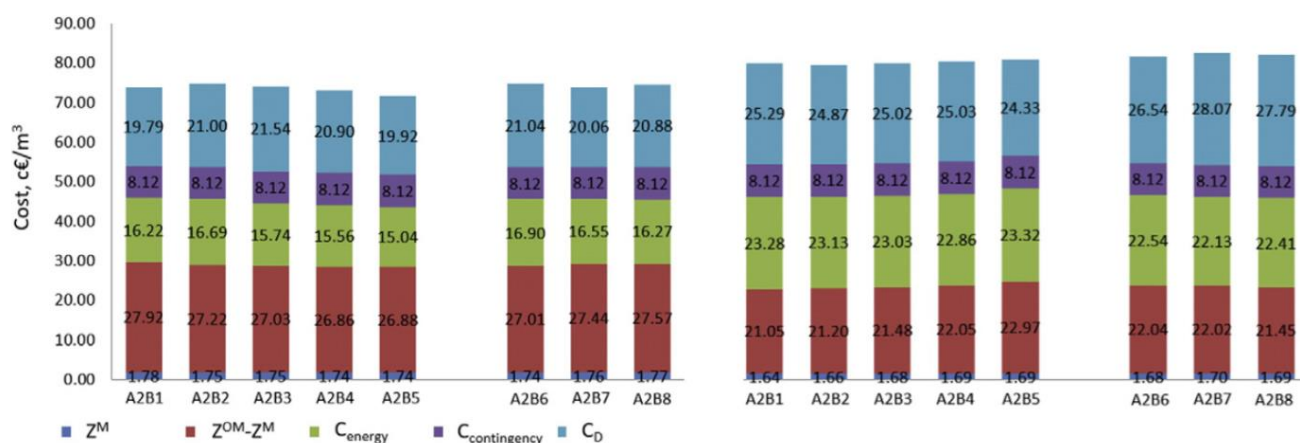


Figura 27. Desglose de precios para las configuraciones propuestas 2/2 [20].³

Se observa como los menores costes se consiguen para las configuraciones de la serie A1, la cual estaba compuesta por 1 paso con módulos SW30XLE-400i.

³ En la Figura 27 existe una errata por parte del autor, en la mitad de la derecha la serie es A3 como primer número identificativo.

En cuanto a las membranas de 16", se aprecia como en la serie 3, la cual está formada por dos pasos, siendo el segundo tipo de diseño híbrido tienen unos costes de operación ligeramente superiores.

Se observa como la influencia del coste de las membranas es inferior a las otras configuraciones estudiadas, por el contrario se requiere una mayor cantidad de consumo energético.

Se puede concluir como para una serie de membranas, los distintos tipos de configuraciones apenas suponen una diferencia de 3 c€/m³, existiendo la mayor diferencia entre B5 y B6 para la segunda serie y entre B2 y B7 para la serie 3.

La mejor configuración para la segunda serie es A2B5 y para la serie 3 A3B1. A continuación, se muestra en la Tabla 6 una comparativa de las configuraciones más destacadas de cada una de las series descritas.

Tabla 6. Comparación de propuestas de retrofit de Lanzarote IV [20].

	Configuración existente		1 paso, 8 in PV SW30-HR380		2 pasos, 16 in AE16000 - AG1600		1° paso 16 in PV, AE1600	
							2° paso 8 in PV, BW30-LE440 Y	
Capacidad	5 x 5.000 m ³ /día		1 x 20.000 m ³ /día 1 x 5.000 m ³ /día		5 X 5.000 m ³ /día		1 X 25.000 m ³ /día	
Caudal de permeado [m ³ /h]	1.224							
SEC planta [kWh/m ³]	4,15		2,84		3,60		3,79	
Concentración de Boro[mg/L]	0,54		0,87		0,22		0,24	
Tren	1-4	5	1 x 20.000	1 x 5.000	--		--	
SEC tren [kWh/m ³]	3,57	3,53	2,30	2,31	3,10		3,27	

4.4 Optimización de la localización del Split-Partial en el segundo paso

El uso del Split Partial en el segundo paso (Split Partial Second Pass, SPSP) se utiliza con el fin de mejorar la calidad del producto, es decir, el permeado de la parte frontal de PV se separa del permeado de la cola, siendo este último de peor calidad. Existe un amplio abanico de posibilidades sobre el qué hacer con el fluido de permeado de mayor concentración. Ya que mezclarlo con el permeado de la parte trasera del tubo de presión implica un fluido de una concentración intermedia, cuando se podría tener uno de excelente calidad y otra de menor calidad.

En el caso de que se decida obtener dos fluidos distintos, la cantidad extraída por cada uno de estos dos caudales de productos, puede regularse de forma activa con válvulas de control de flujo FCVs (Flow Control Valve) como se aprecia en la Figura 28.

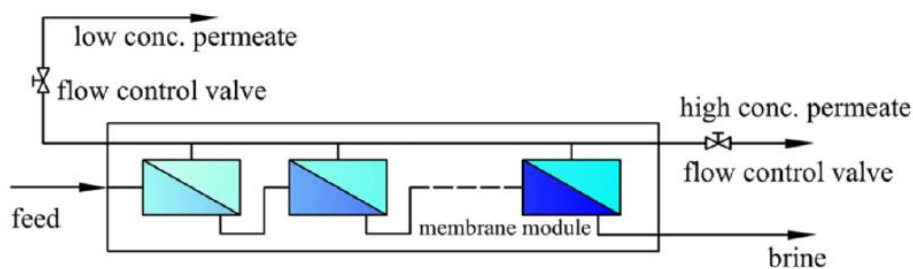


Figura 28. Funcionamiento de FCV [21].

La realización de un estudio sobre las posibles configuraciones y las características arrojó claridad sobre las múltiples configuraciones posibles con hasta 3 caudales distintos de permeados [21].

La justificación de este estudio y la influencia sobre el sistema global de colocar un divisor de corriente en el segundo paso se aprecia en la Figura 29, donde el rápido crecimiento de la concentración salina en el caudal de permeado que atraviesa la membrana queda de manifiesto.

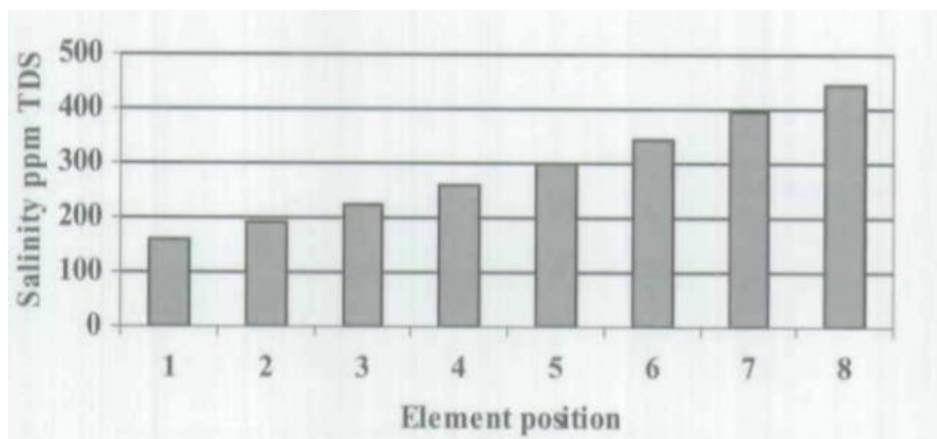


Figura 29. Aumento de la concentración en el permeado del segundo paso [22].

También se puede observar el descenso en el caudal de permeado conforme el fluido recorre la membrana como se aprecia en la siguiente Figura.

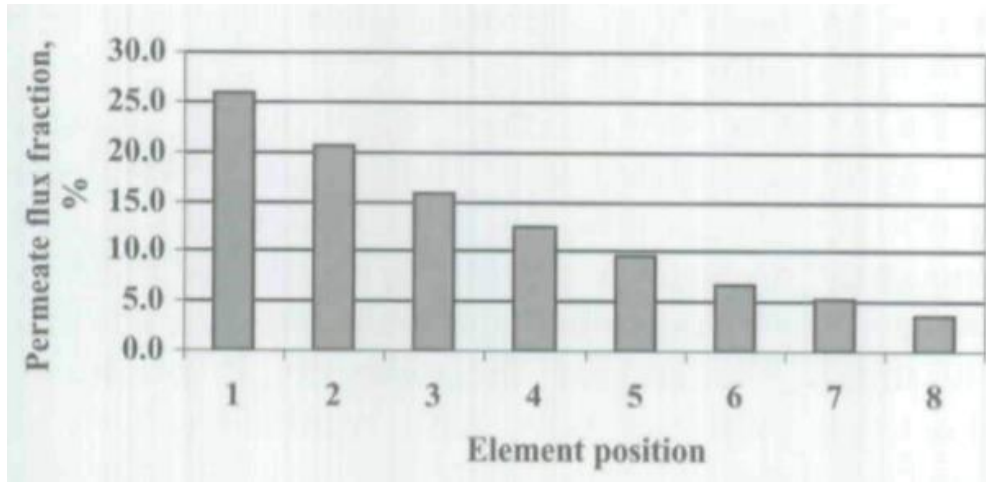


Figura 30. Evolución del caudal de permeado en el segundo paso [22].

Las dos últimas imágenes mostradas justifican la división del caudal permeado en el segundo paso, motivado por la gran diferencia de salinidad entre ambos caudales de productos. Lo que implicaría si no se separan el desperdicio de un pequeño caudal de altísima calidad.

En la Figura 31 se aprecia una solución obtenida con un único caudal de producto tras un proceso de simplificación y minimización de consumo energético.

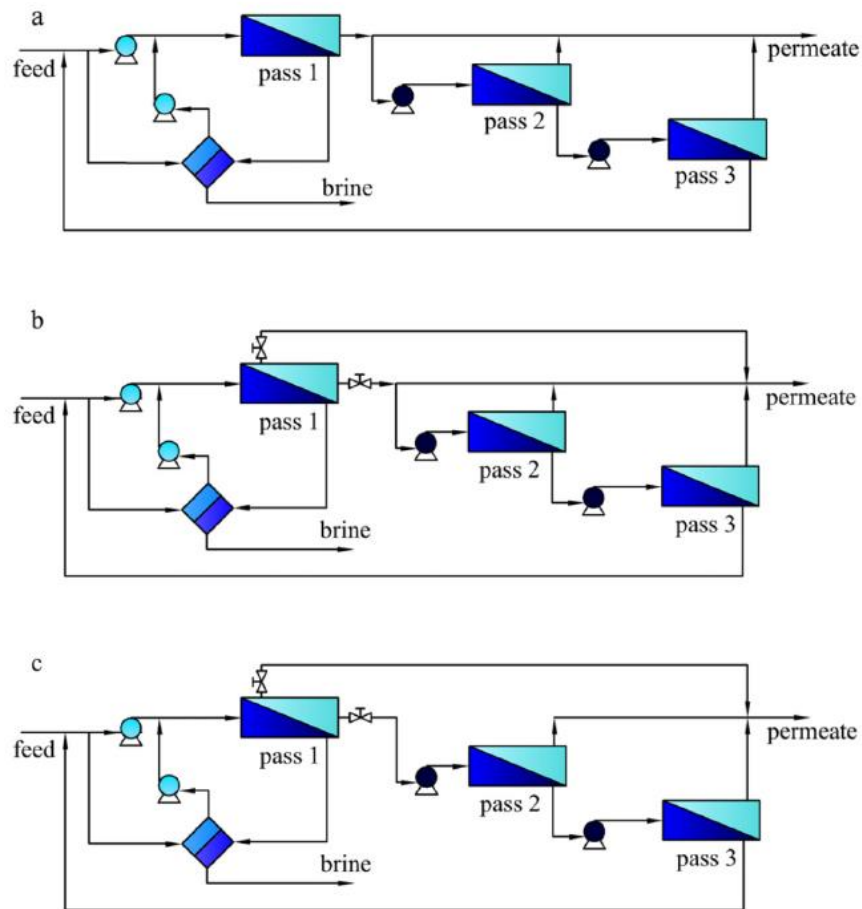


Figura 31. Posible configuración con un producto final [21].

En la anterior Figura, las tres configuraciones son alimentadas por un agua de mar de 35.000 ppm de concentración a 20 °C, donde se obtiene un caudal de 120 m³/h con una concentración que varía entre 0,05 y 0,2 kg/m³. Las características de cada una de estas configuraciones ante las distintas exigencias de calidad en el producto se aprecian en la Tabla 7.

Tabla 7. Características de las configuraciones propuestas con un producto [21].

TDS en producto [kg/m ³]	0,05		0,10		0,20	
Tipo configuración	Normal	SPSP	Normal	SPSP	Normal	SPSP
Layout	a	b	a	b	a	c
Alimentación [m ³ /h]	240,7	234,9	234,7	232,7	232,2	232,1
Recuperación del sistema [%]	49,9	51,1	51,1	51,6	51,7	51,7
Presión en 1º paso [MPa]	6,59	6,90	6,90	6,90	6,90	6,87
Presión en paso 2º [MPa]	1,14	1,18	1,10	1,24	1,16	1,41
Presión en 3º paso [MPa]	1,63	1,36	1,50	1,61	1,47	1,94
SEC [kWh/m ³]	3,47	3,47	3,46	3,34	3,30	3,16

Notas:

- La configuración “C” obtiene el menor valor de consumo de energía por m³ de caudal producido, además no requiere una mayor cantidad de agua de mar, lo que supondría elevar el coste en pre-tratamiento. Por el contrario, se obtiene una calidad de producto que puede quedar lejos de cumplir las legislaciones mas restrictivas.

En la siguiente Figura se aprecia un desglose de costes para las concentraciones de 0,05 o 0,20 kg/m³ propuestas anteriormente.

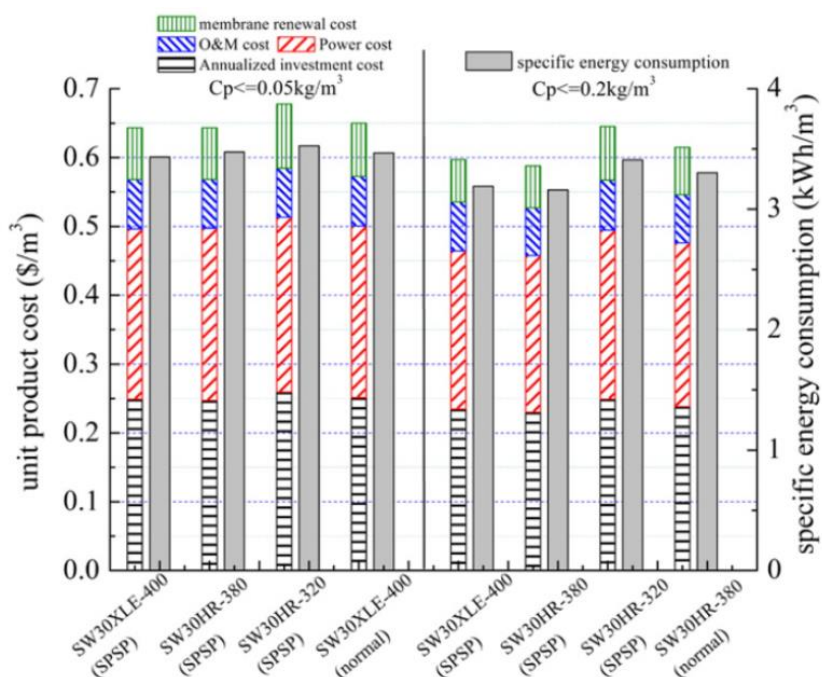


Figura 32. Desglose de costes en función de las membranas y configuración adoptada [21].

Si el diseño buscado obtiene dos productos diferentes que no se mezclan como en el caso anterior, en la Figura 33 se aprecia una configuración estándar frente a otra con un Split Partial.

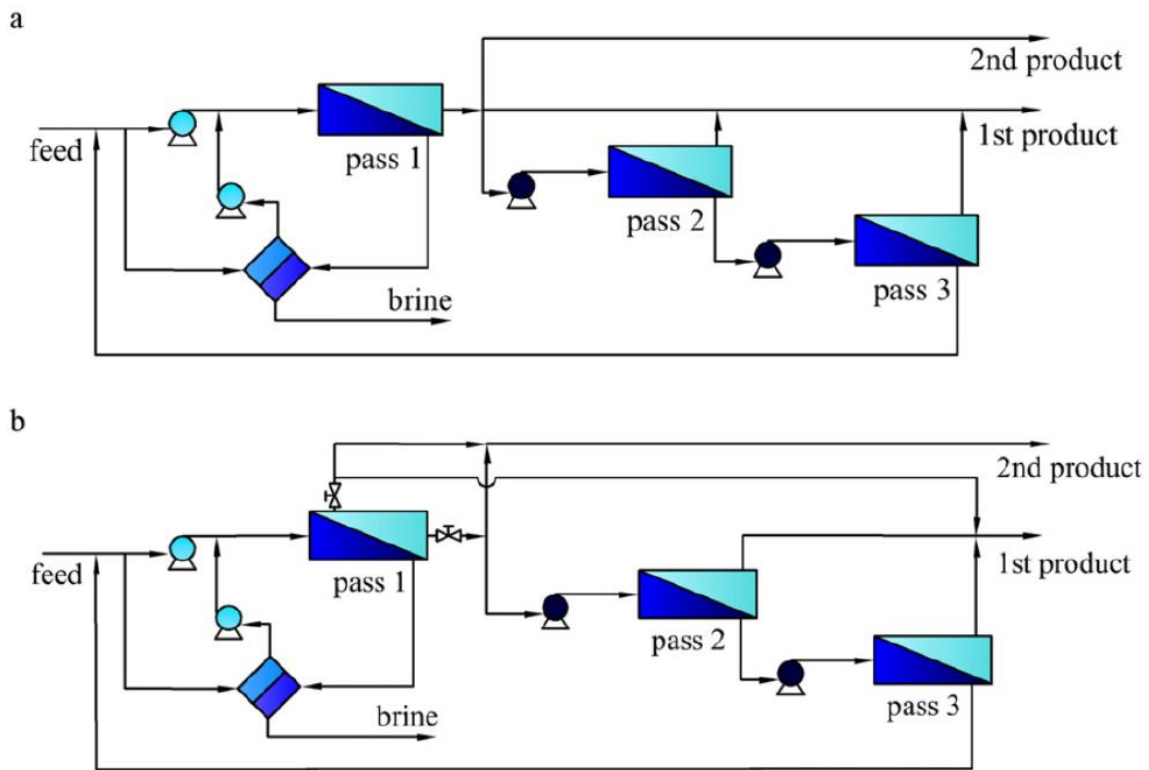


Figura 33. Posible configuración con dos productos finales [21].

Las características del agua de mar de alimentación son las mismas que en el caso anterior, los criterios de calidad en el primer y segundo producto son $0,50 \text{ kg/m}^3$ y $0,05 \text{ kg/m}^3$ respectivamente.

Tabla 8. Características de las configuraciones propuestas con dos productos [21].

Caudal en producto 1 [m^3/h]	60		200	
TDS en producto 1 [kg/m^3]	0,1		0,1	
Caudal en producto 2 [m^3/h]	120		80	
TDS en producto 2 [kg/m^3]	0,5		0,5	
Tipo configuración	Normal	SPSP	Normal	SPSP
Layout	a	b	a	b
Alimentación [m^3/h]	347,7	346,4	542,0	540,1
Recuperación del sistema [%]	51,8	52,0	51,7	51,9
Presión en 1° paso [MPa]	6,90	6,89	6,90	6,90
Presión en paso 2° [MPa]	1,03	1,19	1,17	1,27
Presión en 3° paso [MPa]	1,37	1,52	1,70	1,82
SEC [kWh/m^3]	3,11	3,04	3,30	3,22

Por último y de manera análoga, se plantean configuraciones alternativas a una planta en la que se desean obtener tres productos distintos.

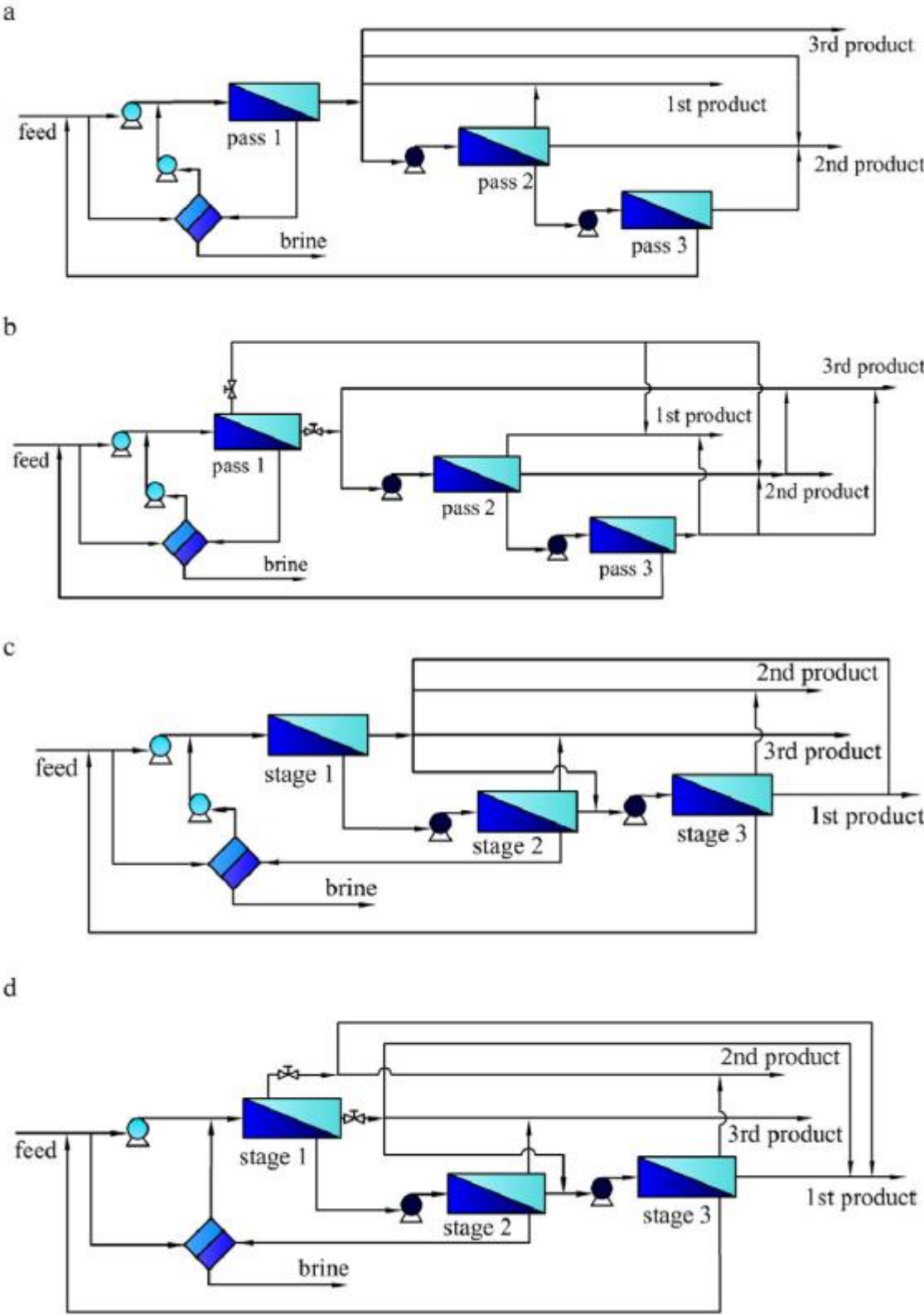


Figura 34. Posible configuración con tres productos finales [21].

Las condiciones de agua de mar continúan siendo las mismas que en los casos anteriores, y las propiedades de los caudales buscados y del sistema se pueden apreciar en la Tabla 9.

Tabla 9. Características de las configuraciones propuestas con tres productos [21].

Caudal en producto 1 [m ³ /h]	60		60	
TDS en producto 1 [kg/m ³]	0,05		0,05	
Caudal en producto 2 [m ³ /h]	120		60	
TDS en producto 2 [kg/m ³]	0,15		0,20	
Caudal en producto 3 [m ³ /h]	100		200	
TDS en producto 3 [kg/m ³]	0,50		0,50	
Tipo configuración	Normal	SPSP	Normal	SPSP
Layout	a	b	c	d
Alimentación [m ³ /h]	541,7	554,8	621,5	549,7
Recuperación del sistema [%]	51,7	50,5	51,5	58,2
Presión en 1° paso [MPa]	6,90	6,90	6,49	6,90
Presión en 2° paso [MPa]	1,12	1,08	6,97	7,44
Presión en 3° paso [MPa]	1,65	1,47	1,16	1,31
SEC [kWh/m ³]	3,25	3,18	3,20	3,23

En esta última comparación es donde existe una menor diferencia de la energía específica consumida. Siendo esta prácticamente constante para las 4 configuraciones propuestas bajo los requisitos de calidad y caudal requeridos.

En todos los casos presentados, se observa una clara tendencia a disminuir la potencia requerida en aquellas plantas donde se ha instalado la tecnología SPSP.

4.5 Split Partial en paso único

Una configuración novedosa es la aportada por Jungbin Kim y Seungkwan Hong [23], la justificación de dividir el flujo de permeado en un único paso no es otra que la de recircular el permeado de menor calidad, con el objetivo de diluir la alimentación al sistema, tratando así de reducir el consumo energético y consiguiendo de paso un permeado de mayor caudal.

Como se ha comentado previamente, la mayoría de las instalaciones hoy día tienen un único paso, fruto de las mejoras en las membranas experimentadas en los últimos años y la relajación de normativas específicas relacionadas de Boro. Sin embargo, en las zonas con alta concentración salina o exigentes criterios sobre la calidad del agua, se continúa empleando dos pasos.

En las plantas con dos pasos, se encuentra generalizado el uso de un by-pass en el segundo cuerpo de membrana por parte del caudal permeado en el primer paso como se aprecia en la Figura 35. También existe la posibilidad de diseñar de acuerdo a la tecnología SPSP (Split Partial Second Pass) mediante el cual se separa el permeado de la parte frontal del primer paso del permeado de la parte trasera, este último de menor calidad es el que aguas abajo volverá a atravesar un nuevo paso, esta configuración se puede apreciar en la Figura 36.

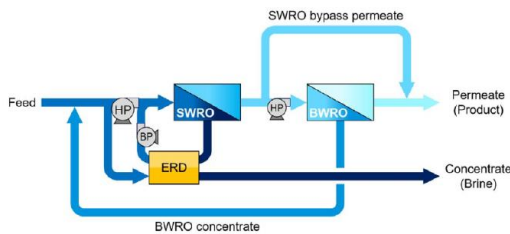


Figura 35. Configuración Partial two pass [23].

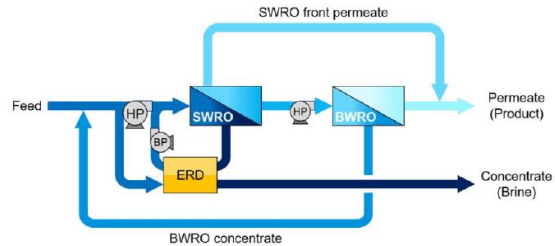


Figura 36. Configuración SPSP [23].

Finalmente el producto de ambos pasos se une y el rechazo del segundo paso se recircula a la entrada, existiendo una diferencia considerable entre la concentración de ambos fluidos.

Y es en relación con esta última idea el motivo del nacimiento y planteamiento de la tecnología SSP (Split Partial Single Pass).

La diferencia entre SSP y SPSP es que el permeado de la parte trasera de la membrana no es la alimentación de un segundo paso, sino que se recircula para diluir la entrada del sistema, en la Figura 37 se puede apreciar la propuesta de SSP.

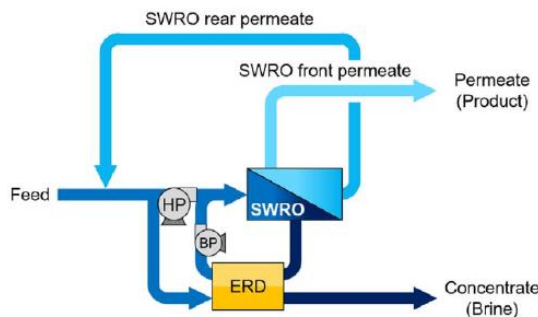


Figura 37. Configuración SSP [23].

Aunque el permeado de la parte trasera del tubo de presión tiene una concentración mucho mayor que el que se obtiene como producto en la configuración propuesta, aún está muy lejos de la concentración de la alimentación típica de 35.000 ppm, por lo que de la mezcla de ambos fluidos resulta un producto con menor concentración que la alimentación original, lo que se traduce en una menor presión osmótica, es decir, se requiere una menor presión hidráulica en esta corriente para lograr la misma NDP (Net Driving Pressure), motor del proceso de ósmosis como se explicó en el punto 2. Conceptos previos.

Una menor presión hidráulica significa menor potencia requerida, aunque como resultado de recircular parte del permeado que podría considerarse como producto final es desechado, la cantidad de agua desalada que se obtiene como producto final disminuye, por lo que será necesario un estudio por minorizado para saber si el SEC que se obtiene bajo la configuración propuesta es mayor o menor.

Además de la pérdida de producto final se plantean problemas tecnológicos como transportar el permeado que va a recircularse desde el final del conducto de presión hasta el inicio, donde se encuentra la alimentación, una solución a este problema queda esbozada por estos mismos autores que plantean esta tecnología, su propuesta es la de invertir el sentido a la mitad de estas membranas, como se puede apreciar en la siguiente Figura.

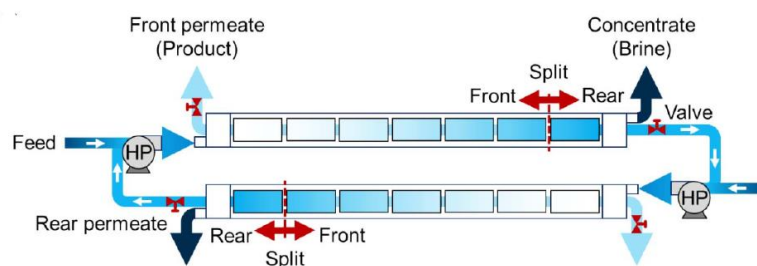


Figura 38. Configuración inversa propuesta para SPP RO [23].

Al eliminar la parte trasera del permeado que atraviesa la membrana, se consigue una mayor calidad del permeado y una distribución más uniforme del flujo de permeado a lo largo de la membrana, a continuación se justificará si a un mayor o menor coste.

En este estudio los autores emplean una concentración típica de 35.000 ppm a 25 °C, un valor de recuperación del 40% para SWRO y del 80% para BSW con membranas SW30HRLE-400i con valores calculados de A igual a 1,25 L/(m² bar) y B igual a 5,82 10⁻⁵ m/h y BW30-400 con valores de 3,29 L/m² y 1,92 10⁻⁴ m/h.

La presión osmótica a 35.000 ppm inicial es de 29,68 bar. Esta presión baja hasta 29,15 y 25,44 bar en el caso en los de SPP 7 o SPP 4-7, es decir, en los casos en los que se recircula el permeado del séptimo elemento o desde el cuarto elemento. Estos valores de presión corresponden con concentraciones de 34.375 ppm y 30.000 ppm. Las presiones hidráulicas necesarias en estos casos son de 53,43 , 52,64 y 47,15 bar, como se observa en la siguiente Tabla:

Tabla 10. Presión osmótica en función de SPP

Configuración	Concentración [ppm]	Π [bar]
Sin SPP	35.000	53,43
SPP-7	34.375	52,64
SPP 4-7	30.000	47,15

En las siguientes imágenes se observa la presión osmótica de cada elemento en función del elemento a partir del cual se recircula el permeado y el flujo de permeado a través de cada uno de los elementos.

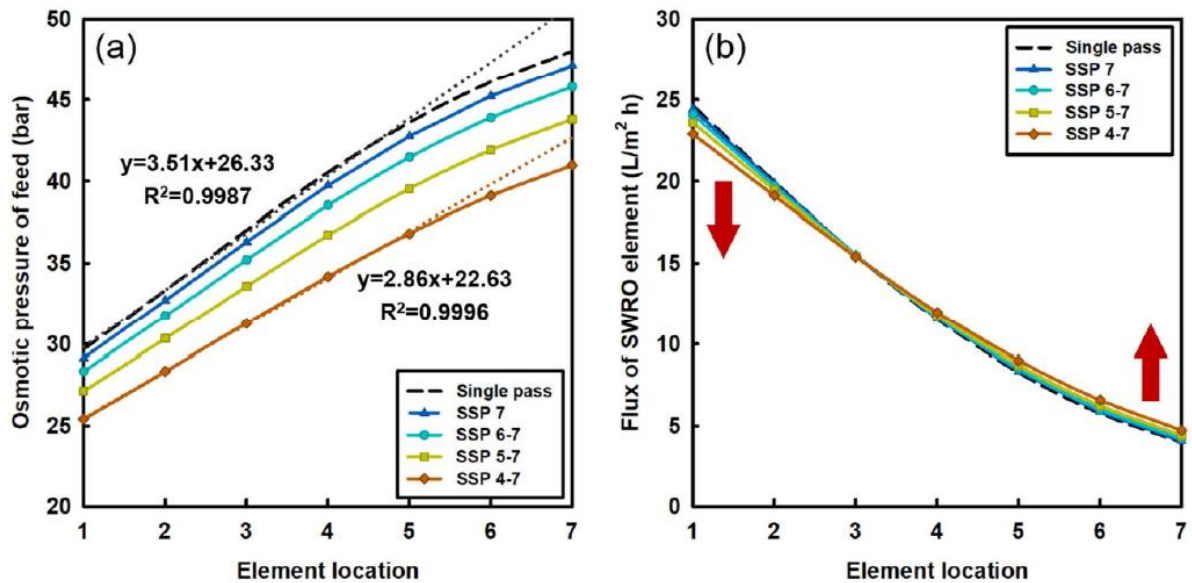


Figura 39. Influencia en la presión osmótica y flujo en función de la posición del SP [23].

Como se observa en la Figura 39, un menor número de elementos que contribuyan al producto final, es decir, una anterior colocación del Split Partial rebaja considerablemente la presión osmótica del fluido y equilibra la cantidad de permeado que atraviesa cada uno de los elementos.

Obviamente el consumo energético de esta tecnología es mayor que el de un solo paso, al existir más tránsito de flujo, con su consiguiente pérdida de presión, y una menor cantidad de producto. Por lo que la única posibilidad de éxito de este tipo de configuración es la obtención de un SEC menor que la de dos pasos, para atacar así las situaciones en las que se requiere una mayor calidad.

Bajo las condiciones expuestas, el sistema RO de una planta como la expuesta anteriormente consumiría en un paso $2,11 \text{ kWh/m}^3$, mientras que una de dos pasos entre $2,22$ y $2,71 \text{ kWh/m}^3$. Por lo que el margen en el que debe de situarse esta tecnología para que exista una posibilidad de que prospere está bien claro y se observa en la Figura 40.

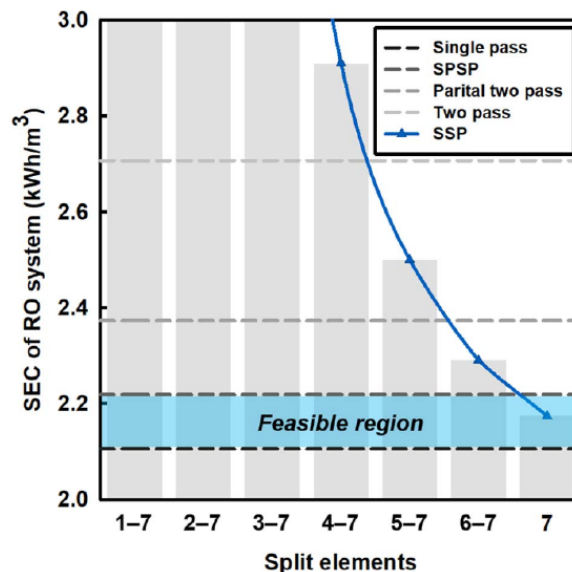


Figura 40. Comparación del consumo de la tecnología SPP en función de SSP [23].

Como se observa en la Figura 40, la opción más económica es la de recircular únicamente el permeado del último elemento. Además, este es el único que se encuentra en la franja de región factible comentada anteriormente y delimitada por las configuraciones de paso único y de SPSP.

En la siguiente figura, se observa un desglose de precios de las distintas tecnologías, donde se continúa demostrando la relevancia de la configuración propuesta y la ventaja que ofrece al ser la alternativa más barata con la que obtener una mayor calidad del producto que la configuración de paso único.

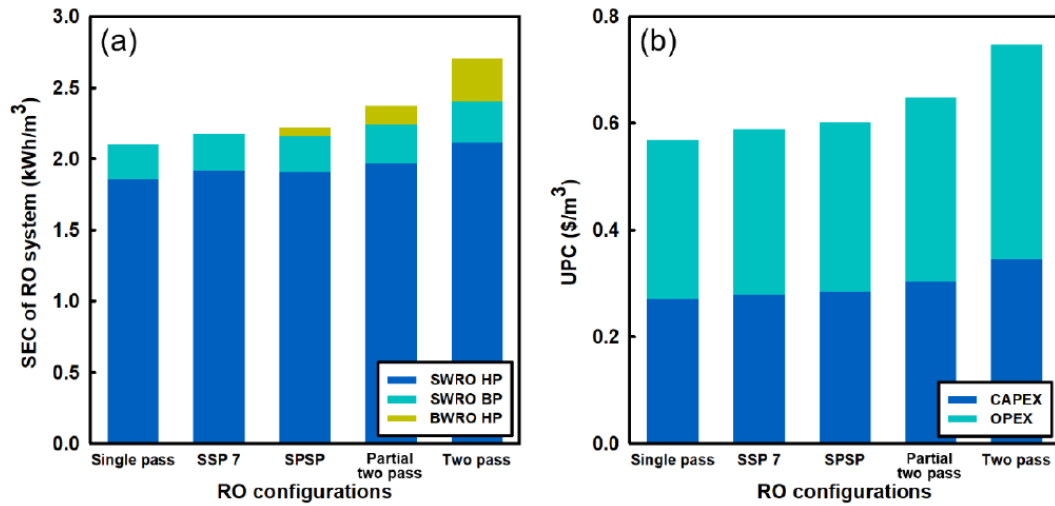


Figura 41. Desglose precios de distintas configuraciones [23].

5 MÉTODO DE CÁLCULO DE PERMEABILIDADES

El desarrollo de configuraciones alternativas e innovación en nuevos dispositivos requiere de la necesidad de mejorar las posibilidades de simulación de plantas, con el objetivo de predecir aquellas configuraciones que de verdad propongan valor añadido en el proceso productivo, bien sea a raíz de aumentar la producción o de reducir el consumo, y como ha quedado ya demostrado, para ello es necesario disponer de una caracterización completa de las membranas utilizadas.

Para el estudio de membranas, se parte del modelo de comportamiento de los módulos de membrana explicado íntegramente por Arturo Buenaventura en la tesis bajo el título “Technological challenges of seawater desalination: analysis of future opportunities” [24].

Partiendo de los conceptos teóricos anteriores, se propone un método original de cálculo iterativo, cuya filosofía es buscar los valores de permeabilidad que minimicen la diferencia porcentual entre los valores aportados, ya sean estos obtenidos en bibliografías, simulados con otro software u obtenidos experimentalmente, frente a los valores calculados.

Para comprobar en nivel de semejanza entre ambos métodos se estudiará la diferencia entre los valores aportados de forma externa “ x_i ” y los valores calculados “ y_i ”. Así como la diferencia porcentual r entre las variables de estudio.

Las ecuaciones de diferencia porcentuales empleada en ambos casos se observa a continuación:

$$r = \frac{x_i - y_i}{x_i} \quad (20)$$

En la primera iteración, será necesario introducir valores de permeabilidad iniciales para que pueda realizarse de forma correcta la primera iteración, en caso de no disponer de tales datos, puede recurrirse a introducir valores típicos de permeabilidad y esperar que en los posteriores procesos de optimización se encuentren aquellos que mejor definen la membrana en cuestión.

Una vez se han obtenido la primera parejas de valores, se va a proceder a realizar un estudio estadístico con el propósito de obtener valores de permeabilidad al agua y a las sales que minimiza la diferencia entre “ x_i ” e “ y_i ”, para lo cual se emplea el software SOLVER, haciendo uso del método de resolución “GRG no lineal” [24].

Este método se aplicará en primer lugar para la permeabilidad al agua, dejando constante la permeabilidad a las sales, debido a la dependencia mutua de estas variables. Una vez se localiza el óptimo para una de estas variables se procede de forma análoga con la segunda de estas.

Para el cálculo de permeabilidades, se busca minimizar la diferencia entre el caudal permeado “ x_i ” e “ y_i ”. En este caso, debido a la predominancia de los elementos en cabeza, donde el caudal de permeado es mucho más intenso, se estudia la diferencia en los 5 primeros elementos, experimentalmente se observa que este criterio es el que mejores resultados aporta y por tanto, este criterio es el que se adopta.

Con respecto a la permeabilidad a las sales, se trata de reducir la diferencia porcentual entre la concentración de permeado. Donde como se ha comentado anteriormente, el valor de r (%) será el objetivo para minimizar, obteniendo así los valores más parecidos posibles entre “ x_i ” e “ y_i ”.

En las siguientes Figuras se resume de forma gráfica las estrategias para lograr los valores de permeabilidad que mejor definen a la membrana.

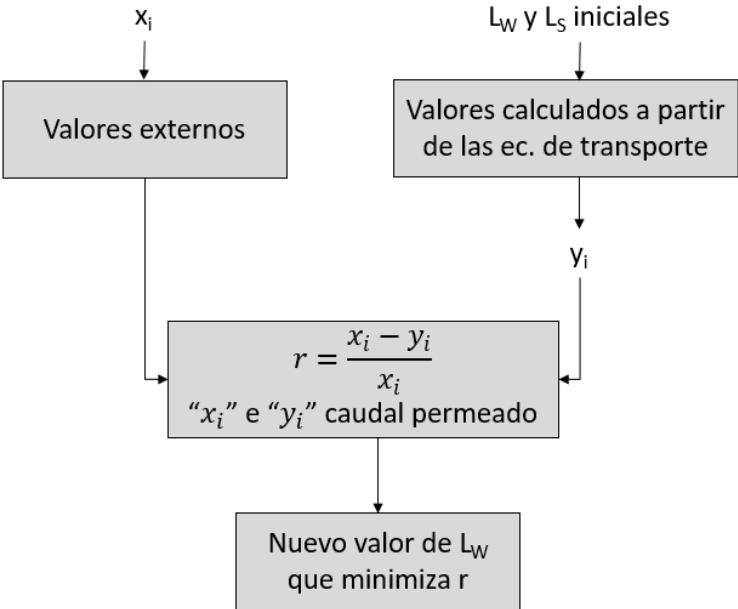


Figura 42. Estrategia de cálculo de L_w .

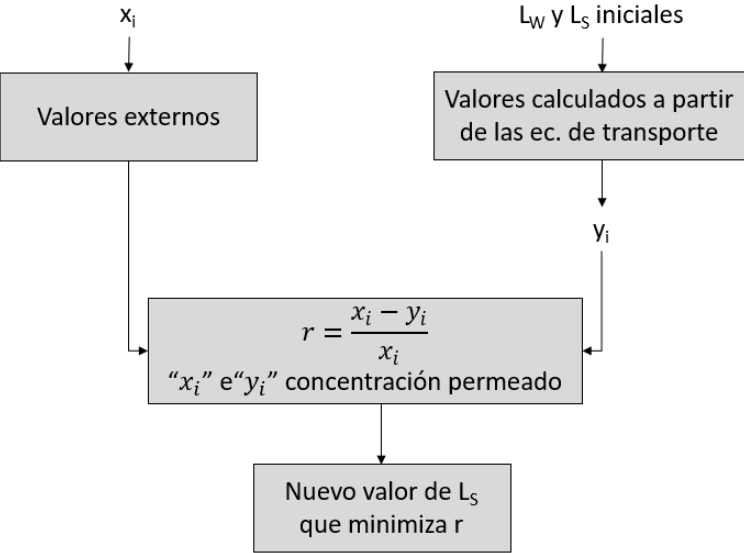


Figura 43. Estrategia de cálculo de L_s .

Como puede intuirse, este proceso es cíclico, ya que la mejora en uno de los valores tiene una incidencia directa en el cálculo de la otra variable, por lo que ahora es posible obtener un valor de esta segunda variable mucho más favorable que en el primer ciclo de optimización.

La sensatez de los valores obtenidos y la capacidad de reproducción de los datos externos a partir de los valores de permeabilidad calculado ponen de manifiesto el correcto funcionamiento de los métodos de cálculos implementados y criterios adoptados. Motivo por el que se decide crear un software propio que se base en estos cálculos. Tal y como se explica en el siguiente punto.

6 HERRAMIENTA PARA CÁLCULO DE PERMEABILIDADES

*“La simplicidad es la máxima sofisticación”
Leonardo da Vinci*

Pese a la gran cantidad de softwares que se emplean hoy día para el diseño o cálculo de procesos de R.O., el objetivo último de este trabajo es el desarrollo de un software propio. Para el contraste de este se empleará el software ROSA, uno de los softwares más extendidos y usados en la industria de la desalación y que pese al paso del tiempo, continúa siendo una de las herramientas más empleados.

Por ello, se ha realizado el desarrollo de un software propio en Visual Basic que ofrece los valores de permeabilidad al agua y sales a partir de los datos obtenidos en bibliografía, ofrecidos por otro software o datos experimentales obtenidos en un laboratorio.

6.1 Guía de uso del software para cálculo de permeabilidades

Los Datos requeridos en el software son:

- Caudal de alimentación.
- Presión de alimentación.
- Temperatura de alimentación.
- Caudal de permeado en cada uno de los elementos.
- Concentración del caudal de permeado en cada uno de los elementos.
- Presión del caudal de permeado.
- Características físicas de la membrana.
- Coeficiente de ensuciamiento.

Mientras que los datos de salida son la permeabilidad al agua y a las sales de la membrana. Así como la generación automática de gráficas que comparan los datos de caudal permeado y concentración de este caudal aportados con los calculados a partir de los valores de permeabilidad calculados.

El software desarrollado visto desde una hoja EXCEL tiene el aspecto que se observa en la Figura 44:

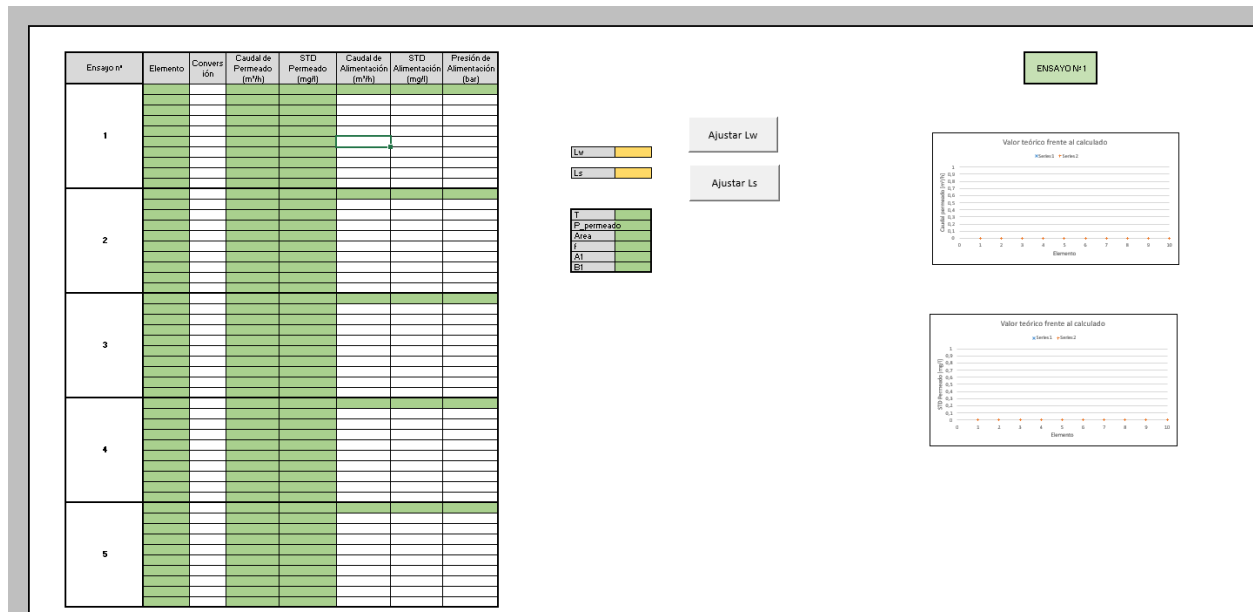


Figura 44. Aspecto de software de cálculo de permeabilidades.

Como se aprecia en la Figura 44, a la herramienta desarrollada se le puede alimentar con datos de hasta 5 ensayos distintos, obviamente todos ellos empleando la misma membrana, el propósito de esto es que se puedan obtener datos de la membrana en distintas condiciones de funcionamiento, así los valores de permeabilidades ofrecidos serán aquellos que mejor se ajustan a todas las condiciones bajo estudio.

Se recomienda la introducción de datos en distintas condiciones para obtener de esta manera una información más contrastada.

Las casillas en color verde son aquellas que son obligatorio rellenar, aunque no es necesario que sean siempre 10 módulos de membrana en serie, en este aspecto no existen restricciones y el proceso de optimización se realizará independientemente del número de elementos existentes.

Para el correcto desarrollo del proceso es necesario introducir un valor de permeabilidad al agua y a las sales en las casillas naranjas, en el caso de que se desconozcan estos valores se pueden introducir de forma azarosa, teniendo siempre en cuenta el orden de magnitud de dichas variables.

Una vez alimentado de forma correcta el software, ya se puede comenzar con el proceso de iteración.

Es posible empezar ajustando cualquiera de los dos valores pulsando el botón de “Ajustar L_w ” o “Ajustar L_s ”. Tras esto, aparece una ventana auxiliar que informa sobre si se ha encontrado una solución al problema, y se ofrece al usuario la posibilidad de mantener el antiguo valor de esta variable o sustituirlo por el nuevo, típicamente se sustituirá.

También se ofrece al usuario la posibilidad de generar informe de sensibilidad y otras opciones en caso de que se requiera más información.

Cuando se ha obtenido un valor para una de las dos permeabilidades, se actúa de forma análoga con la restante.

Una vez ajustada las dos, las condiciones iniciales del problema han cambiado, por lo que el proceso se repite de forma cíclica hasta que las soluciones ofrecidas por el software no disten de las existentes en el ciclo anterior.

Una vez finalizado el proceso, se han obtenido los valores de permeabilidad al agua y sales que minimizan la diferencia entre los valores aportados y los calculados, de acuerdo con las ecuaciones de transporte.

Finalmente, en la parte de la derecha se localizan numerosas gráficas que comparan los datos aportados y calculados, lo cual ofrece información al usuario sobre las posibles discrepancias existentes.

6.2 Ejemplo de aplicación

A continuación, se realiza una comparación para una membrana de cada una de las principales familias del mercado de un fabricante entre el modelo propuesto y la solución aportada por ROSA. Así, los elementos de membranas bajo estudio son:

- SW30XHR-440i.
- SW30XLE-440i.
- SW30ULE-440i.

La comparación se realiza para un agua de mar de las Islas Canarias, con un TDS de 37.128,32 mg/L y un pH de 7,5. En la siguiente Tabla se puedes apreciar todos los iones que conforman la concentración salina de dicha agua de mar.

Tabla 11. Composición del agua de las Islas Canarias. (Instituto Tecnológico de Canarias).

NH ₄	0,08 mg/L	HCO ₃	158,60 mg/L
K	438,00 mg/L	NO ₃	6,10 mg/L
Na	11.080,01 mg/L	Cl	20.926,31 mg/L
Mg	1.486,00 mg/L	F	1,71 mg/L
Ca	558,00 mg/L	SO ₄	2.400,00 mg/L
Sr	0,12 mg/L	SiO ₂	34,00 mg/L
CO ₃	5,53 mg/L	H ₃ BO ₃	30,31 mg/L

El estudio se realiza con una corriente de alimentación a 20°C, una superficie activa de 40,9 m² y un factor de flujo típico de 0,85. Se escoge una configuración formada por un único tubo de presión, compuesto por 7 elementos de la misma membrana, con distintos valores de caudal de alimentación y una tasa de recuperación del 45%.

Se realiza en primer lugar un estudio de la membrana SW30XHR 440i en 3 situaciones distintas, como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Casos de estudio para validar método de cálculo.

Caso	Q _f [m ³ /h]	r [%]
1	6	45
2	8	45
3	10	45

Mediante ROSA, se obtiene el caudal permeado para la membrana SW30XHR-440i en las tres condiciones de caudal comentadas con anterioridad, como se observa en la Figura 45.

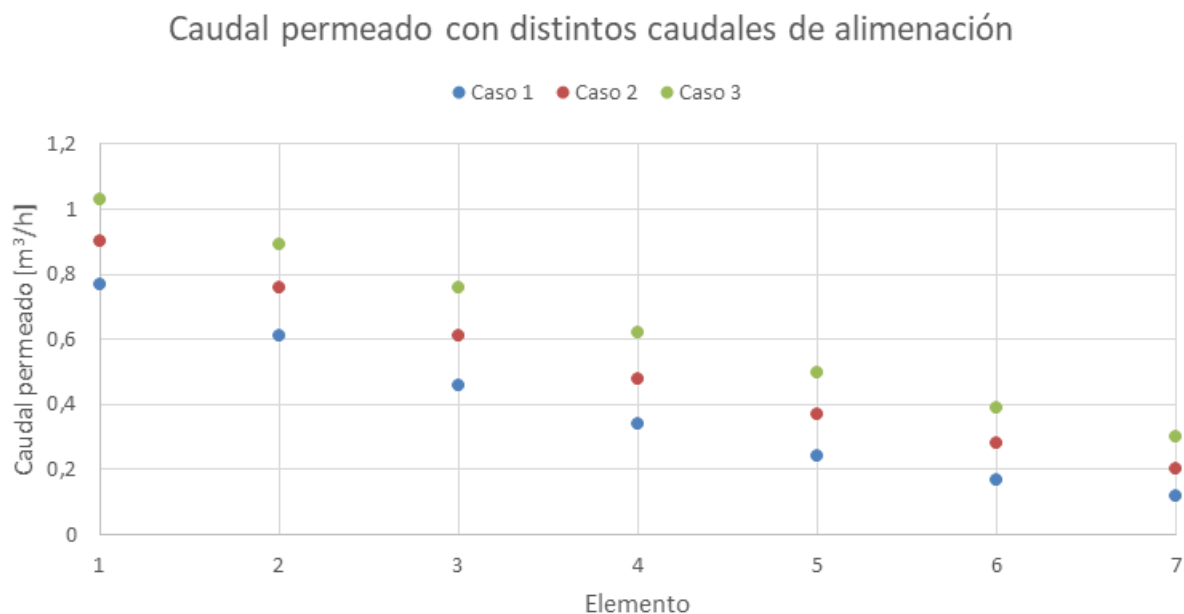


Figura 45 Caudal de permeado para la membrana bajo los casos de estudio.

A continuación, basándose en las ecuaciones de transferencia de masa explicadas en el punto 2. Conceptos previos, se tratará de obtener unos valores de permeabilidad al agua y sales que minimice la diferencia entre los valores aportados por el programa ROSA (x_i) y los calculados mediante el método de cálculo propuesto (y_i).

El algoritmo implementado trata de minimizar la diferencia entre los valores aportados por ROSA y los valores calculados. Tratando de reducir la diferencia para cada elemento entre los caudales de agua permeada y la concentración de estos.

Los resultados obtenidos por ROSA para el primero de los casos se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 13 Resultados de ROSA caso 1 y membrana SW30ZHR 440i.

Elemento	Conversión	Caudal de Permeado [m³/h]	STD Permeado [mg/L]	Caudal de Alimentación [m³/h]	STD Alimentación [mg/L]	Presión de Alimentación [bar]
1	0,13	0,77	85,95	6,00	37.124,78	52,28
2	0,12	0,61	120,16	5,23	42.546,31	52,13
3	0,10	0,46	172,33	4,63	48.124,31	52,00
4	0,08	0,34	252,18	4,16	53.446,93	51,89
5	0,06	0,24	373,32	3,83	58.140,01	51,80
6	0,05	0,17	553,42	3,59	61.994,08	51,71
7	0,04	0,12	788,29	3,42	64.990,96	51,63

Obteniéndose un caudal total de permeado de 2,71 m³/h.

La membrana en cuestión queda definida a partir de los siguientes valores se observa en la siguiente Tabla [25]:

Tabla 14. Característica membrana propuestas en BIBLIOGRAFIA para SW30HRLE 440i.

Membrana	L_w [L/(m ² h bar)]	L_s [L/(m ² h)]	A_1 [bar]	B_1	CPF
SW30HRLE 440i	1,08	0,036	0,06179	0,8147	1,25 r _v + 0975

A partir de los valores de la anterior se obtiene una primera solución y_i , la cual se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Resultados obtenidos tras primera iteración.

Elemento	Conversión	Caudal de Permeado [m ³ /h]	STD Permeado [mg/L]	Caudal de Alimentación [m ³ /h]	STD Alimentación [mg/L]	Presión de Alimentación [bar]
1	0,13	0,79	70,99	6,00	37.124,78	52,28
2	0,12	0,61	103,23	5,21	42.769,11	52,01
3	0,10	0,45	155,07	4,60	48.447,60	51,77
4	0,08	0,31	232,44	4,15	53.673,33	51,56
5	0,06	0,22	356,01	3,83	58.029,92	51,36
6	0,05	0,15	533,02	3,61	61.541,77	51,18
7	0,03	0,11	787,83	3,46	64.207,48	51,00

Como se aprecia en la Tabla anterior, los resultados obtenidos son muy parecidos a los obtenidos mediante el software ROSA. Con un caudal permeado de 2,64 m³/h.

A continuación, se realiza el proceso de optimización de los valores de permeabilidad al agua y sales, para obtener así una pareja de valores x_i e y_i lo más parecidos posibles. Los resultados obtenidos tras cada una de estas iteraciones se observan en la siguiente Tabla.

Tabla 16. Resultado de cada una de las iteraciones, caso 1.

	L_w [L/(m ² h bar)]	L_s [L/(m ² h)]
1° iteración	1,0800	0,0360
2° iteración	0,9991	0,0396
3° iteración	1,0023	0,0396

En este caso, tras tres iteraciones se obtiene la solución óptima del problema, la diferencia porcentual entre los valores x_i e y_i obtenidos en cada una de las iteraciones, tanto en el caudal permeado como en la concentración de este se observa en la siguiente Tabla.

Tabla 17. Diferencia entre x_i e y_i en cada iteración, caso 1.

Elemento	1° iteración		2° iteración		3° iteración	
	Dif. $q_{v,w}$	Dif C_P	Dif. $q_{v,w}$	Dif C_P	Dif. $q_{v,w}$	Dif C_P
1	3%	17%	3%	9%	3%	9%
2	0%	14%	3%	6%	2%	6%
3	2%	10%	1%	2%	1%	2%
4	8%	8%	2%	0%	2%	0%
5	8%	5%	0%	4%	0%	4%
6	11%	4%	1%	5%	2%	5%
7	12%	0%	2%	10%	2%	10%

Como se puede observar en la Tabla 17, en cada iteración se obtienen mejores resultados promedios, entendiendo como mejor resultado aquellos que más se aproximan a los ofrecidos por ROSA, es decir, aquellos que cuentan con una menor diferencia porcentual.

Hasta ahora, al software desarrollado solo se le ha alimentado con valores de un único caso de estudio, el caso 1 con un caudal de alimentación de $6 \text{ m}^3/\text{h}$. Sin embargo, este software está diseñado para permitir la entrada de datos propios de diferentes ensayos, por ejemplo, se puede alimentar de los casos 1, 2 y 3 de forma simultánea, ofreciendo como solución aquellos valores de permeabilidad al agua y las sales que minimiza la diferencia total de todos los casos alimentados.

Así, para su aplicación en un caso real donde se obtienen datos de laboratorio a diferentes caudales de alimentación, se obtendrá unos valores característicos que definen la membrana en todo ese rango de ensayo.

Los resultados obtenidos en cada una de las iteraciones cuando el software es alimentado con la información de los casos 1, 2 y 3 de forma simultánea son los que se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 18. Resultado de cada una de las iteraciones, casos 1, 2 y 3.

	L_w [L/($\text{m}^2 \text{ h bar}$)]	L_s [L/($\text{m}^2 \text{ h}$)]
1° iteración	1,0800	0,0360
2° iteración	0,9768	0,0397
3° iteración	0,9713	0,0397
4° iteración	0,9716	0,0397

Con los valores obtenidos tras la última iteración, se pueden representar en una misma gráfica los valores de caudal permeado para cada caso de estudio y observar así la correspondencia entre los valores x_i e y_i .

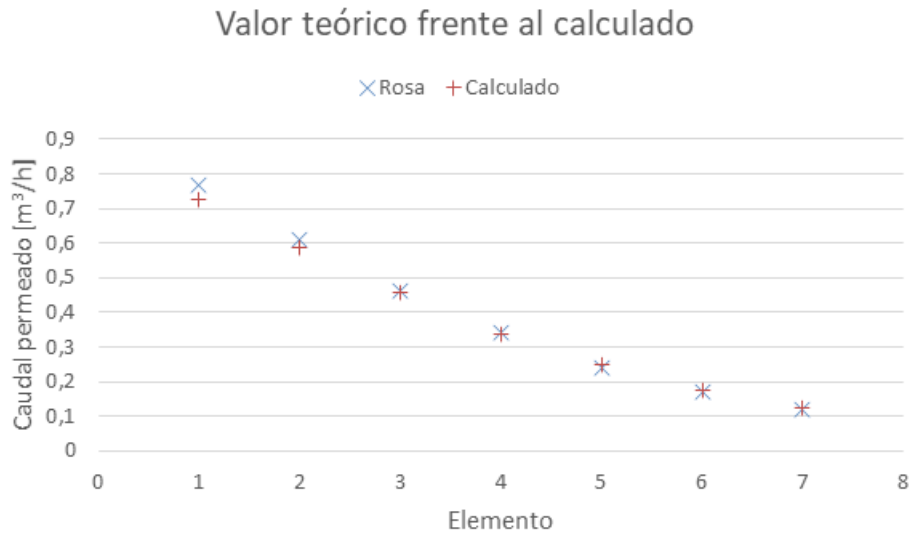


Figura 46. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 1, SW30XHR-440i.

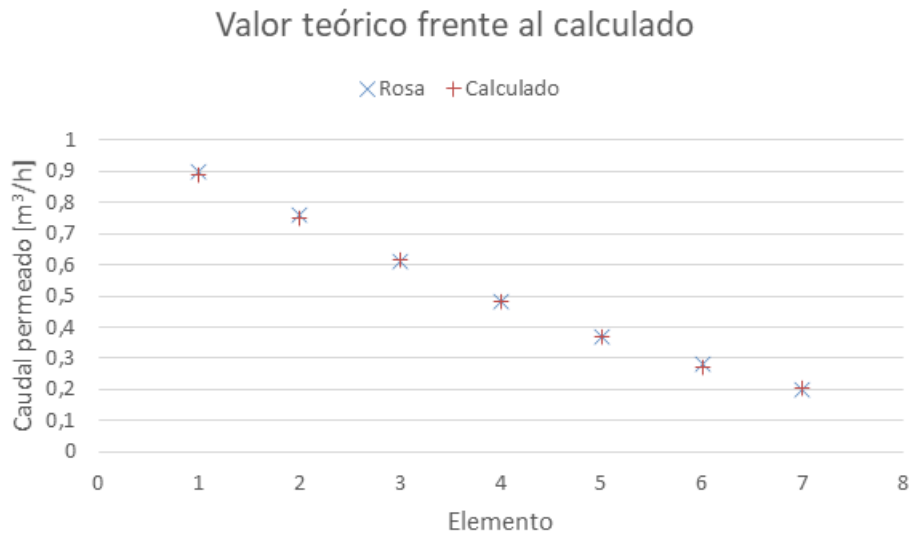


Figura 47. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 2, SW30XHR-440i.

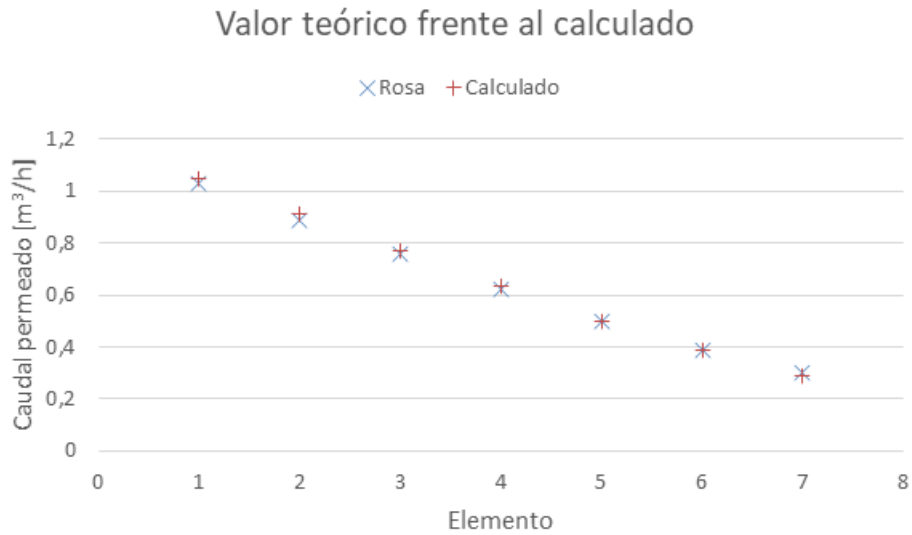


Figura 48. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 3, SW30XHR-440i.

Respecto a la concentración en el caudal de permeado, ecuación gobernada por la permeabilidad a las sales podemos realizar un estudio análogo.

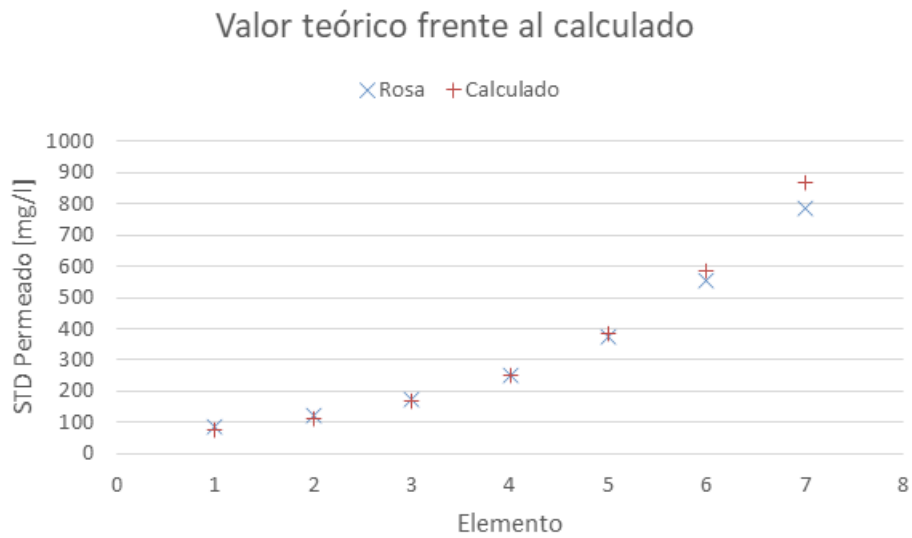


Figura 49. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 1, SW30XHR-440i.

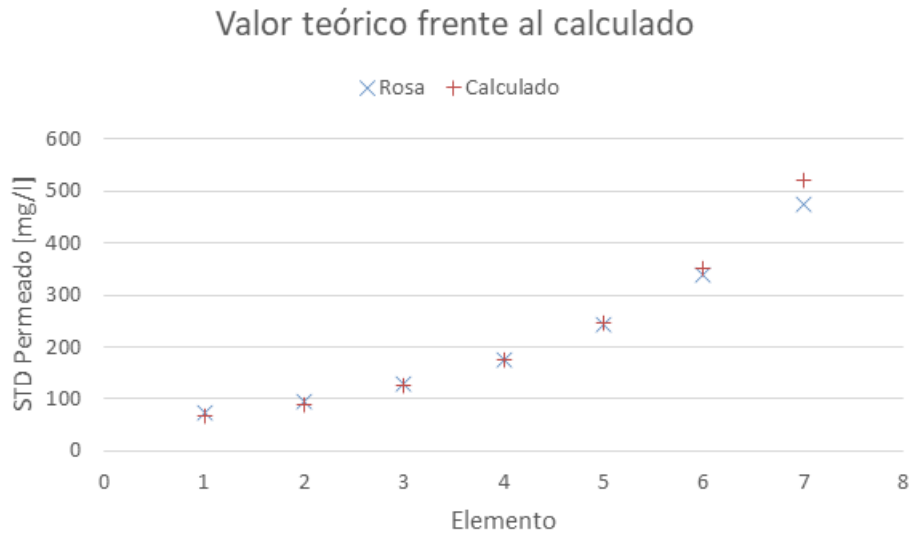


Figura 50. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 2, SW30XHR-440i.

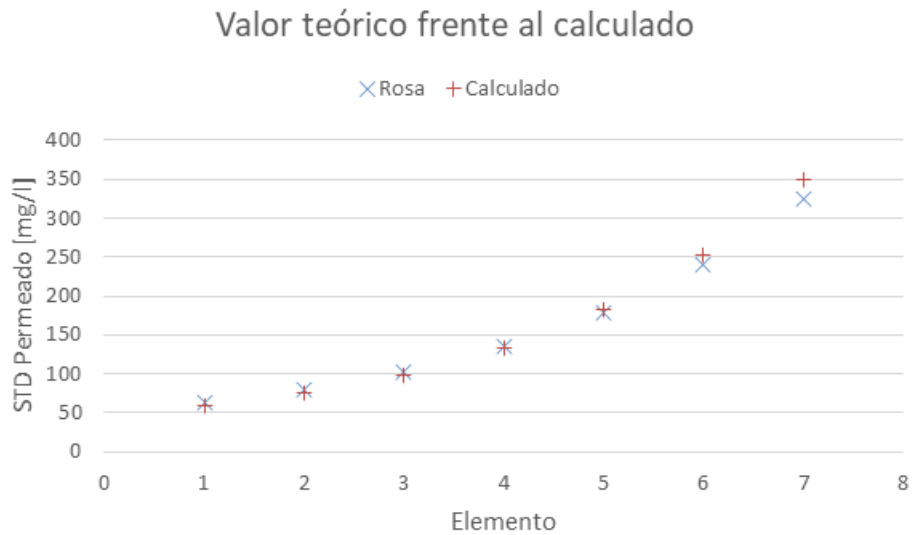


Figura 51. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 3, SW30XHR-440i.

Del conjunto de Figuras anteriores, se observa como los resultados resultan casi idénticos entre ROSA y el software desarrollado, con una leve diferencia en los elementos de la cola, los cuales tienen los menores caudales de permeado y por tanto, una menor relevancia en el resultado global.

Tras haber realizado un estudio completo de la membrana SW30XHR-440i, ahora se va a realizar un estudio análogo para la membrana SW30XLE-440i, obteniéndose los valores de permeabilidad en cada iteración y las tablas que relacionan los datos x_i e y_i , en la Tabla 19 se muestran los valores de cada ciclo de iteración.

Tabla 19. Resultado de cada una de las iteraciones, casos 1, 2 y 3, SW30XLE-440i.

	L_w [L/(m ² h bar)]	L_s [L/(m ² h)]
1º iteración	1,3700	0,0425
2º iteración	1,2288	0,0459
3º iteración	1,2153	0,0460
4º iteración	1,2149	0,0460
5º iteración	1,2148	0,0460

En las siguientes gráficas se observa una comparación entre los valores de ROSA y los calculados.

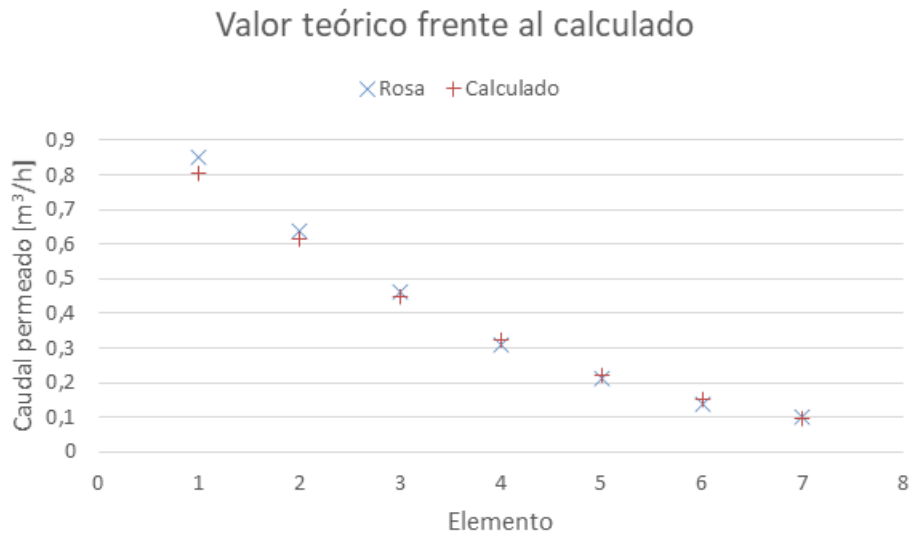


Figura 52. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 1, SW30XLE-440i.

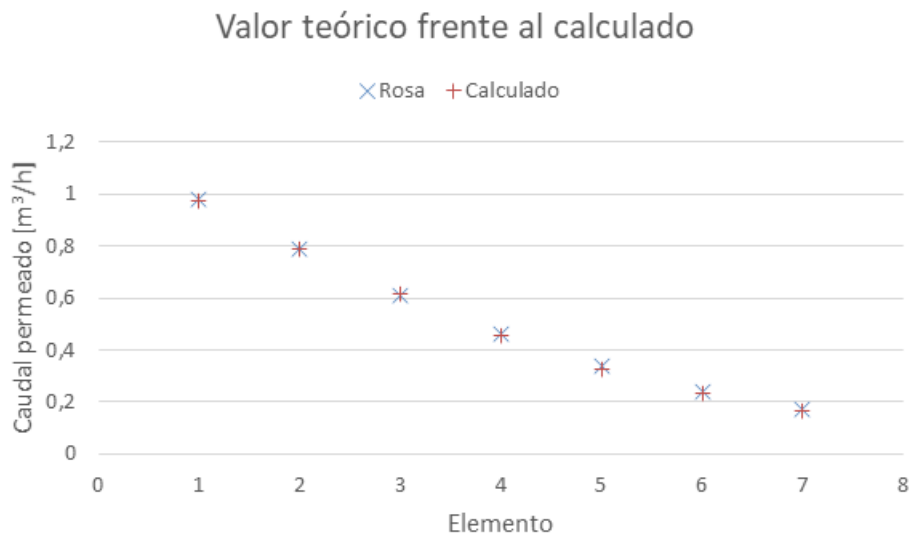


Figura 53. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 2, SW30XLE-440i.

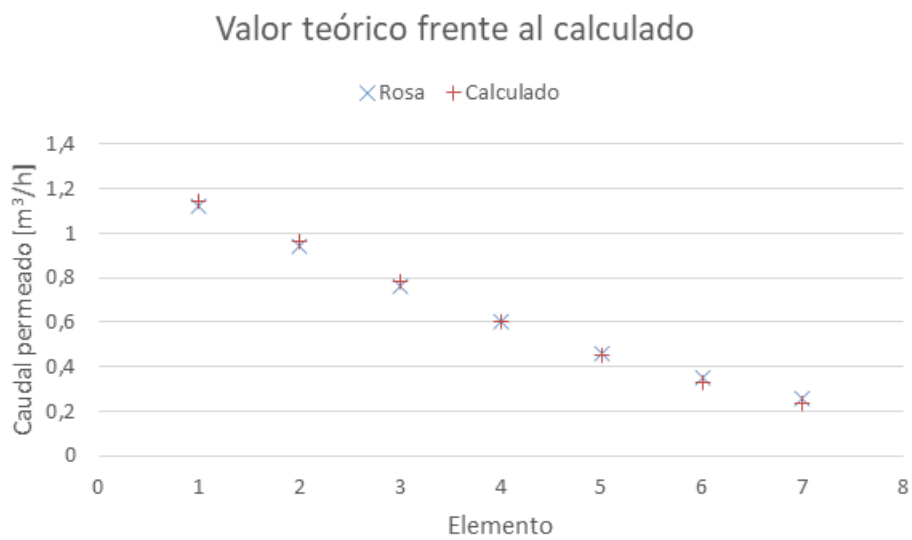


Figura 54. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 3, SW30XLE-440i.

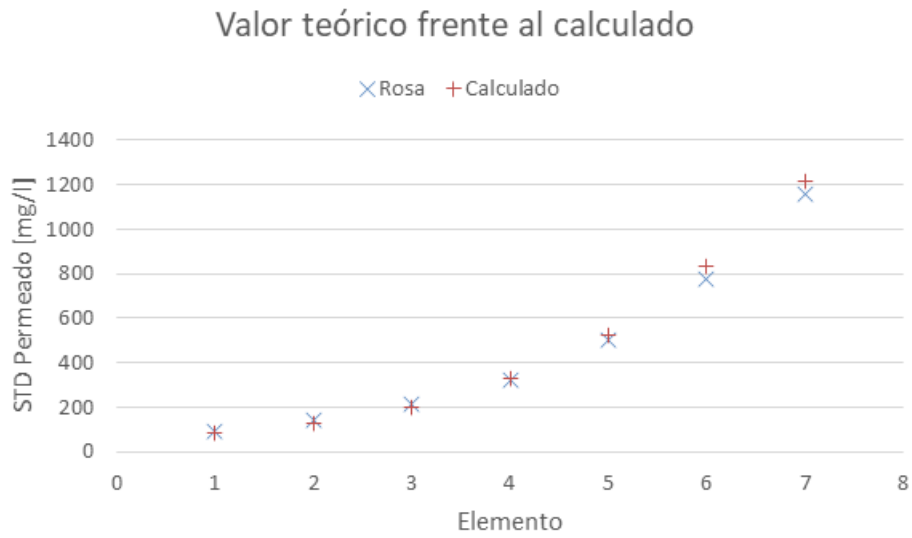


Figura 55. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 1, SW30XLE-440i.

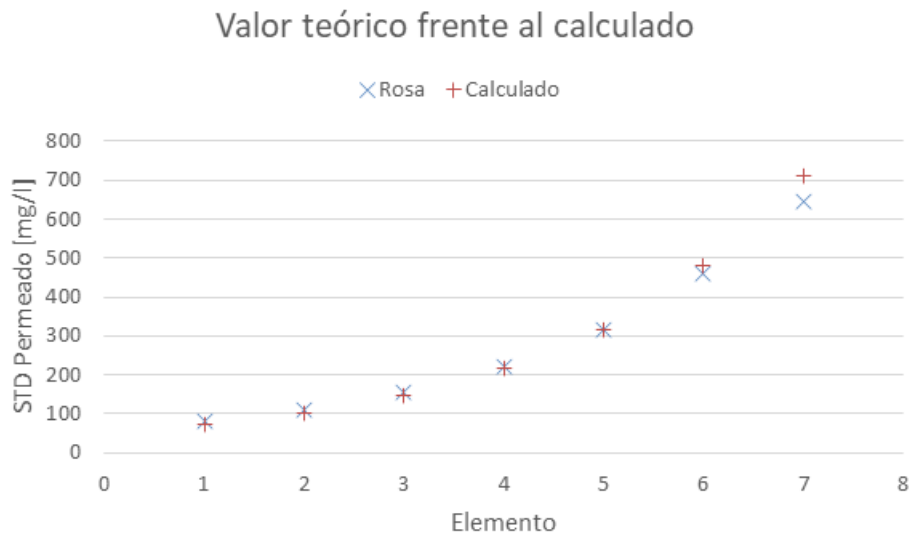


Figura 56. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 2, SW30XLE-440i.

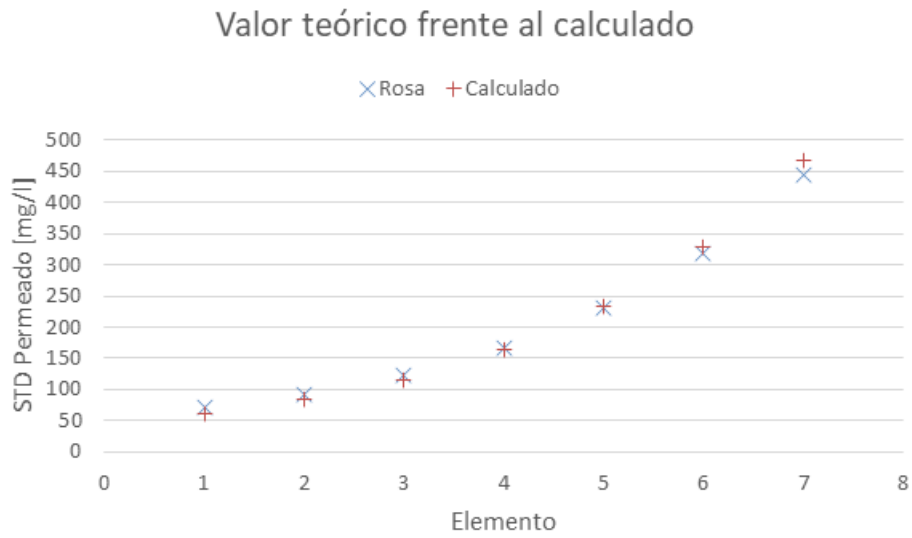


Figura 57. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 3, SW30XLE-440i.

Por último, se realiza el mismo estudio para la membrana SW30ULE-440i.

Tabla 20. Resultado de cada una de las iteraciones, casos 1,2 y 3, SW30ULE-440i.

	L_w [L/(m ² h bar)]	L_s [L/(m ² h)]
1° iteración	1,7600	0,0760
2° iteración	1,4970	0,0811
3° iteración	1,4992	0,0811

Como en los casos anteriores, se muestran las Figuras que justifican la validez de los valores calculados.

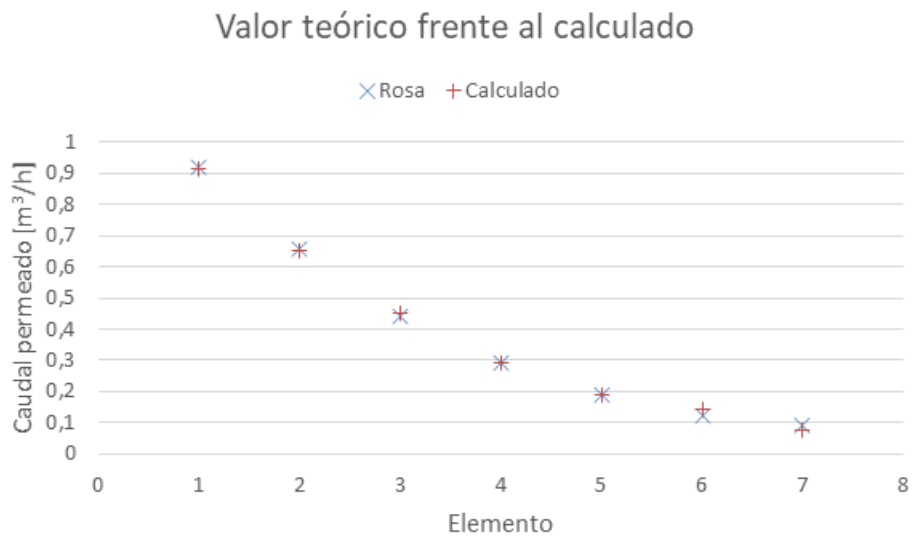


Figura 58. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 1, SW30ULE -440i.

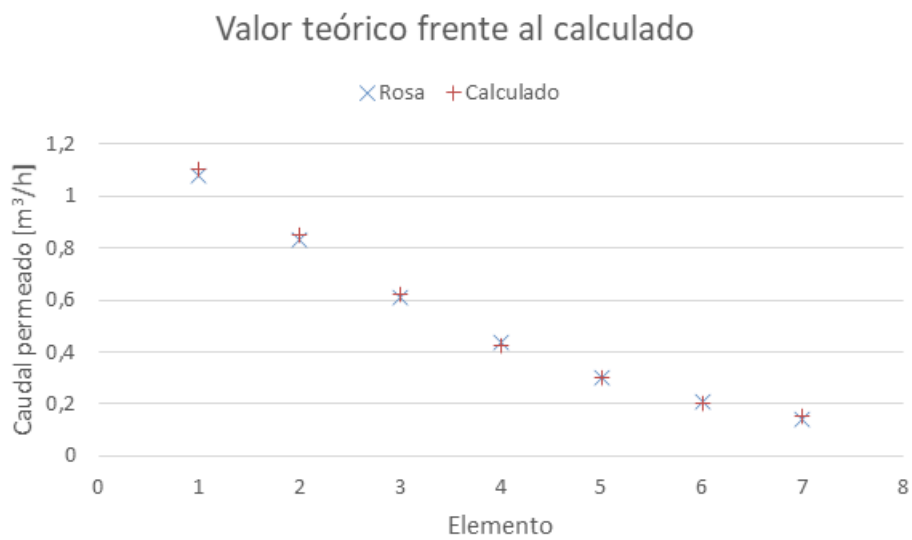


Figura 59. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 2, SW30ULE -440i.

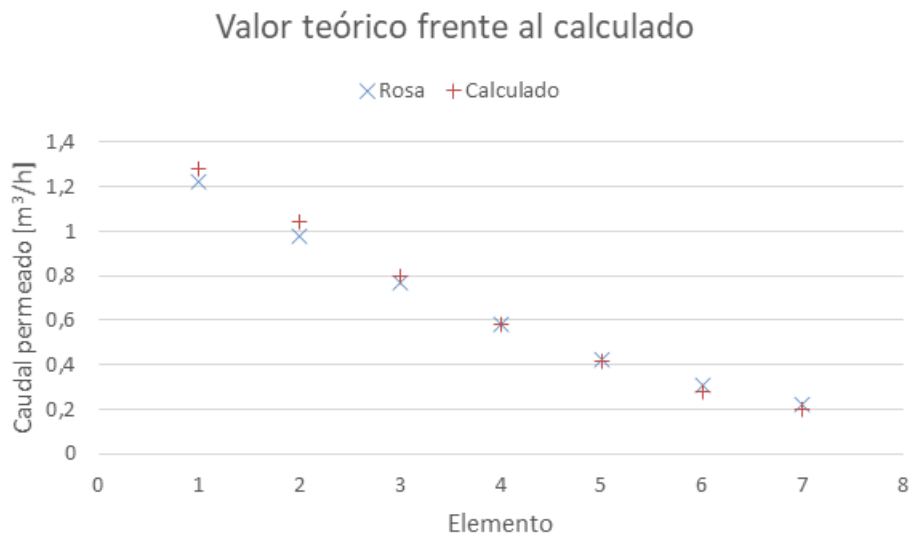


Figura 60. Valores de caudal permeado x_i e y_i , caso 3, SW30ULE -440i.

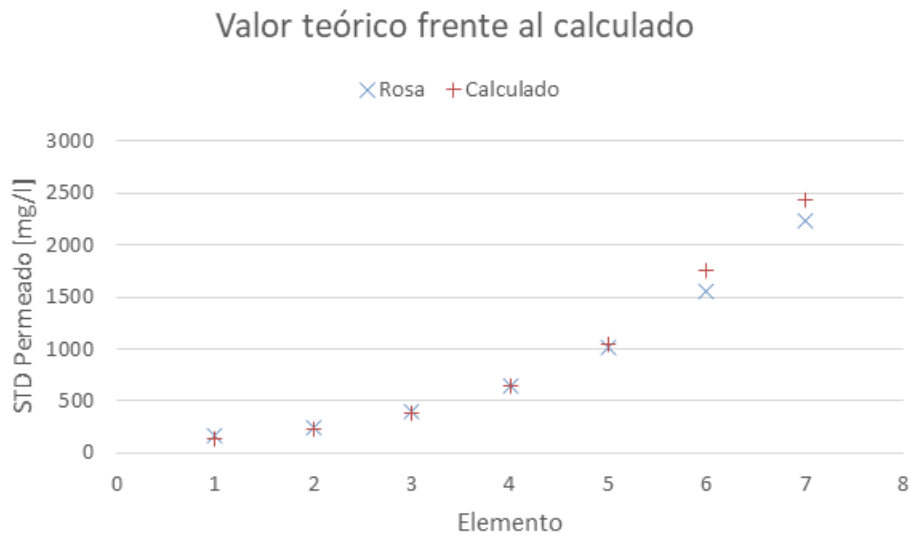


Figura 61. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 1, SW30ULE -440i.

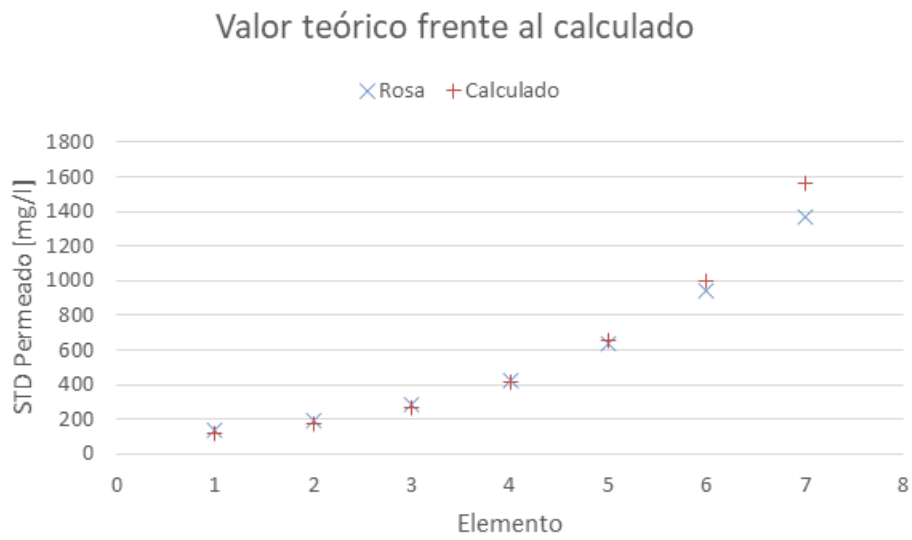


Figura 62. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 2, SW30ULE -440i.

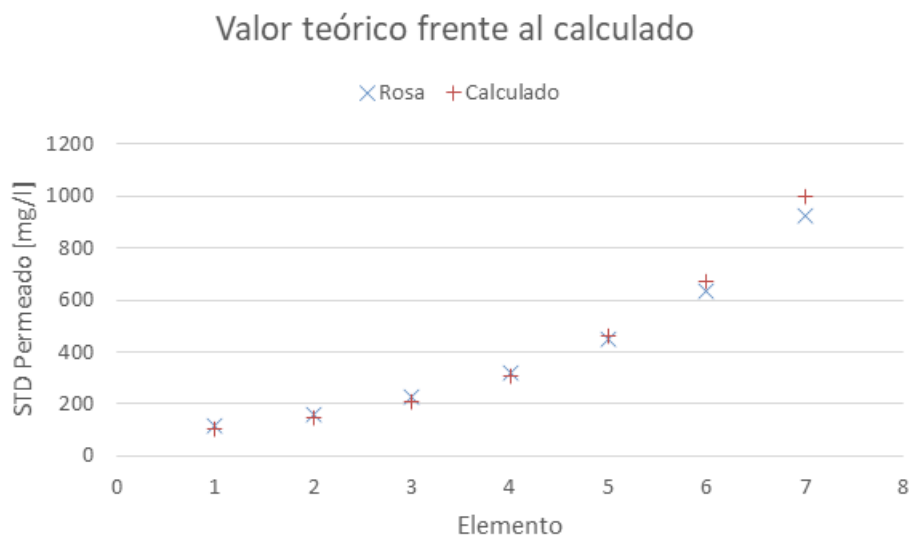


Figura 63. Valores de concentración permeado x_i e y_i , caso 3, SW30ULE -440i.

7 HERRAMIENTA DE USO INDUSTRIAL PARA CÁLCULO DE PERMEABILIDADES

*“La simplicidad es la máxima sofisticación”
Leonardo da Vinci*

La herramienta mostrada anteriormente trata de asimilar elemento a elemento cada uno de los parámetros de estudio. Con el objeto de obtener valores de permeabilidad que minimicen las diferencias entre los valores teóricos y experimentales.

El gran problema del software desarrollado en el punto anterior es la obtención de datos, si estos se obtienen de otro software no existe problema, pero si se tratan de obtener de un caso real puede resultar imposible obtener los datos de permeabilidad y concentración de dicho caudal en cada una de las membranas si no es en un laboratorio especializado.

Es por ello por lo que se desarrolla un segundo software, con la misma misión que el primero pero afrontando el proceso de cálculo con una filosofía totalmente distinta.

El método de cálculo propuesto solo necesita como datos de entrada aquella información que puede recopilarse aguas arriba y aguas debajo de la membrana, siendo esta:

- Caudal de alimentación.
- Presión de alimentación.
- Concentración de alimentación.
- Caudal de permeado.
- Concentración de permeado.
- Datos físicos de la membrana.

7.1 Método de cálculo del software de uso industrial para cálculo de permeabilidades

En el caso más probable en el cual únicamente se conocen los datos de entrada y salida, solo se puede aspirar a que el caudal total permeado sea el mismo, sin entrar a valorar si este se produce con más intensidad en los elementos de la cabeza o de forma más homogénea, cosa que si se consigue con el software estándar de cálculo de permeabilidades.

Los valores de caudal permeado se recalcularán en cada iteración y para cada uno de los ciclos se evalúa el valor de permeabilidad que minimiza la diferencia del caudal total permeado con el caso real que se trata de caracterizar. Este es la principal diferencia con la aplicación anterior, en la cual se trataba de minimizar la diferencia entre cada uno de los elementos, con el objeto de representar mejor el caso bajo estudio, ahora, con los datos aportados exclusivamente de entrada y salida, lo máximo a lo que se puede aspirar es a minimizar la diferencia total de caudal permeado y la concentración de este.

Una vez ejecutado un ciclo, se obtiene un valor de permeabilidad al agua que mejor resultado ofrece y se recalcula el caudal permeado para este nuevo valor de permeabilidad, tras esto, el usuario del software se encuentra de nuevo en el punto de partida por lo que puede realizar un nuevo ciclo.

El proceso finaliza una vez se estabiliza el valor de permeabilidad al agua ofrecido para un valor de permeabilidad a las sales calculado.

La estrategia para seguir de este software se observa en la Figura 64.

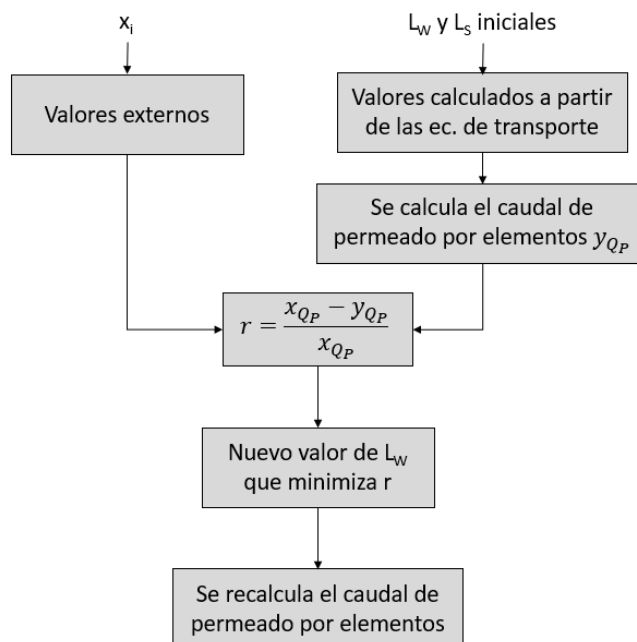


Figura 64. Estrategia de cálculo de permeabilidad en software de uso industrial.

Mientras que la estrategia para el cálculo de la concentración sigue siendo la misma.

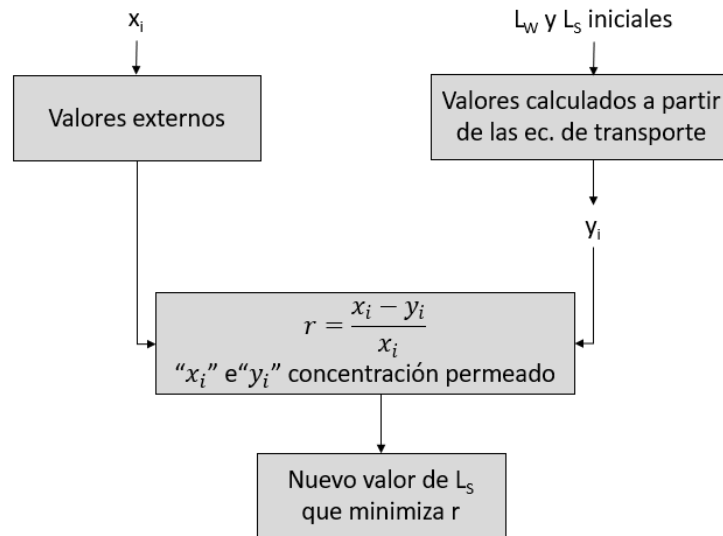


Figura 65. Estrategia de cálculo de permeabilidad en software de uso industrial.

7.2 Guía de uso del software de uso industrial para cálculo de permeabilidades

El aspecto del software desarrollado es el que se muestra en la Figura 66.

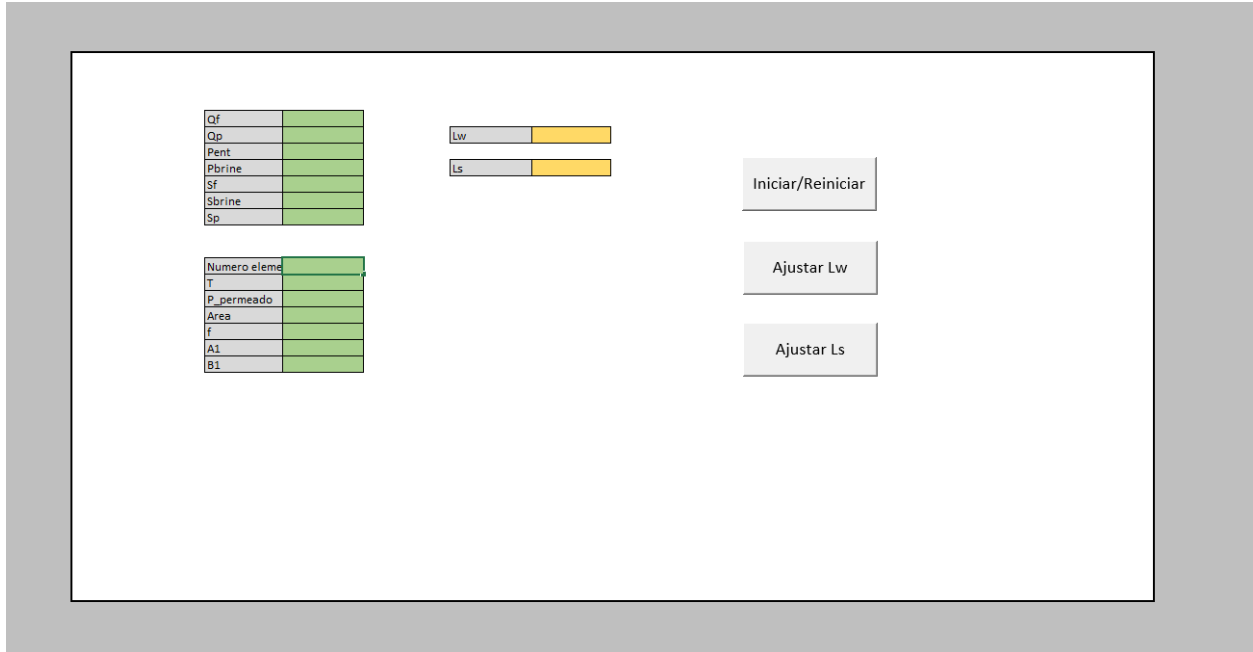


Figura 66. Aspecto del software de uso industrial para cálculo de permeabilidades

En esta herramienta se muestran en verde los datos de entradas necesarios, así como los parámetros de permeabilidad al agua y a las sales que se calculará. Para la primera iteración será necesario introducir valor de dichas permeabilidades, en el caso de que estos sean desconocidos pueden introducirse valores arbitrarios, respetando siempre el orden de magnitud que siempre toman estos valores.

A la derecha aparecen tres botones:

- Iniciar/Reiniciar.
- Ajuste L_w .
- Ajuste L_s .

Al abrir la aplicación o comenzar desde cero un nuevo cálculo será imprescindible darle al botón de “Iniciar/Reiniciar”.

Tras ello, se deben rellenar las casillas en verde y ofrecer al programa unos valores iniciales de permeabilidad al agua y a las sales, en las casillas en amarillo.

A continuación, de forma estándar se comenzará iterando el valor de permeabilidad al agua, a cada iteración aparecerá una pantalla auxiliar en la que aparece marcado por defecto la casilla sustituir valores, se debe aceptar esta ventana auxiliar y repetir el proceso hasta que se estabilicen los valores ofrecidos.

Una vez se dispone de un valor adecuado de permeabilidad al agua, se ajusta el valor de permeabilidad a las sales.

El siguiente paso es volver a tratar de ajustar el valor de permeabilidad al agua, se repite el proceso hasta que se logra estabilizar.

Finalmente, cuando se obtengan valores estables de ambos valores de permeabilidad, se da por finalizada la búsqueda de los valores de permeabilidad de una membrana de la cual solo se dispone información aguas arriba y aguas abajo.

7.3 Ejemplo de aplicación del software de uso industrial

Se realiza una comparación con valores obtenidos del software ROSA, donde los datos que son entrada en el software desarrollado son los que se observan en la siguiente Tabla:

Tabla 21. Datos obtenidos en industria.

Q_F	6 m ³ /h
Q_{Permeado}	2,71 m ³ /h
P_F	52,28 bar
P_{BD}	51,63 bar
S_F	37.124,78 ppm
S_{BD}	64.990 ppm
S_{Permeado}	155,52 ppm

A partir de esta información, se realizan multitud de iteraciones sobre el valor de permeabilidad al caudal, partiendo de un valor fijo de permeabilidad a sales.

En la siguiente Figura se aprecia los valores obtenidos en cada ciclo de iteración en función del valor de permeabilidad inicial, a partir del cual se comienza a iterar.

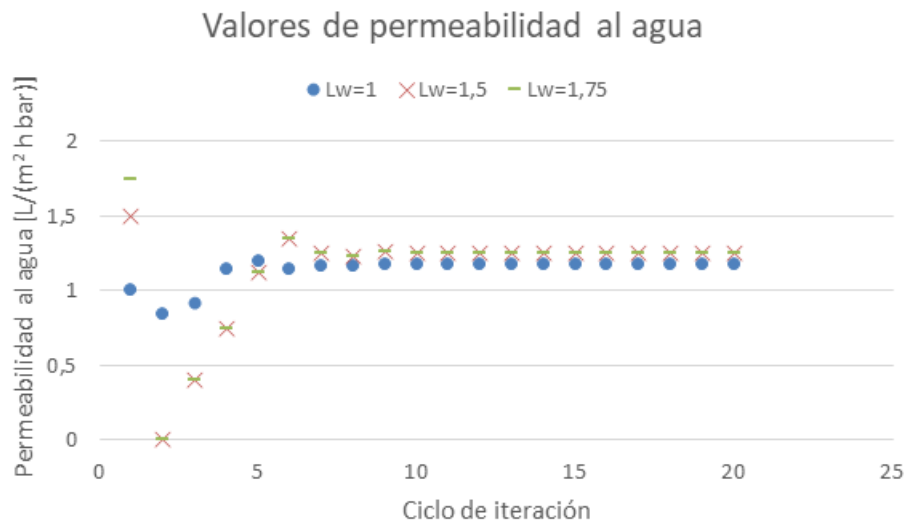


Figura 67. Resultados de permeabilidad en cada iteración.

Se observa como independientemente del valor inicial de permeabilidad introducido, siempre se llega al mismo valor aproximado.

Para tratar de contrastar estos valores de permeabilidad obtenidos, se van a introducir en el primero de los softwares desarrollados y observar así las posibles diferencias.

En la Figura 68 se aprecia una comparación entre los valores de caudal permeado ofrecidos por ROSA y los calculados.

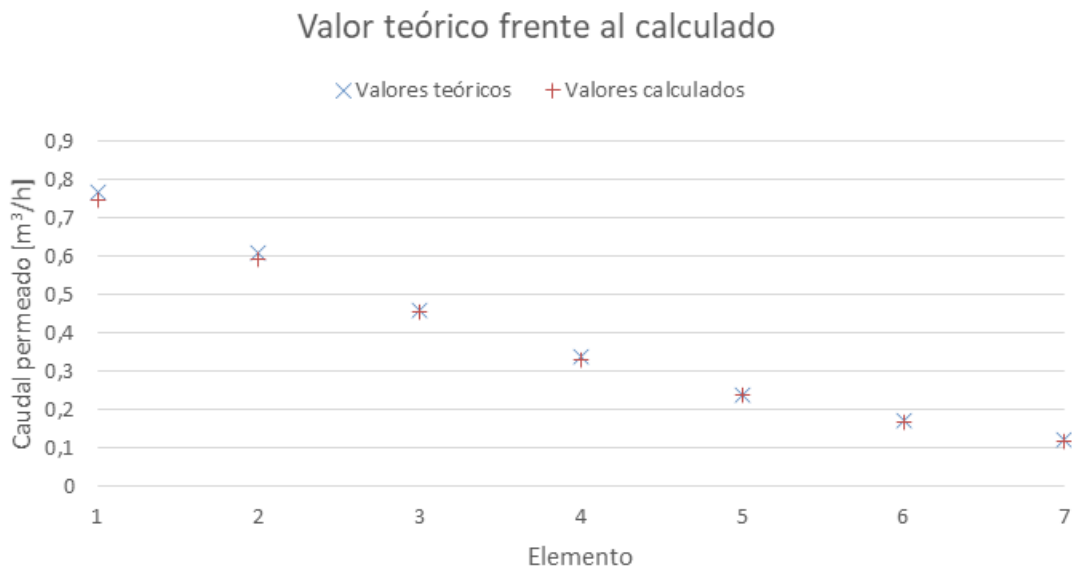


Figura 68. Valores de permeabilidad en elementos.

Como se aprecia, existe una discrepancia mínima ente los valores en los distintos elementos, sin embargo, la suma total del caudal es la misma, lo cual es el objetivo al que se puede aspirar en una plana industrial sin bastidores instalados y sin posibilidad de realizar un estudio por minorizado de este.

En contraposición al método empleado en el primer software, este método requiere mucho menos tiempo de toma de datos o de equipos instalados para toma de mediciones, por lo que para un ámbito industrial se valora de forma muy positiva esta nueva herramienta.

En cuanto a la permeabilidad a las sales, operando de la misma manera y realizando el mismo análisis con la herramienta anterior el resultado se aprecia en la Figura 69.

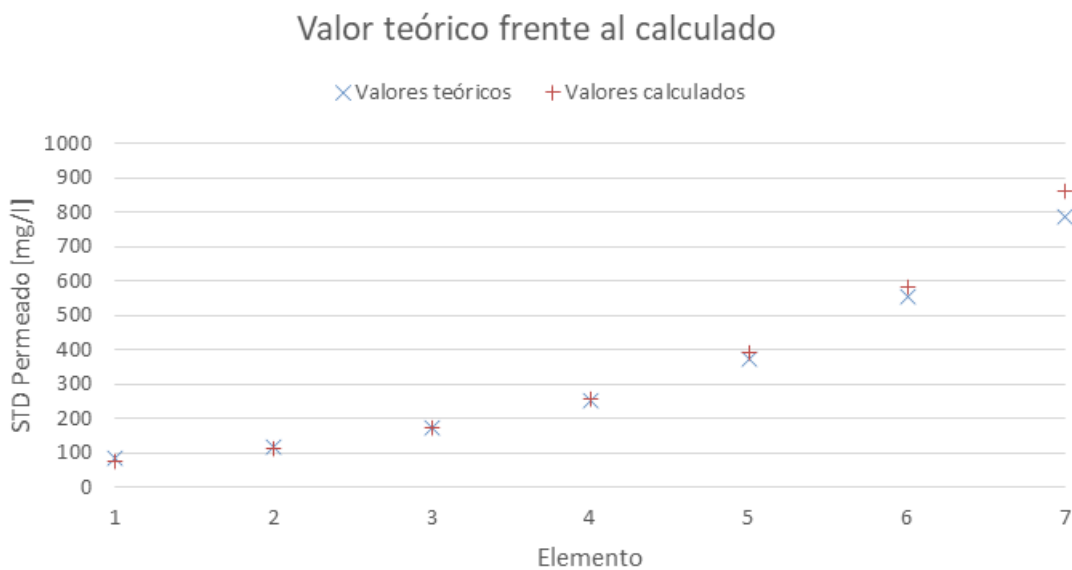


Figura 69. Valores de concentración del permeado en elementos.

8 SOFTWARE DE SIMULACIÓN

*“La simplicidad es la máxima sofisticación”
Leonardo da Vinci*

El tercer y último de los softwares que se van a desarrollar en este trabajo consiste en un simulador de plantas de ósmosis inversa.

Las aplicaciones antes comentadas permiten obtener los valores de permeabilidad al agua y sales, estos parámetros juntos con el área de cada módulo de membrana y los coeficientes que definen su pérdida de carga ofrecen la posibilidad de simular de manera real las configuraciones tanto implantadas hoy día como las más experimentales.

Con los softwares desarrollados se pueden calcular configuraciones de un paso con o sin etapa, ofreciendo al usuario la posibilidad de colocar una bomba entre la etapa y el paso principal en caso de que se desee.

Respecto a cada una de las membranas, se puede seleccionar con total libertad el tipo de membrana en cada uno de los elementos. Además, también se puede seleccionar el número de elementos en cada cuerpo de membrana con un máximo de 10 elementos por cuerpo de membrana.

Por último, en cuanto a los métodos de recuperación de energía, se puede simular que el caudal concentrado se redirige hacia un ERI-PX o un i-Save, o en su defecto, que no existe recuperador de energía instalado.

En cuando a las presiones de los fluidos, se pueden indicar:

- Presión a la entrada de la bomba de alta presión, es decir, la presión del agua de mar a la salida del pretratamiento.
- Presión a la salida de la bomba de alta presión.
- Presión de entrada a la segunda etapa.
- Presión del caudal permeado.
- Presión del concentrado a la salida del dispositivo de recuperación de energía.

La mayor parte de la información antes comentada no es necesario conocerla, y pueden realizarse simulaciones igual de realista con valores de presión manométrica igual a cero, sin embargo, la posibilidad de añadir esta información al usuario para que se rellene en caso de que se conozca añade valor a esta aplicación al ser capaz de recibir todos estos datos e incorporarlos al cálculo.

Con todos los conceptos teóricos explicados hasta ahora, es conocido que las dos últimas presiones antes comentadas suponen un hándicap al proceso de ósmosis inversa, ya que la presión del caudal permeado disminuye el valor de NDP, mientras que una elevada presión del concentrado a la salida del sistema de recuperación de energía afecta al funcionamiento de este.

Finalmente, si los datos introducidos son congruentes y dentro de rango, se ofrece una solución detallada de cada elemento involucrado, así como el consumo energético de cualquier cuerpo de presión y el consumo específico global.

En resumen, esta aplicación ofrece al usuario una gran versatilidad a la hora de simular qué está ocurriendo en una configuración dada, la flexibilidad a la hora de seleccionar la membrana en cada elemento aportando como información los valores de permeabilidad es la principal innovación de este software frente a los simuladores de plantas que existen en el mercado. Además, pueden alargarse las series de membranas hasta 10.

8.1 Método de cálculo de la simulación

El método de cálculo se basa en las ecuaciones y conceptos expuestos en el punto 2. Conceptos previos, todo ello integrado dentro del módulo principal, el cual depende a su vez de multitud de módulos secundarios o funciones definidas que calculan de forma paralela las propiedades termodinámicas de cada elemento o de las características del módulo de recuperación de energía.

La forma en la que se almacena la información en el software para cada membrana es en una matriz, de forma que cada fila representa un elemento de dicha membrana y cada columna una propiedad distinta, así, la alimentación de cada una de las filas es la fila calculada anteriormente, mientras que para la primera fila son las propiedades de diseño especificadas por el usuario.

A la hora de resolver, en la primera iteración se parte de unos valores constantes de caudal permeado, estos cuales están integrados dentro del software, a cada iteración, estos valores se recalculan y se pisan los valores de la iteración anterior, de manera que en cada uno de los ciclos se realizan los cálculos a partir del caudal de permeado obtenido en el ciclo anterior, siendo el caudal de permeado la última variable a calcular. Se comprueba que con 5 iteraciones es más que suficiente para obtener soluciones estables incluso en las condiciones más exigentes.

La estrategia seguida en el cálculo de las propiedades en cada una de las membranas se observa en la siguiente Figura:

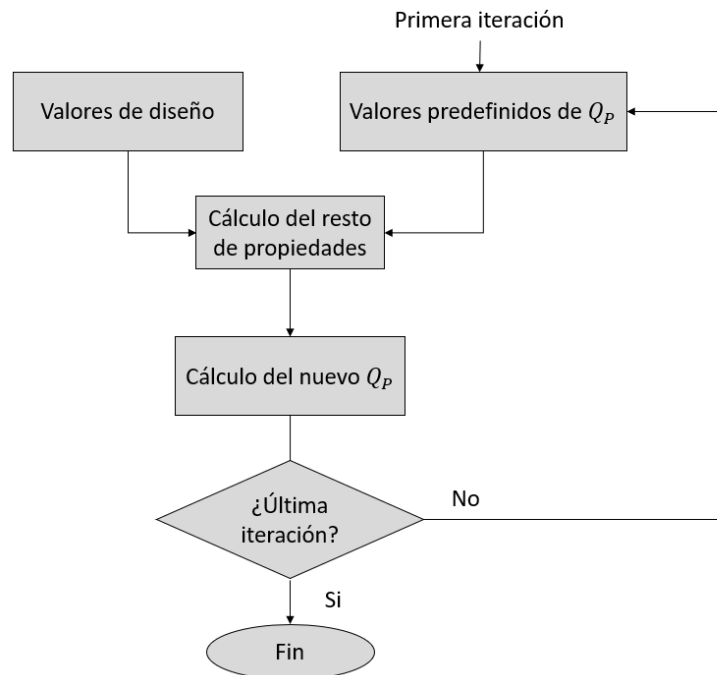


Figura 70. Estrategia de cálculo software de simulación.

Una vez se tiene caracterizada una membrana, la salida de esta es la entrada de la siguiente, en caso de que exista una segunda etapa, la posibilidad de añadir una bomba entre medias de ambos cuerpos de membrana modificada la lectura de la entrada a este segundo cuerpo.

En cuanto al dispositivo de aprovechamiento energético, es necesario conocer la eficiencia, la relación de caudales y la presión mínima a la que se requiere el caudal de concentrado a la salida de este.

Finalmente se calcula el consumo de las bombas, ya que es necesario tener totalmente caracterizado el sistema de recuperación de energía para calcular el caudal que atraviesa la bomba de alta presión.

8.2 Guía de uso del software de simulación de plantas

El aspecto al iniciar este software es el que se observa en la siguiente Figura



Figura 71. Aspecto del software de simulación.

Como se aprecia en la Figura anterior, aparecen un total de 5 botones distintos.

- Nuevo proyecto.
- Pestaña 1.
- Pestaña 2.
- Pestaña 3.
- Resolución.

En estas sucesivas pestañas se introducen los datos de diseño, estos son:

- Caudal, concentración, temperatura y presión del agua de mar disponible.
- Número de elementos del primer paso.
- Coeficiente de ensuciamiento y rendimiento mecánico de las bombas.
- Presión a la salida de la bomba de alta presión.
- Si existe una segunda etapa, en cuyo caso, si hay una bomba a la entrada de esta y la presión hasta la que eleva el concentrado, los números de elementos de esta segunda etapa y las membranas de estos.
- Si existen dispositivos de recuperación de energía, si así fuera, la eficiencia de estos, la relación de caudales y la presión de salida del concentrado.

Cada vez que se desee realizar una nueva simulación o cambiar alguno de los parámetros será necesario reiniciar el proyecto, el orden en el que se rellenan las pestañas debe de ser el orden lógico y si procede, se permitirá al usuario continuar, en caso contrario, se informará con pestañas auxiliares sobre el motivo del error.

La aparición de mensajes de advertencias o alertas en pestañas auxiliares obedece a valores introducidos fuera de rango del software desarrollado o incongruentes.

Rellenadas las 3 pestañas, siempre en orden lógico, se llega a una situación como la que se observa en la Figura 72.



Figura 72. Información a rellenar software simulación.

A continuación, es necesario informar sobre las membranas instaladas en cada uno de los elementos, en la parte señalada de la derecha se añade la siguiente información sobre las membranas involucradas:

- Nombre de la membrana.
- Coeficientes de permeabilidad.
- Área.
- Coeficientes de pérdida de carga.

Después, en la zona marcada de la izquierda se selecciona sobre la lista desplegable la membrana involucrada en cada elemento.

Finalmente, se pulsa Resolución para obtener la solución de problema.

Si se han podido realizar los cálculos de forma satisfactoria aparece una ventana auxiliar con el mensaje de “¡Cálculo completado!”.

8.3 Ejemplo de aplicación del software de simulación

Finalmente, se va a realizar una serie de comparaciones entre los valores arrojados por el software ROSA y los ofrecidos por la aplicación desarrollada, con objeto de contrastar la herramienta desarrollada en diferentes escenarios.

Los parámetros de diseño en el primer escenario son:

Tabla 22. Valores de diseño en escenario 1, software de simulación.

Q_F	10 m ³ /h
S_F	37.124,78 ppm
T	20 °C
P_{HPP}	60,25 bar
f	0,85
Nº elementos	7
P_p	0 Bar
ERD	ERI-PX
η_{bombas}	0,9
Membrana	SW30HRLE-440i
L_w^4	0,94 [L/(m ² h bar)]
L_s^5	0,040 [L/(m ² h)]
Área	40,9 m ²

Con todos estos datos de entrada se obtienen los siguientes datos en ROSA:

Tabla 23. Valores de ROSA, escenario software simulación.

Elemento	Conversión	Caudal de Permeado [m ³ /h]	STD Permeado [mg/L]	Caudal de Alimentación [m ³ /h]	STD Alimentación [mg/L]	Presión de Alimentación [bar]
1	0,10	1,03	63,50	10,00	37124,78	60,25
2	0,10	0,89	80,28	8,97	41387,77	59,92
3	0,09	0,76	103,23	8,07	45963,28	59,64
4	0,09	0,62	134,91	7,32	50704,14	59,4
5	0,07	0,50	178,93	6,69	55412,76	59,19
6	0,06	0,39	240,18	6,19	59875,14	59,00
7	0,05	0,30	324,83	5,80	63908,42	58,83

Mientras que la aplicación desarrollada ofrece los siguientes datos.

⁴ Valor calculado a partir del software de cálculo de permeabilidades.

⁵ Valor calculado a partir del software de cálculo de permeabilidades.

Tabla 24. Valores del software de aplicación, escenario de uso.

Elemento	Conversión	Caudal de Permeado [m ³ /h]	STD Permeado [mg/L]	Caudal de Alimentación [m ³ /h]	STD Alimentación [mg/L]	Presión de Alimentación [bar]
1	0,10	0,99	61,18	10,00	37.140,00	60,25
2	0,10	0,87	77,63	9,01	41.230,30	59,84
3	0,09	0,74	100,75	8,14	45.628,10	59,47
4	0,08	0,62	133,55	7,40	50.194,64	59,13
5	0,07	0,50	180,04	6,78	54.738,75	58,81
6	0,06	0,39	245,15	6,28	59.048,39	58,52
7	0,05	0,30	336,80	5,89	62.933,68	58,24

Comparando los resultados de caudal permeado elemento a elemento se obtienen los valores que se observan en la Tabla 25.

Tabla 25. Comparación del caudal permeado.

Elemento	ROSA Q _p [m ³ /h]	Aplicación Q _p [m ³ /h]	Diferencia
1	1,03	0,99	3,54%
2	0,89	0,87	2,30%
3	0,76	0,74	2,40%
4	0,62	0,62	0,74%
5	0,50	0,50	0,73%
6	0,39	0,39	0,15%
7	0,30	0,30	0,28%

De igual forma, se puede comparar los valores de concentración en el caudal permeado.

Tabla 26. Comparación de la concentración en el caudal permeado.

Elemento	ROSA Q _p [m ³ /h]	Aplicación Q _p [m ³ /h]	Diferencia
1	63,50	61,18	3,65%
2	80,28	77,63	3,30%
3	103,23	100,75	2,40%
4	134,91	133,55	1,01%
5	178,93	180,04	0,62%
6	240,18	245,15	2,07%
7	324,83	336,8	3,69%

Como se observa, en ambos parámetros se obtienen valores prácticamente idénticos, con un error medio menor al 2%, cabe señalar que este error es fruto tanto del software que se está testando como del software de cálculo de permeabilidades, el cual se emplea para obtener los valores que definen las membranas empleadas. Además, estas diferencias se obtienen en valores absolutos, por lo que en el caudal permeado total es de esperar un valor de error aún menor por compensación en diferentes elementos, en la siguiente Figura se puede apreciar los caudales permeados calculados y los obtenidos por ROSA.

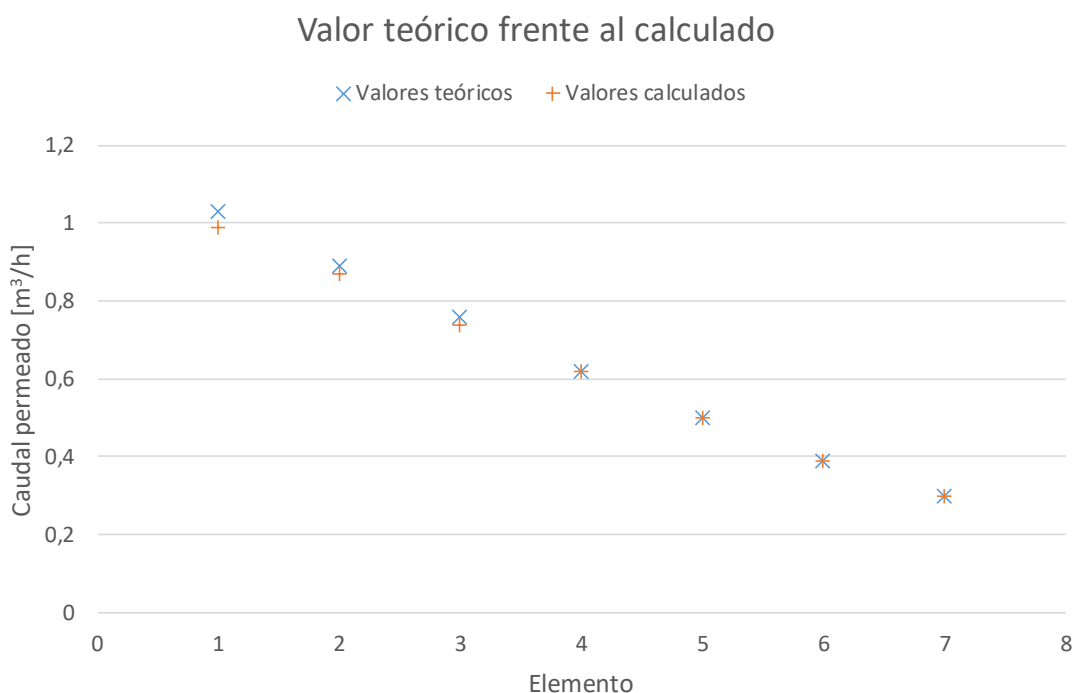


Figura 74. Comparación de resultados, escenario 1.

En la Tabla 27 se observa la solución al problema planteado.

Tabla 27. Comparación resultados escenario 1, software simulación.

	ROSA	Aplicación	Diferencia
Consumo bombas [kW]	18,70	18,79	0,48%
Q_p [m ³ /h]	4,50	4,41	2,00%
Concentración Q_p [ppm]	129,17	129,57	0,31%
SEC [kW h / m ³]	4,16	4,27	2,64%

Como se puede apreciar, los valores que se obtienen apenas tienen una discrepancia del 2% en la práctica totalidad de los parámetros, este resultado justifica la aplicación desarrollada. La cual discrepa en un porcentaje mínimo frente al software más utilizado hoy día en desalación.

A continuación, se va a analizar otro escenario en un sistema de configuración mucho más complejo con el que se justifica la aplicación en estos casos también.

En este segundo escenario se cuenta con una segunda etapa, las propiedades de diseño se aprecian en la Tabla 28.

Tabla 28. Valores de diseño en escenario 2, software de simulación.

Q_F	13 m ³ /h
S_F	37.124,78 ppm
T	20 °C
P_{HPP}	57,66 bar
$P_{2^{\circ} \text{ bomba}}$	57,79 bar
f	0,85
N° elementos paso	7
N° elementos etapa	7
P_p	0 bar
ERD	ERI-PX
η_{bombas}	0.9
Membrana _{paso}	SW30HRLE-440i
Membrana _{etapa}	SW30HRLE-440i
L_w^6	0,94 [L/(m ² h bar)]
L_s^7	0,040 [L/(m ² h)]
Área	40.9 m ²

⁶ Valor calculado a partir del software de cálculo de permeabilidades.

⁷ Valor calculado a partir del software de cálculo de permeabilidades.

La solución ofrecida por ROSA para cada elemento de los dos cuerpos de membrana puede apreciarse en la Tabla 29.

Tabla 29. Solución ROSA, escenario 2 software de simulación.

Elemento	Conversión	Caudal de Permeado [m ³ /h]	STD Permeado [mg/L]	Caudal de Alimentación [m ³ /h]	STD Alimentación [mg/L]	Presión de Alimentación [bar]
Primer paso						
1	0,07	0,93	66,95	13,00	37.124,78	55,09
2	0,07	0,83	79,67	12,07	39.976,15	54,61
3	0,07	0,73	95,59	11,24	42.925,01	54,17
4	0,06	0,64	115,61	10,51	45.916,69	53,78
5	0,06	0,55	140,85	9,87	48.887,57	53,42
6	0,05	0,47	172,82	9,32	51.770,72	53,09
7	0,04	0,39	213,37	8,85	54.501,95	52,78
Segunda etapa						
1	0,04	0,32	271,30	8,45	57.027,19	52,15
2	0,03	0,26	338,56	8,14	59.246,20	51,88
3	0,03	0,21	423,94	7,87	61.199,19	51,62
4	0,02	0,17	531,44	7,66	62.884,69	51,38
5	0,02	0,14	666,49	7,49	64.316,62	51,14
6	0,02	0,11	834,37	7,35	65.516,93	50,91
7	0,01	0,09	1.038,84	7,24	66.513,59	50,68

Actuando de forma análoga, los resultados obtenidos de la aplicación de desarrollada se observan en la siguiente Tabla.

Tabla 30. Solución aplicación, escenario 2 software de simulación.

Elemento	Conversión	Caudal de Permeado [m ³ /h]	STD Permeado [mg/L]	Caudal de Alimentación [m ³ /h]	STD Alimentación [mg/L]	Presión de Alimentación [bar]
Primer paso						
1	0,07	0,87	69,48	13,00	37,140,00	55,09
2	0,07	0,79	82,39	12,13	39,813,66	54,59
3	0,06	0,71	98,68	11,33	42,585,25	54,11
4	0,06	0,62	119,37	10,63	45,408,33	53,66
5	0,05	0,54	145,81	10,01	48,226,31	53,24
6	0,05	0,46	179,70	9,46	50,976,84	52,83
7	0,04	0,39	223,26	9,00	53,597,85	52,44
Segunda etapa						
1	0,04	0,39	223,40	9,00	53,597,85	52,44
2	0,04	0,33	278,96	8,61	56,034,84	52,07
3	0,03	0,27	350,55	8,28	58,243,32	51,71
4	0,03	0,22	444,15	8,01	60,197,58	51,36
5	0,02	0,18	564,69	7,79	61,890,76	51,02
6	0,02	0,14	717,48	7,61	63,327,67	50,69
7	0,01	0,12	975,58	7,47	64,523,27	50,37

Las principales propiedades de esta configuración se aprecian en la Tabla 31.

Tabla 31. Comparación resultados escenario 2, software simulación.

	ROSA]	Aplicación	Diferencia
Consumo bombas HPP [kW]	22,25	21,90	1,57%
Q _{p total} [m ³ /h]	5,85	6,04	3,25%
Concentración Q _{p total} [ppm]	196,35	200,25	1,99%
SEC [kW h / m ³]	3,80	3,62	4,74%

En este caso si se observa una desviación un poco mayor, sin embargo, esta diferencia es del 3% en las variables intermedias y de un 5% aproximado para el valor del consumo específico de la configuración.

Por lo que se concluye que los valores calculados en membranas con bajo caudal de permeado discrepan en mayor medida de los valores de caudal de ROSA.

La representación gráfica de la solución obtenida para los caudales permeados se observa en la siguiente Figura.

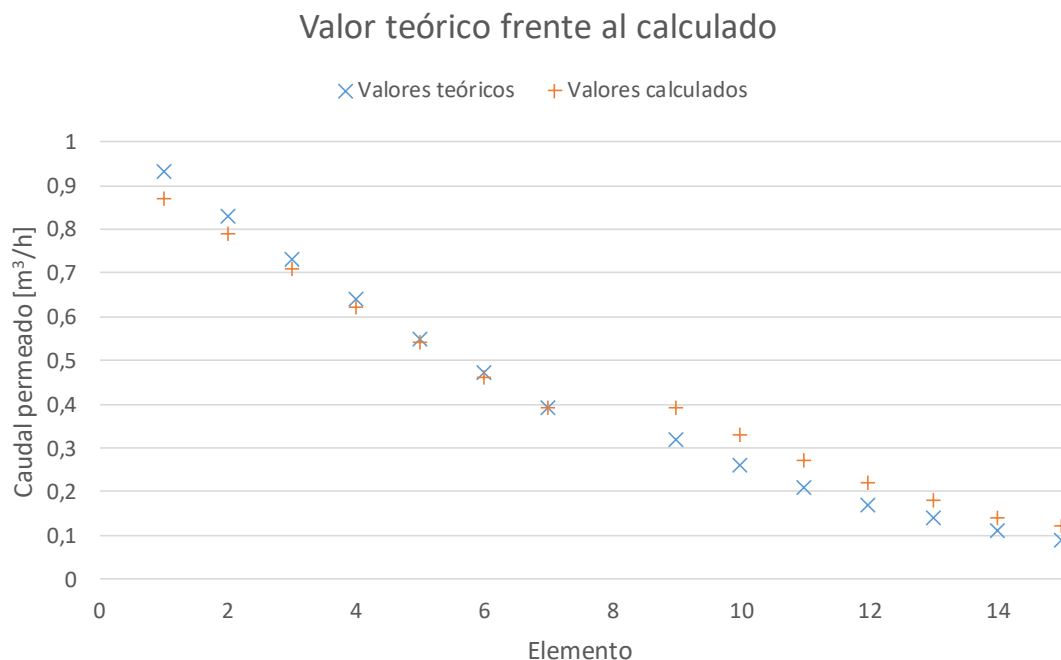


Figura 75. Representación caudal permeado escenario 2, software simulación.

Por último, se va a comprobar el correcto funcionamiento de los dispositivos de recuperación de energía, para lo cual se añaden los dispositivos disponibles en la aplicación al escenario 1, con un rendimiento del 90% y una relación de caudales de 95% se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 32. Comparación dispositivos ERD.

Sin ERD	
SEC[kW h / m ³]	4,27
ERI-PX	
Consumo 2º bomba [kW]	0,55
SEC[kW h / m ³]	1,97
i-Save	
Consumo i-Save [kW]	0,56
SEC[kW h / m ³]	2,01

Estos valores resultan totalmente lógicos con la bibliografía consultada y la información aportada por los fabricantes.

Tras el estudio de estos escenarios, se puede concluir que la aplicación desarrollada resuelve todos los casos planteados de forma satisfactoria, por lo que se justifica de forma positiva esta tercera herramienta desarrollada.

9 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

A partir del software de simulación, puede ponerse a prueba toda y cada una de las variables que influyen en el proceso para observar así su dependencia en el coste energético global de la planta. Ello permitirá seleccionar los escenarios más favorables y las condiciones de operación idóneas para una planta estándar.

9.1 Influencia de la salinidad

En este primer caso se va a observar la dependencia con la salinidad de una instalación de un solo paso, un caudal de alimentación de $10 \text{ m}^3/\text{h}$, una presión de entrada a la membrana de 55 bar y un dispositivo ERI-PX con una eficiencia del 90% y una relación de caudales de 0,95.

La membrana se supone de 7 elementos, con unos coeficientes de permeabilidad al agua y a las sales de $0,94 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h bar})$ y $0,04 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h})$ respectivamente.

En la siguiente Figura se observa el valor de energía específica varía con la salinidad del caudal de entrada.

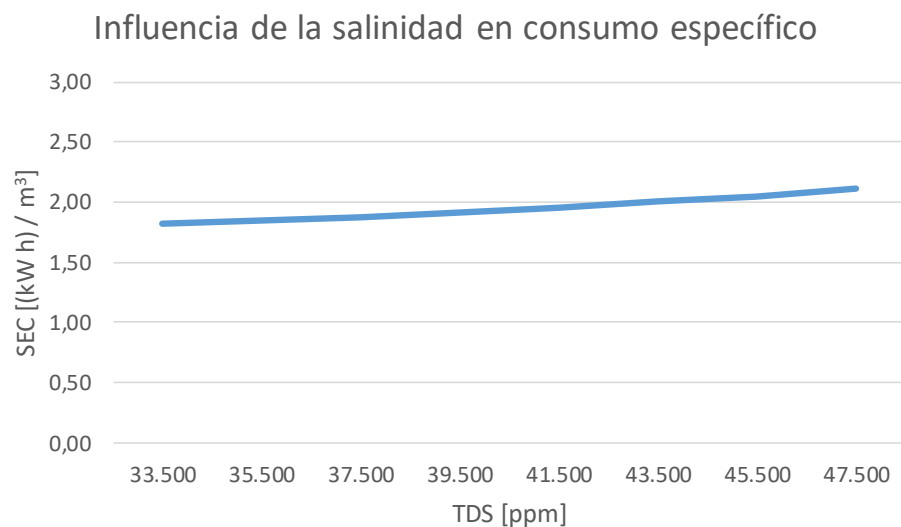


Figura 76. Influencia en el consumo específico de la salinidad

Se observa como las condiciones geográficas pueden influir de forma considerable en la viabilidad económica de una planta, los valores de salinidad en la zona atlántica ronda las 35.000 ppm de media, mientras que en zonas específicas como el mar rojo se pueden alcanzar valores que sobrepasan las 40.000 ppm, en esta parte del mundo reside la mayor parte de las plantas desaladoras, tal y como se puso apreciar en la Figura 2.

9.2 Influencia de la temperatura

Un cambio en la temperatura del agua de mar disponible también tiene su influencia significativa en el valor de la energía específica de la instalación, partiendo de las mismas condiciones de operación que en el caso anterior y una salinidad fija de 35.000 ppm se obtiene la tendencia que se aprecia en la siguiente Figura:

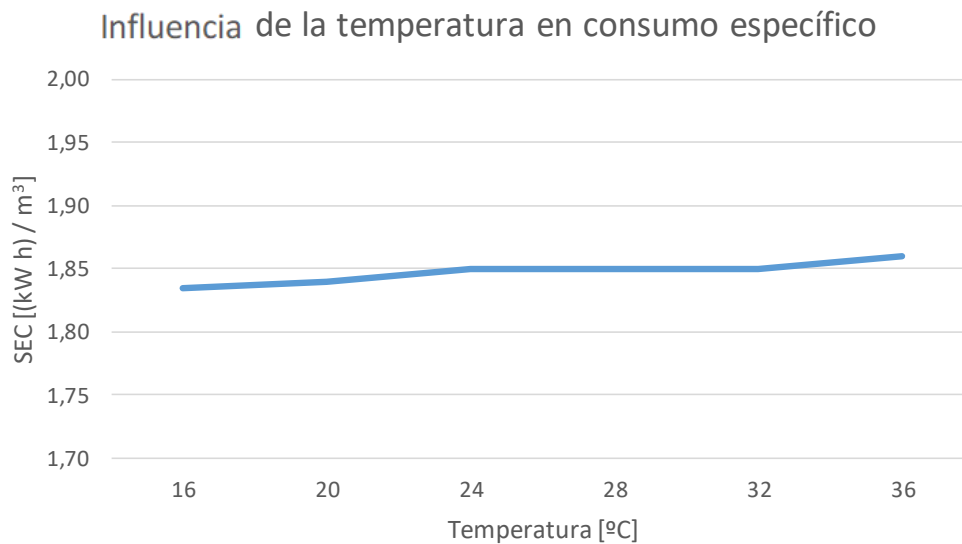


Figura 77. Influencia en el consumo específico de la temperatura.

En este caso, la dependencia que se aprecia en estas condiciones es casi mínima, sin embargo, la tendencia es a incrementar el consumo energético específico a medida que se aumenta la temperatura del agua de mar.

9.3 Influencia de la presión de operación

Como se justificó en el punto 2, elevar la presión de la bomba de alta presión se traduce en un mayor valor de NDP, motor del proceso de osmosis, sin embargo, el consumo de la bomba de incrementa de forma directa cuando se eleva la presión de salida.

En la siguiente Figura se aprecia la influencia de distintos valores de presión de entrada a la membrana.

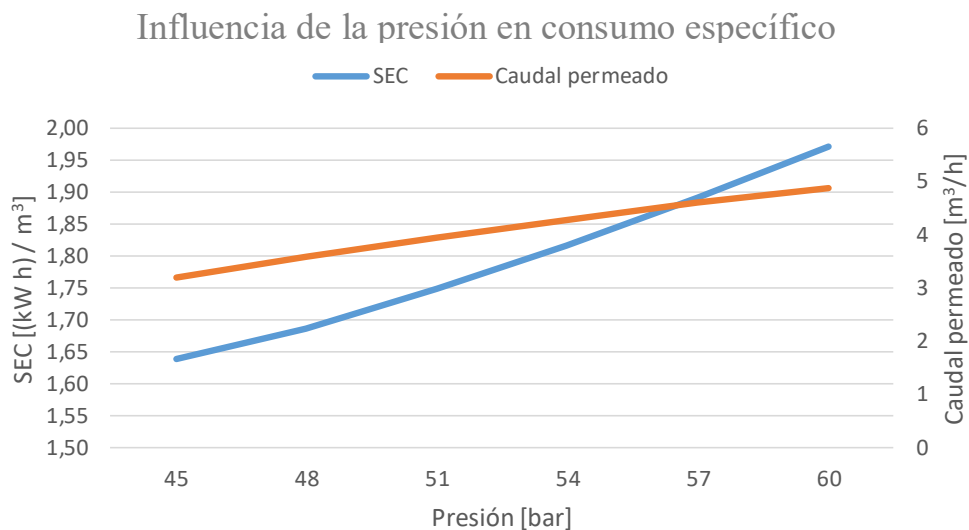


Figura 78. Influencia en el consumo específico de la presión de operación.

En la Figura anterior se observa como energéticamente aumentando la presión se aumenta de forma lineal el caudal permeado, mientras que el consumo energético se aproxima mejor a una exponencial.

9.4 Influencia permeabilidades

La permeabilidad al agua y las sales son sin lugar a duda los parámetros donde más espacio a la mejora existe. En la siguiente Figura se aprecia la dependía del consumo específico con la permeabilidad al agua dejando fija un valor de permeabilidad a las sales de 0.04 L/(m² h).

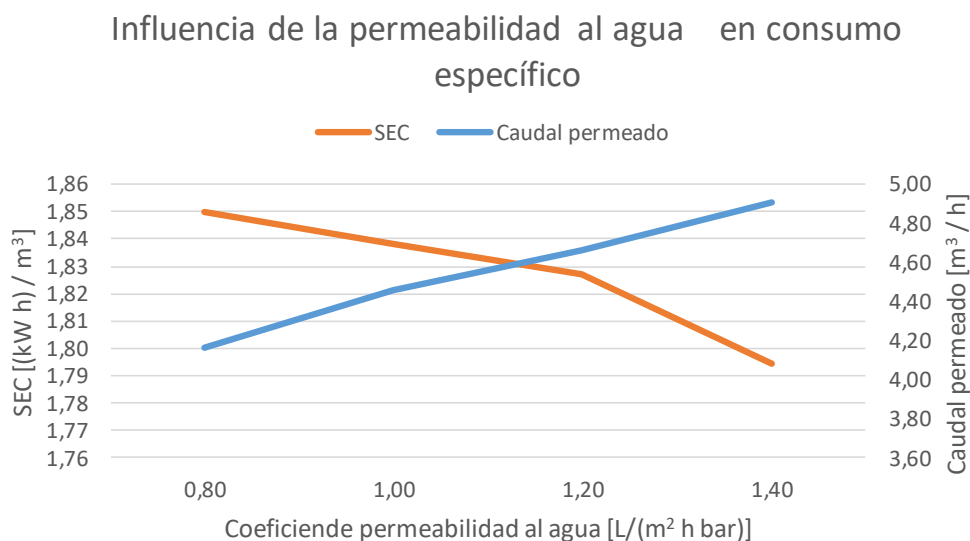


Figura 79. Influencia en el consumo específico de permeabilidad al agua.

De igual forma, con un coeficiente de permeabilidad al agua de 1 L/(m² h bar) la dependencia del consumo específico con la permeabilidad a las sales se aprecia en la siguiente Figura.

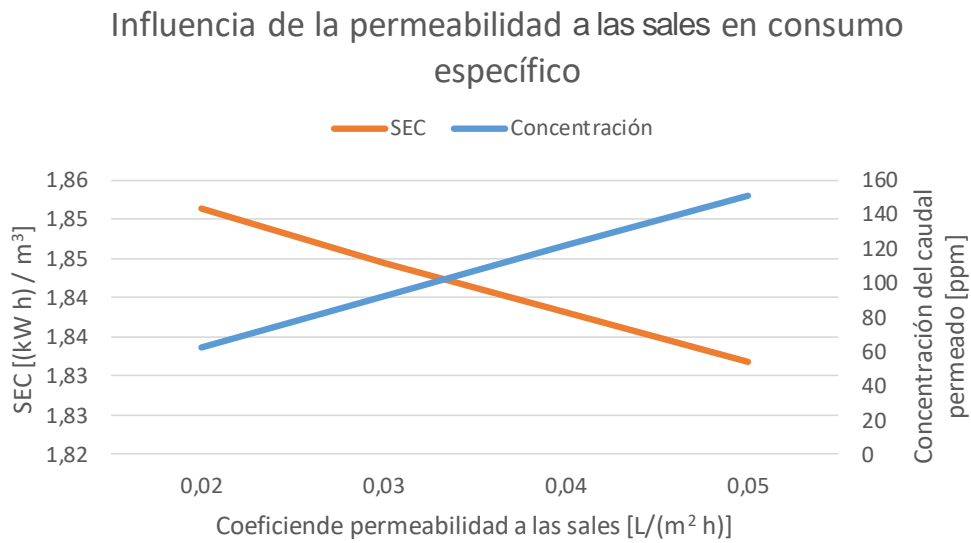


Figura 80. Influencia en el consumo específico de permeabilidad a las sales.

En la anterior Figura se aprecia como un menor valor de permeabilidad a las sales se traduce en un mayor consumo de energía específica, aunque el caudal permeado tiene una concentración mucho menor, en ambos casos, la dependencia existente es lineal.

9.5 Influencia número de elementos

Por último, se va a analizar la trascendencia en el número de elementos en una membrana bajo las mismas condiciones que viene siendo normal en este estudio. Dicha dependencia se aprecia en la siguiente Figura.

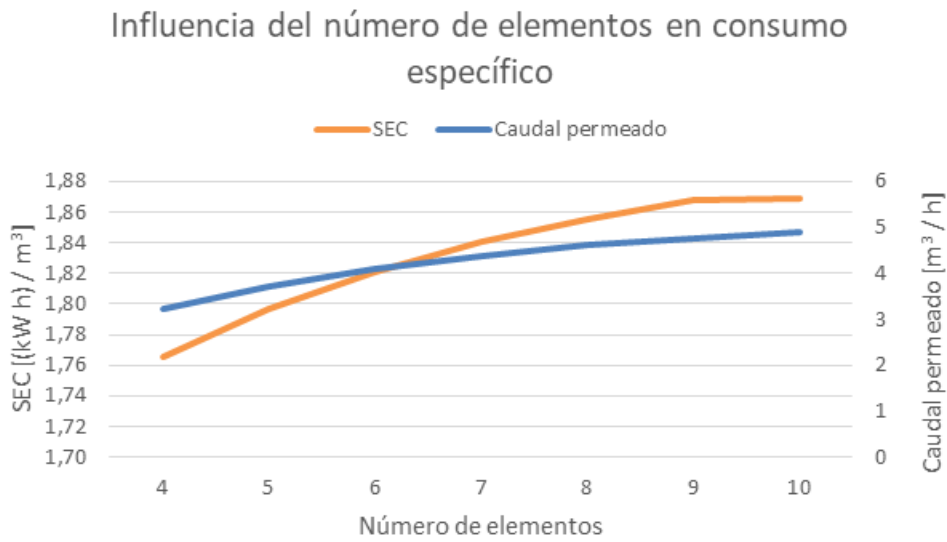


Figura 81. Influencia en el consumo específico del número de elementos.

Se observa en la anterior Figura como para el número de elementos que se viene empleando de forma constante como el valor predeterminado en este documento es ese para el cual se cruzan ambas rectas, número a partir del cual el incremento del consumo específico supera el incremento del caudal permeado que se produce en la cola de la membrana.

10 TRABAJOS FUTUROS

Las tres herramientas propuestas se han desarrollado desde cero, lo que implica que lo presentado anteriormente corresponde a la primera versión. Esto significa que pese a las numerosas pruebas realizadas y casos analizados, hasta que no se emplee de forma generalizada por terceras personas ajenas al programador no se podrá comprobar la idoneidad de dichas aplicaciones, por lo que en un futuro cercano, se deja abierta la puerta a posibles modificaciones tanto por parte del autor como por terceras personas, siempre y cuando se respeten los derechos de propiedad intelectual.

Además de las modificaciones motivadas por el feedback previsible, quedan pendientes posibilidades de mejora a las herramientas planteadas, las cuales se numeran a continuación:

- Crear una biblioteca de funciones para poder exportar en cualquier libro EXCEL.
- En cuanto a los dos softwares de cálculo de permeabilidad:
 - Incluir el cálculo de los coeficientes que definen la pérdida de presión.
 - Ofrecer la posibilidad de elegir las unidades al usuario.
- Relativo al software de simulación,
 - Incorporar el cálculo de un segundo paso, el cual es alimentado por el caudal permeado de la membrana anterior.
 - Añadir la posibilidad de recirculación de parte del permeado con el objeto de disminuir la concentración del agua de mar.
 - Incluir representación gráfica de las configuraciones propuestas por el usuario.
 - Ofrecer la posibilidad de elegir las unidades al usuario.
 - Incluir Pressure Retarded Osmosis (PRO) como método de recuperación energética.
 - Añadir estudio económico.

Estas son algunos de los pasos que podrían seguirse en una nueva versión de los softwares desarrollados. No obstante, la rápida evolución que está experimentando esta industria hace difícil predecir las necesidades reales de las plantas en un futuro cercano, por lo que las herramientas de diseño deben de ser lo más flexibles posibles, en favor de una mejor adaptación a los cambios continuos de estas plantas.

De igual forma, las herramientas desarrolladas podrían ser adaptadas para un seguimiento continuo por parte de un industrial, recibiendo el programa como datos información en continuo de los parámetros a monitorizar, tales como los caudales o presiones a la entrada y salida de la membrana para calcular el factor de ensuciamiento de forma continua, aportando así información sobre el estado real de salud de las membranas instaladas.

11 CONCLUSIONES

Como se ha podido apreciar en la primera parte de este documento, todas las instalaciones destinadas a la desalación de agua de mar están experimentando procesos de cambios, así como las de nueva construcción se parecen cada vez menos a las instalaciones que se construían solo unas décadas atrás.

La necesidad de mejorar el proceso de simulación de dichas plantas, con el enfoque puesto en el ahorro energético es el motivo principal de este trabajo, por lo que el desarrollo de una herramienta flexible, cómoda para el usuario y precisa es la motivación de este trabajo, persiguiendo de forma constante conseguir simular el proceso de ósmosis inversa de una forma lo más parecida posible al fenómeno físico real que se da en las membranas.

Las conclusiones que pueden extraerse de un trabajo como este no son otras que las de una valoración sobre los diferentes softwares desarrollados, recopilando todo lo explicado anteriormente, las aplicaciones desarrolladas son:

1. Software de cálculo de permeabilidades.
2. Software de uso industrial para cálculo de permeabilidades.
3. Software de simulación de plantas.

El primero de estos softwares está destinado para un uso académico o de laboratorio debido a la cantidad de datos necesarios para caracterizar la membrana, lo que implica un gran número de horas de trabajo y de material específico que deben destinarse para la obtención de tales datos.

La razón que puede empujar a emplear una herramienta como esta es el deseo de caracterizar una membrana, es decir, obtener el valor de permeabilidad al agua y a las sales que mejor representa el fenómeno bajo estudio.

La segunda herramienta está destinado a un uso industrial, tiene la misma motivación que la primera pero con una menor necesidad de obtención de datos del proceso bajo estudio, lo cual la hace idónea para una aplicación industrial, ya que conociendo los parámetros de los caudales a la entrada y salida de la membrana se consigue una caracterización de la membrana.

Los datos requeridos pueden obtenerse con un par de caudalímetros y manómetros a la entrada y salida de las membranas, así como un termómetro a la entrada.

La tercera y última de las herramientas es un simulador de plantas, donde partiendo de los caudales de entrada al proceso y con los datos que definen cada uno de los elementos que participan en el proceso puede obtenerse las condiciones de los fluidos de salida, así como el consumo energético de la configuración propuesta.

Esta tercera herramienta puede ser empleada tanto por un industrial que conoce los fluidos de los que dispone y desea probar aquella configuración que mejor se adapta a su proceso, como desde un punto de vista teórico en el desarrollo de patentes o búsqueda de nuevas disposiciones que supongan un ahorro.

También se ofrece la posibilidad de estudiar que membrana se adapta mejor al proceso, permitiendo experimentar con cualquier valor de permeabilidad.

Por supuesto, estas tres herramientas pueden emplearse de forma conjunta.

Desde el punto de vista del industrial, se puede realizar un estudio sobre los valores de permeabilidad al agua y las sales de aquellas membranas que ya tenga instaladas mediante la segunda herramienta, y utilizar esos datos como alimentación en la tercera herramienta, para estudiar las posibilidades de retrofit de las que dispone o si debiera realizarse un cambio en el tipo de membrana que emplea.

También puede emplear la segunda herramienta de forma continua para analizar los cambios en las permeabilidades de las membranas instaladas.

De igual forma, en un uso teórico puede emplearse la primera herramienta a partir de los datos de laboratorio o de los datos obtenidos en otro software como ROSA para obtener unos valores de permeabilidad al agua y las sales, y proceder a continuación con la tercera para estudiar la configuración que mejor se acerque a los intereses buscados.

Como se comentó extensamente, las diferencias entre la solución ofrecida por los softwares desarrollados y la solución aportada por un software como ROSA apenas dista de un 4% en el peor de los escenarios posibles y empleando para el cálculo dos de las herramientas desarrolladas, por lo que se puede concluir que se ha logrado desarrollar una herramienta muy precisa en la que simular multitud de escenarios.

Las principales características de los tres softwares son:

- Flexibles.
- Rápidos.
- Trazables.
- Sencillos de usar por parte del usuario.

Para finalizar, se considera que las herramientas desarrolladas pueden aportar luz en un momento de continuo cambio en el que las innovaciones en las configuraciones reclaman de aplicaciones flexibles donde testar las nuevas propuestas.

El lenguaje de programación elegido es Visual Basic, la razón de esto es principalmente que el software sobre la que se emplea es EXCEL, sin lugar a duda, la herramienta más empleada hoy día en cualquier empresa y por cualquier profesional, lo que significa un mayor público potencial de uso de esta herramienta, principalmente en el ámbito académico.

Anexo I. Cálculo de Propiedades termodinámicas

A continuación, se muestran la forma de cálculo empleada para la obtención de las principales propiedades termodinámicas empleadas de acuerdo con [9]. la cual se ha implementado en VBA,

Function Densidad_con_presion(T, S, P)

$$a1 = 9,999 * 10 ^ 2$$

$$a2 = 2,034 * 10 ^ (-2)$$

$$a3 = -6,162 * 10 ^ (-3)$$

$$a4 = 2,261 * 10 ^ (-5)$$

$$a5 = -4,657 * 10 ^ (-8)$$

$$b1 = 8,02 * 10 ^ 2$$

$$b2 = -2,001$$

$$b3 = 1,677 * 10 ^ (-2)$$

$$b4 = -3,06 * 10 ^ (-5)$$

$$b5 = -1,613 * 10 ^ (-5)$$

$$P0 = 0,101$$

$$S = S / 1000$$

$$\text{Densinpresion} = (a1 + a2 * T + a3 * T ^ 2 + a4 * T ^ 3 + a5 * T ^ 4) + (b1 * S + b2 * S * T + b3 * S * T ^ 2 + b4 * S * T ^ 3 + b5 * S ^ 2 * T ^ 2)$$

$$c1 = 5,0792 * 10 ^ (-4)$$

$$c2 = -3,4168 * 10 ^ (-6)$$

$$c3 = 5,6931 * 10 ^ (-8)$$

$$c4 = -3,7263 * 10 ^ (-10)$$

$$c5 = 1,4465 * 10 ^ (-12)$$

$$c6 = -1,7058 * 10 ^ (-15)$$

$$c7 = -1,3389 * 10 ^ (-6)$$

$$c8 = 4,8603 * 10 ^ (-9)$$

$$c9 = -6,8039 * 10 ^ (-13)$$

$$d1 = -1,1077 * 10 ^ (-6)$$

$$d2 = 5,5584 * 10 ^ (-9)$$

$$d3 = -4,2539 * 10 ^ (-11)$$

$$d4 = 8,3702 * 10 ^ (-9)$$

$$Fp = \text{Exp}((P - P0) * (c1 + c2 * T + c3 * T ^ 2 + c4 * T ^ 3 + c5 * T ^ 4 + c6 * T ^ 5 + S * (d1 + d2 * T + d3 * T ^ 2)) + (P ^ 2 - P0 ^ 2) / 2 * (c7 + c8 * T + c9 * T ^ 3 + d4 * S))$$

$$\text{Densidad_con_presion} = Fp * \text{Densinpresion}$$

End Function

Function entalpia(T, S, P)

$$a1 = 999,7767$$

$$a2 = -3,2406$$

$$a3 = 0,0127$$

$$a4 = -4,7723 * 10 ^ (-5)$$

$$a5 = -1,1748$$

$$a6 = 0,01169$$

$$a7 = -2,6185 * 10 ^ (-5)$$

$$a8 = 7,0661 * 10 ^ (-8)$$

$$P0 = 0,101$$

$$S = S / 1000$$

$$b1 = -2,34825 * 10 ^ 4$$

$$b2 = 3,15183 * 10 ^ 5$$

$$b3 = 2,80269 * 10 ^ 6$$

$$b4 = -1,44606 * 10 ^ 7$$

$$b5 = 7,82607 * 10 ^ 3$$

$$b6 = -4,41733 * 10$$

$$b7 = 2,1394 * 10 ^ (-1)$$

$$b8 = -1,99108 * 10 ^ 4$$

$$b9 = 2,77846 * 10 ^ 4$$

$$b10 = 9,72801 * 10$$

$$hw = 141,355 + 4202,07 * T - 0,535 * T ^ 2 + 0,004 * T ^ 3$$

$$hsw = hw - S * (b1 + b2 * S + b3 * S ^ 2 + b4 * S ^ 3 + b5 * T + b6 * T ^ 2 + b7 * T ^ 3 + b8 * S * T + b9 * S ^ 2 * T + b10 * S * T ^ 2)$$

$$\text{entalpia} = hsw + (P - P0) * (a1 + a2 * T + a3 * T ^ 2 + a4 * T ^ 3 + S * (a5 + a6 * T + a7 * T ^ 2 + a8 * T ^ 3))$$

End Function

Function Coeficiente_osmotico(T, S, P)

$$a1 = 8,9453233003 * 10 ^ (-1)$$

$$a2 = 4,1560737424 * 10 ^ (-4)$$

$$a3 = -4,6262121398 * 10 ^ (-6)$$

$$a4 = 2,2211195897 * 10 ^ (-11)$$

$$a5 = -1,1445456438 * 10 ^ (-4)$$

$$a6 = -1,4783462366 * 10 ^ (-6)$$

$$a7 = -1,3526263499 * 10 ^ (-11)$$

$$a8 = 7,0132355546 * 10 ^ (-6)$$

$$a9 = 5,6960486681 * 10 ^ (-8)$$

$$a10 = -2,8624032584 * 10 ^ (-10)$$

If S >= 10 Then

$$\text{Coeficiente_osmotico} = a1 + a2 * T + a3 * T ^ 2 + a4 * T ^ 4 + a5 * S + a6 * S * T + a7 * S * T ^ 3 + a8 * S ^ 2 + a9 * S ^ 2 * T + a10 * S ^ 2 * T ^ 2$$

Else

$$S10 = 10$$

$$\text{Coeficienteosmotico_S10} = a1 + a2 * T + a3 * T ^ 2 + a4 * T ^ 4 + a5 * S10 + a6 * S10 * T + a7 * S10 * T ^ 3 + a8 * S10 ^ 2 + a9 * S10 ^ 2 * T + a10 * S10 ^ 2 * T ^ 2$$

$$\text{alfa} = 3,1084 * (1 - \text{Coeficienteosmotico_S10}) + 61,5481 * (a5 + a6 * T + a7 * T ^ 3 + 2 * a8 * S10 + 2 * a9 * S10 * T + 2 * a10 * S10 * T ^ 2)$$

$$k = 1,7632 * (1 - \text{Coeficienteosmotico_S10} + 0,3216 * \text{alfa})$$

$$\text{Coeficiente_osmotico} = 1 - k * (31,843 * (S / (1000 - S))) ^ 0,5 + \text{alfa} * 31,834 * S / (1000 - S)$$

End If

End Function

Function Presion_osmotica(T, S, P)

Coefosmotico = Coeficiente_osmotico(T, S, P)

R = 8,314472

MW = 31,4038

densidadaguapura = 1000

T = T + 273

Presion_osmotica = Coefosmotico * R * T * densidadaguapura * (S * 1000) / ((1000 - S) * MW) / 1000000

End Function

Function Entropia(T, S, P)

$$a1 = -4,4786 * 10 ^{-3}$$

$$a2 = -1,1654 * 10 ^{-2}$$

$$a3 = 6,1154 * 10 ^{-5}$$

$$a4 = -2,0696 * 10 ^{-7}$$

$$a5 = -1,5531 * 10 ^{-3}$$

$$a6 = 4,0054 * 10 ^{-5}$$

$$a7 = -1,4193 * 10 ^{-7}$$

$$a8 = 3,3142 * 10 ^{-10}$$

$$P0 = 0,101$$

$$S = S / 1000$$

$$b1 = -4,231 * 10 ^2$$

$$b2 = 1,463 * 10 ^4$$

$$b3 = -9,88 * 10 ^4$$

$$b4 = 3,095 * 10 ^5$$

$$b5 = 2,562 * 10$$

$$b6 = -1,443 * 10 ^{-1}$$

$$b7 = 5,879 * 10 ^{-4}$$

$$b8 = -6,111 * 10$$

$$b9 = 8,041 * 10$$

$$b10 = 3,035 * 10 ^{-1}$$

$$Sw = 0,1543 + 15,383 * T - 2,996 * 10 ^{-2} * T ^2 + 8,193 * 10 ^{-5} * T ^3 - 1,37 * 10 ^{-7} * T ^4$$

$$Ssw = Sw - S * (b1 + b2 * S + b3 * S ^2 + b4 * S ^3 + b5 * T + b6 * T ^2 + b7 * T ^3 + b8 * S * T + b9 * S ^2 * T + b10 * S * T ^2)$$

$$\text{Entropia} = Ssw + (P - P0) * (a1 + a2 * T + a3 * T ^2 + a4 * T ^3 + S * (a5 + a6 * T + a7 * T ^2 + a8 * T ^3))$$

REFERENCIAS

- [1] M. Á. Criado, «Las desaladoras generan tanta salmuera como para cubrir España,» *El país*, 15 Enero 2019. [En línea]. Available: https://elpais.com/elpais/2019/01/14/ciencia/1547446264_496342.html. [Último acceso: 20 Marzo 2019].
- [2] A. Uriarte, *Historia del clima de la Tierra*, Gobierno vasco, 2003.
- [3] C. Fell, *Membrane Separations Technology. Principles and Applications.*, Elsevier Science B.V, 1994.
- [4] O. M. d. I. Salud, «Guías para la calidad del agua potable, tercera edición,» OMS, [En línea]. Available: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/es/. [Último acceso: 20 Marzo 2019].
- [5] M. r. M. T. V. V. S. S.-m. K. Edward Jonesab, «The state of desalination and brine production: A global outlook,» *Science Of The Total Environment*, vol. 657, pp. 1343-1356, 2019.
- [6] L. Garcia, Escritor, *Fundamentos termodinámicos de la desalación. Ecuaciones de estado del agua de mar y sus concentrados y diluciones.* [Performance]. Curso 2016/2017.
- [7] F. Millero, R. Feistel, D. Wright y T. McDougall, «The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale,» *Oceanographic Research Papers*, vol. I, pp. 50-72, 2008.
- [8] M. Sharqawya, J. Lienhard y M. Zubair, «Thermophysical properties of seawater: a review of existing,» *Desalination and Water Treatment*, pp. 354-380, 2010.
- [9] K. G. M. H. S. L. D. B. a. J. H. L. V. Nayar, «Thermophysical Properties of Seawater: A Review and New Correlations That Include Pressure Dependence.,» *Desalination*, nº 390, July 2016.
- [10] S. Moore, «THOMAS,» 22 01 2013. [En línea]. Available: <https://news.thomasnet.com/fluid-gas-flow/2013/01/22/batch-like-reverse-osmosis-promises-massive-cost-savings-for-water-purification>. [Último acceso: 2019 04 01].
- [11] M. Wilf, «The Guidebook to Membrane Desalination Technology. Reverse Osmosis, Nanofiltration and Hybrid Systems Process, Design, Applications and Economics.,» *Balaban Desalination Publications.*, vol. 065, nº 3, 2007.
- [12] V. W. Technologies, 11 10 2017. [En línea]. Available: <https://www.veoliawatertechnologies.com/en/media/articles/sadara>. [Último acceso: 20 03 2019].
- [13] M. B. N. N. D. N. A. D. Muhammad Qasima, «Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review,» *Destillation*, nº 459, pp. 59-104, 2019.
- [14] Wilf, «Appendix A. Membrane Unit Configurations.,» 2007.
- [15] L. G.-R. b. Baltasar Peñate, «Energy optimisation of existing SWRO (seawater reverse osmosis) plants with ERT (energy recovery turbines): Technical and thermoeconomic assessment,» *Energy*, nº 36, pp. 613-626, 2011.
- [16] D. d. I. y. e. D. d. A. d. I. T. d. Canarias, «Caracterización de la Industria del Agua,» 14 de noviembre de 2016.
- [17] B. A. Q. S. M. Z. Muhammad Ahmad Jamil, «Exergo-economic analysis of a seawater reverse osmosis desalination plant with various retrofit options,» *Desalination*, vol. 401, pp. 88-98, 2017.
- [18] P. d. E. e. l. p. y. d. d. a. d. Canarias, «Instituto Tecnológico de Canarias S.A.,» 2014.
- [19] L. G.-R. Baltasar Peñate, «Retrofitting assessment of the Lanzarote IV seawater reverse osmosis desalination plant,» *Desalination*, vol. 265, pp. 244-255, 2011.
- [20] A. B. H. P. S. G. M. S. A. F. I. M. D. B. Sri Haryatia, «Process intensification of seawater reverse osmosis through enhanced train capacity and module size–Simulation on Lanzarote IV SWRO plant,» *Desalination*, vol. 408, pp. 92-101, 2017.

- [21] L. X. Y. L. S. Z. Y. X. Yawei Du, «Optimizaton of reverse osmosis networks with split partial second pass design,» *Desalination*, vol. 365, pp. 365-380, 2015.
- [22] R. B. C. B. Stefan Rybar, «Split partial second pass design for SWRO plants,» *Desalination*, 2010.
- [23] S. H. Jungbin Kim, «A novel single-pass reverse osmosis configuration for high-purity water production and low energy consumption in seawater desalination,» *Desalination*, vol. 429, pp. 142-154, 2018.
- [24] SOLVER. [En línea]. Available: <https://www.solver.com/excel-solver-grg-nonlinear-solving-method-stopping-conditions>. [Último acceso: 02 04 2019].
- [25] A. B. Pouyfaucou, «Technological challenges of seawater desalination: analysis of future opportunities.,» *Universidad de Sevilla, ETSI.*, 15/03/2019.