

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Estudio teórico de un módulo de membranas de  
ósmosis directa

Autor: M.<sup>a</sup> Eugenia Pareja-Obregón Matas

Tutor: Dra. Lourdes García Rodríguez

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

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Máster  
Máster universitario en Ingeniería Industrial

# **Estudio teórico de un módulo de membranas de ósmosis directa**

Autor:

M.<sup>a</sup> Eugenia Pareja-Obregón Matas

Tutor:

Dra. Lourdes García Rodríguez

Dpto. Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Máster:

Autor: M.<sup>a</sup> Eugenia Pareja-Obregón Matas

Tutor: Lourdes García Rodríguez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

*“Pero hay una ley que yo aprendí en la calle, de este laberinto alguien siempre sale.”*

Fito Páez.

# AGRADECIMIENTOS

---

A Lourdes, que sin su ayuda, sus conocimientos y su tiempo dedicado nunca hubiera acabado un camino dibujado por un grado y un máster de ingeniería.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>2</b>
<b>Resumen</b>	<b>3</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>2</b>
<b>Índice de ilustraciones</b>	<b>3</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>5</b>
<b>1 Objetivo</b>	<b>6</b>
<b>2 Introducción</b>	<b>7</b>
<i>Demanda de tratamiento de agua y aguas residuales innovador y energéticamente eficiente</i>	7
<b>3 Ósmosis directa</b>	<b>9</b>
<i>Tecnología de ósmosis directa</i>	9
<i>Ventajas principales de la ósmosis directa</i>	9
<i>Limitaciones principales de la ósmosis directa</i>	10
3.1.1 Concentración de polarización	10
3.1.2 Ensuciamiento de las membranas	11
3.1.3 Difusión inversa del soluto	12
<b>4 Mejoras de los últimos años</b>	<b>13</b>
<i>Membranas</i>	13
4.1.1 Características de las membranas	13
4.1.2 Configuración de las membranas	14
4.1.3 Tipos de membranas para ósmosis directa.	17
4.1.4 Membranas comerciales	18
4.1.5 Tecnologías híbridas	23
<b>5 Propiedades termodinámicas</b>	<b>24</b>
<i>Conceptos generales básicos</i>	24
5.1.1 Equilibrio osmótico	24
5.1.2 Límite semipermeable rígido	24
5.1.3 Presión osmótica	25
<i>Propiedades del agua del sistema</i>	26
5.1.4 Ecuaciones de agua saturada	26
5.1.5 Ecuaciones de estado para el agua de mar	27
<i>Ecuaciones termodinámicas.</i>	29
<b>6 Evaluación del proceso mediante ósmosis directa</b>	<b>32</b>
<i>Estudio dependiente de la temperatura</i>	39
<i>Estudio en función de la permeabilidad</i>	43
<i>Estudio en función de la salinidad de las corrientes</i>	44
6.1.1 $S_f=0,033$ kg/kg // $S_d=0,039$ kg/kg	44
6.1.2 $S_f=0,033$ kg/kg // $S_d=0,065$ kg/kg	47
6.1.3 $S_f=0,033$ kg/kg // $S_d=0,085$ kg/kg	50
<i>Variación con la corriente de entrada</i>	53
<i>Variación con la corriente de salida.</i>	57
<b>7 Conclusiones</b>	<b>62</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>63</b>
<b>8 Anexo 1</b>	<b>66</b>
<i>Especificaciones técnicas de las membranas de ósmosis directas desarrolladas por Aquaporin</i>	66

<b>9 Anexo 2</b>	<b>72</b>
<i>Resultados obtenidos del estudio preliminar:</i>	72
<i>Resultados obtenidos en función de la temperatura</i>	73
9.1.1 T=15 °C	73
9.1.2 T=25 °C	73
9.1.3 T=45 °C	73
<i>Resultados obtenidos en función de la variabilidad de la permeabilidad</i>	74
9.1.4 $L_w=0,245 \text{ L/ (m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar)}$	74
9.1.5 $L_w= 0,75 \text{ L/ (m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar)}$	74
9.1.6 $L_w=1,5 \text{ L/ (m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar)}$	74
<i>Resultados obtenidos en función de la variación de la salinidad</i>	75
9.1.7 $S_f=0,033/ S_d=0,035 \text{ kg/kg}$	75
9.1.8 $S_f=0,033/ S_d=0,065 \text{ kg/kg}$	75
9.1.9 $S_f=0,033/ S_d=0,085 \text{ kg/kg}$	75
<i>Resultados obtenidos con la variación del caudal de alimentación</i>	76
9.1.10 $Q_f= 30 \text{ LPM}$	76
9.1.11 $Q_f= 35 \text{ LPM}$	76
9.1.12 $Q_f= 40 \text{ LPM}$	76
<i>Resultados obtenidos con la variación del caudal de draw solution</i>	77
9.1.13 $Q_d= 10 \text{ LPM}$	77
9.1.14 $Q_d=15 \text{ LPM}$	77

# Resumen

---

Cada día se pone de manifiesto que el desarrollo del ser humano supone un crecimiento exponencial de la población en las próximas décadas, por lo que es necesario encontrar una forma económica y sostenible para el medio ambiente de garantizar el suministro de agua potable para la población.

Con este trabajo se pretende dar visibilidad a la necesidad de seguir desarrollando estudios de ósmosis directa, así como la posterior realización de instalaciones a escala real. La ósmosis directa es una tecnología de membrana pionera, la cual se está desarrollando y poco a poco está cogiendo fuerza, por lo que se ha pretendido hacer una comparativa de la tecnología en 2016 y sus avances en estos últimos 5 años. Por otro lado, se ha desarrollado teóricamente el comportamiento de una instalación, usando esta técnica, de 4 módulos equipados cada uno con una membrana FO8040, membrana específica para esta tecnología. En base a los resultados obtenidos podremos luego comparara su comportamiento real en el laboratorio.



# Índice de tablas

Tabla 1. Datos entrada estudio preliminar	32
Tabla 2. Puntos de estudio de la configuración en condiciones preliminares.	34
Tabla 3 Incremento absoluto de la entrada en función de T	41
Tabla 4. Incremento de las salinidad de salida en función de T	41
Tabla 5. Diferencias de NDP a la entrada y la salida en función de la temperatura	42
Tabla 6. Módulos necesarios en función de $L_w$	43
Tabla 7. Incremento de NDP en función del caudal de alimentación, manteniendo fijo el de extracción	56
Tabla 8. Módulos necesarios en función de la corriente de alimentación	56
Tabla 9. Incremento de NDP en función del caudal de extracción, manteniendo fijo el alimentación	60
Tabla 10. Módulos necesarios en función de la corriente de <i>draw solution</i>	61
Tabla 11. Resultados de corrientes, propiedades y secciones del estudio preliminar	72
Tabla 12. Presiones del estudio preliminar	72
Tabla 13 Corrientes, propiedades y secciones para $T=15^{\circ}\text{C}$	73
Tabla 14. Corrientes, propiedades y secciones para $T=25^{\circ}\text{C}$	73
Tabla 15. Corrientes, propiedades y secciones para $T=45^{\circ}\text{C}$	73
Tabla 16. Corrientes, propiedades y secciones para $L_w=0,245 \text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar})$	74
Tabla 17. Corrientes, propiedades y secciones para $L_w=0,75 \text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar})$	74
Tabla 18. Corrientes, propiedades y secciones para $L_w=1,5 \text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar})$	74
Tabla 19. Corrientes, propiedades y secciones para $S_f=0,033 \text{ kg/kg}$ // $S_d=0,035 \text{ kg/kg}$	75
Tabla 20. Corrientes, propiedades y secciones para $S_f=0,033 \text{ kg/kg}$ // $S_d=0,055 \text{ kg/kg}$	75
Tabla 21. Corrientes, propiedades y secciones para $S_f=0,033 \text{ kg/kg}$ // $S_d=0,085 \text{ kg/kg}$	75
Tabla 22. Corrientes, propiedades y secciones para $q_f=30 \text{ LPM}$	76
Tabla 23. Corrientes, propiedades y secciones para $q_f=35 \text{ LPM}$	76
Tabla 24. Corrientes, propiedades y secciones para $q_f=40 \text{ LPM}$	76
Tabla 25. Corrientes, propiedades y secciones para $q_d=10 \text{ LPM}$	77
Tabla 26. Corrientes, propiedades y secciones para $q_d=15 \text{ LPM}$	77

# Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Concentración de la solución del módulo vs una sola membrana. [28]	19
Ilustración 2. Cambio tasa flujo tres etapas FO8040 [28]	19
Ilustración 3. Cambio presión tres etapas FO8040 [28]	19
Ilustración 4. Cambio concentración tres etapas FO8040 [28]	19
Ilustración 5. Corrientes de entrada del estudio preliminar	34
Ilustración 6. Corrientes de salida en el estudio preliminar	35
Ilustración 7. Salinidades de entrada en el estudio preliminar	35
Ilustración 8. Salinidades de salida en el estudio preliminar	36
Ilustración 9. Presiones de entrada en el estudio preliminar	36
Ilustración 10. Presiones de salida en el estudio preliminar.	37
Ilustración 11. Presión osmótica de entrada en el estudio preliminar	37
Ilustración 12. Presión osmótica de salida en el estudio preliminar	38
Ilustración 13. NDP de corrientes de entrada y salida.	38
Ilustración 14. Corrientes de entrada en función de la temperatura	39
Ilustración 15. Corrientes de salida en función de la temperatura	39
Ilustración 16. Salinidades de entrada en función de la temperatura	40
Ilustración 17. Salinidades de salida en función de la temperatura	40
Ilustración 18. Presiones osmóticas de entrada en función de la temperatura	41
Ilustración 19. Presiones osmóticas de salida en función de la temperatura	41
Ilustración 20. NDP de entrada y salida en función de la temperatura	42
Ilustración 21. Salinidades en la entrada para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,039$	44
Ilustración 22 Salinidades en la salida para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,039$	45
Ilustración 23. Presión osmótica de entrada para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,039$	45
Ilustración 24. Presión osmótica de salida para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,039$	46
Ilustración 25. NDP de entrada y salida para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,039$	46
Ilustración 26. Salinidades en la entrada para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,065$	47
Ilustración 27. Salinidades en la salida para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,065$	47
Ilustración 28. Presión osmótica en la entrada para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,065$	48
Ilustración 29. . Presión osmótica en la salida para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,065$	48
Ilustración 30. NDP para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,065$	49
Ilustración 31. Salinidades en la entrada para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,085$	50
Ilustración 32. Salinidades en la salida para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,085$	50
Ilustración 33. Presión osmótica en la entrada para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,085$	51
Ilustración 34 Presión osmótica en la salida para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,085$	51
Ilustración 35. NDP para salinidades $S_f= 0,033 // S_d= 0,085$	52
Ilustración 36. Corrientes de entrada en función del caudal de alimentación	53

Ilustración 37. Corrientes de salida en función del caudal de alimentación	53
Ilustración 38. Salinidades a la entrada según la corriente de alimentación	54
Ilustración 39. Salinidades a la salida según la corriente de alimentación	54
Ilustración 40. Presión osmótica de entrada en función del caudal de alimentación	55
Ilustración 41. Presión osmótica de salida en función del caudal de alimentación	55
Ilustración 42. NDP en función del caudal de alimentación	56
Ilustración 43. Corrientes de entrada en función del caudal de <i>draw solution</i>	57
Ilustración 44. Caudales de salida en función del caudal de <i>draw solution</i>	57
Ilustración 45. Salinidades de entrada en función del caudal de <i>draw solution</i>	58
Ilustración 46. Salinidades de salida en función del caudal de <i>draw solution</i>	58
Ilustración 47. Presiones osmóticas de entrada en función del caudal de <i>draw solution</i>	59
Ilustración 48. Presiones osmóticas de salida en función del caudal de <i>draw solution</i>	59
Ilustración 49. NDP en función de la variación de la <i>draw solution</i>	60

# Índice de figuras

Figura 1 Publicaciones sobre ósmosis directa desde 2005 (base de datos de SCOPUS) [3]	8
Figura 2. Aplicación del proceso FO para desalinización de agua de mar.	9
Figura 3. Proceso de ósmosis directa uso directo de la DS y FS (a); proceso con recuperación (b) [1]	10
Figura 4. Transporte a través de membranas asimétricas FO [7]	11
Figura 5. Comparación de solutos en RO y FO [4]	12
Figura 6. Ejemplo de capa activa y porosa de una membrana de FO [6]	13
Figura 7. Ejemplo de tipología membrana plana [26]	15
Figura 8. Ejemplo de configuración tubular [27]	15
Figura 9. Ejemplo membrana configuración de fibra hueca. [27]	16
Figura 10. Ejemplo de membrana con configuración en espiral [27]	16
Figura 11. Membrana en espiral para ósmosis inversa [38]	17
Figura 12. Ejemplo de membrana TFC con diferentes tipologías de capa [15]	18
Figura 13. Ilustración de membrana en espiral en un módulo FO [31]	20
Figura 14 Ejemplo módulo HHF02 [44]	21
Figura 15. Ejemplo módulo HHF014 [44]	21
Figura 16. Ejemplo módulo HHF02 44]	21
Figura 17. Diagrama del proceso de FO de Asai Kaisei [43]	22
Figura 18. Mediano y pequeño quipo de FO de Asai Kasei [43]	22
Figura 19. Membrana desarrollada por Fluid Technology Solutions [47]	22
Figura 20. Membrana de FO desarrollada por Tovobo [48]	23
Figura 21. Límite entre dos subsistemas [33]	24
Figura 22. Configuración propuesta de estudio	33

---

# 1 OBJETIVO

---

Este trabajo hace patente el desarrollo que ha tenido la ósmosis directa en los últimos años. La FO es una tecnología de membrana relativamente nueva que se está abriendo mercado y se ha empleado con éxito en los procesos de tratamiento de agua. La FO no necesita ninguna presión externa para llevarse a cabo, esto supone que el proceso utilizado será de bajo consumo energético, lo que la convierte en una tecnología muy interesante comparada con otros tratamientos de membrana. Hay que recalcar que el proceso en sí mismo no permite la desalación del agua, pero si combinamos esta tecnología con un segundo paso- el cuál sí consume energía- podremos aplicarlo para la desalación de agua, en la industria alimenticia o en la farmacéutica. Por otra parte, la FO tiene aplicación en los procesos de tratamientos de agua donde el objetivo es la concentración o la dilución de un flujo. Es decir, la propia transferencia del disolvente, como se ha dicho antes en estas aplicaciones el proceso es espontáneo, por lo que no necesitará un aporte de energía externo.

Este trabajo tiene como objetivo principal realizar un estudio teórico de un módulo precomercial de ósmosis directa (FO, del inglés *Forward Osmosis*). El módulo en particular es el correspondiente al FO8040, comercializado por la empresa Toray Chemical Korea, el cual se testará posteriormente en la universidad de Sevilla, en el marco del proyecto EERES4WATER, permitiéndonos comparar los resultados teóricos obtenidos en este trabajo con los obtenidos en el laboratorio.

## 2 INTRODUCCIÓN

### **Demanda de tratamiento de agua y aguas residuales innovador y energéticamente eficiente**

Muchos de los principales objetivos del desarrollo sostenible (ODS), proporcionados por las Naciones Unidas en 2015, están relacionados con un suministro de agua suficiente para la población actual y futura. Actualmente la agricultura consume el 70% del agua dulce del mundo, seguida de la industria que consume el 19%. Por esta razón, es necesario el uso eficiente del agua en la agricultura, así como en los procesos de producción industrial. Hoy en día las industrias aplican tecnologías de tratamiento de agua y de las aguas residuales. A menudo, se logra la recuperación de esta, reduciendo así la demanda de agua dulce y las cantidades de aguas residuales. Sin embargo, la mayoría de las tecnologías de tratamiento consumen grandes cantidades de energía. Con el objetivo de lograr la sostenibilidad, es necesario mejorar la eficiencia energética del tratamiento del agua. [1]

Uno de los procesos principales utilizados en la recuperación del agua es la filtración mediante tecnología de membranas. Las más convencionales son la micro, ultra y nanofiltración, así como la ósmosis inversa (RO). Todas ellas usan una diferencia de presión transmembrana que se genera mediante el bombeo. Así, las moléculas de agua atraviesan la membrana y se rechazan muchas de las impurezas suspendidas en micro y ultrafiltración y parte de los iones disueltos en nanofiltración y en RO. Debido a que el paso de la corriente por la membrana no es un proceso natural en estos tratamientos el consumo de energía crece acorde a la demanda de la presión en la operación [1].

A diferencia de estas tecnologías anteriormente citadas, la ósmosis directa o forward osmosis (FO) es una tecnología de membrana que utiliza la diferencia de presión osmótica entre dos soluciones para generar un flujo de agua a través de la membrana. La FO utiliza el diferencial de presión osmótica ( $\Delta\pi$ ) a través de la membrana puesto que ambas corrientes circulan con presión cercana a la ambiente. Sin embargo, la RO utiliza el diferencial de presión hidráulica menos la de presión osmótica como fuerza impulsora para el transporte de agua a través de la membrana. [2]

En particular, considerando que la fuerza motriz del proceso FO es la misma que la del proceso RO, la diferencia entre las presiones hidráulicas menos la diferencia de presiones osmóticas, el signo indica hacia dónde se produce la transferencia de disolvente siendo negativa en el caso de FO. El proceso de FO da como resultado la concentración de una corriente de alimentación (de menor concentración) y la dilución de una corriente altamente concentrada (denominada solución de extracción o *draw solution*). Por lo que, teóricamente, se requiere poca energía externa y se logra un tratamiento de agua con eficiencia energética [2].

Si bien es cierto que estas estas condiciones específicas son prometedoras para la tecnología, sigue habiendo escasez de estudios piloto y a escala que corroboren el beneficio energético teórico de las configuraciones tecnológicas propuestas. El crecimiento de las publicaciones de investigación de FO (Figura 1), artículos desarrollados entre 2005 y 2018, se basan en gran medida en estudios teóricos donde los resultados rara vez se aplican a instalaciones a gran escala y reales. Pero sería necesario una ampliación del número de procesos a escala real, ya que entre los estudios a escala y el estudio teórico se han demostrado variaciones, como, por ejemplo, la diferencias en la permeabilidad entre los elementos FO teóricos o desarrollados a pequeña escala y aquellos reproducidos a gran escala. [3]

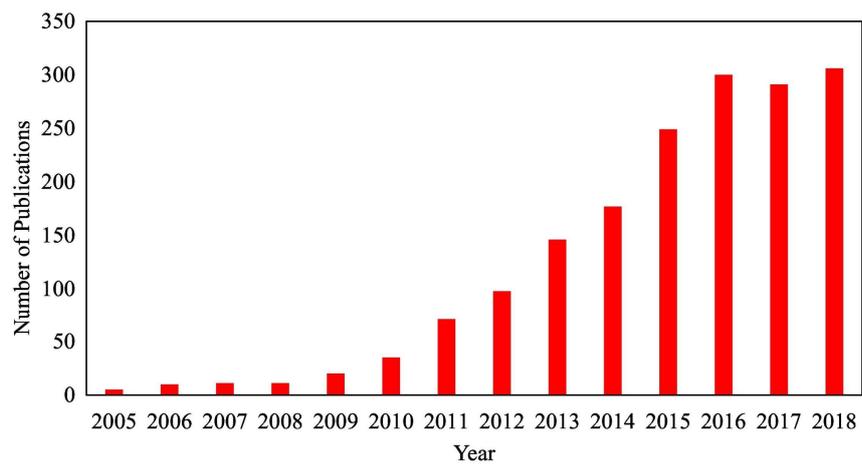


Figura 1 Publicaciones sobre ósmosis directa desde 2005 (base de datos de SCOPUS) [3]

## 3 ÓSMOSIS DIRECTA

### Tecnología de ósmosis directa

La ósmosis directa es una tecnología que utiliza una membrana para tratar dos corrientes líquidas. La Figura 2 ilustra el principio de funcionamiento. En un lado se encuentra instalada la membrana por la que se filtra la llamada solución de alimentación (solución diluida o *feed solution*)<sup>1</sup>. Por otro, dispone de una entrada para la *draw solution* (solución osmótica, solución de arrastre o solución de extracción)<sup>2</sup>. La *feed solution* tiene una presión osmótica baja. En el otro lado de la membrana está la llamada solución de extracción, la cual tiene una presión osmótica más alta. Una membrana semipermeable y selectiva separa la solución de alimentación y la solución de arrastre. Debido a la diferencia en la presión osmótica, el agua pasa a través de la membrana desde el lado de la solución de alimentación a la solución de extracción, es decir, el gradiente de presión osmótica permite crear un flujo de disolvente de la solución diluida a la solución concentrada, este proceso se hace de forma espontánea, consumiendo sólo energía auxiliar, a diferencia de la ósmosis inversa que mueve el flujo a través de la membrana gracias a una diferencia de presión hidráulica [1]. La FO en sí misma tiene como resultado la concentración de la disolución de alimentación y la simultánea dilución de la *draw solution*. Sin embargo, la obtención de agua desalada a partir de agua salada de alimentación mediante el uso de ósmosis directa se produce en dos etapas: una primera etapa donde se produce la extracción de agua a partir de la alimentación en un módulo FO mediante el uso de *draw solution* y una segunda etapa, necesaria para la recuperación del agua de la *draw solution*. Es preciso aplicar a la solución extractora un proceso de separación, este consumirá energía térmica o mecánica. Al efectuar esta separación la solución extractora recupera su alta concentración inicial, pudiendo utilizar el sistema cíclicamente. La aplicación a desalación de agua de la FO no es comercial actualmente porque las técnicas convencionales de separación de la solución extractora (*draw solution*) son menos eficientes que el proceso desalación. Por tanto es necesario el desarrollo de procesos de separación no convencionales que permitan mejorar la eficiencia antes de tener unas buenas perspectivas comerciales del uso de la FO en desalación.

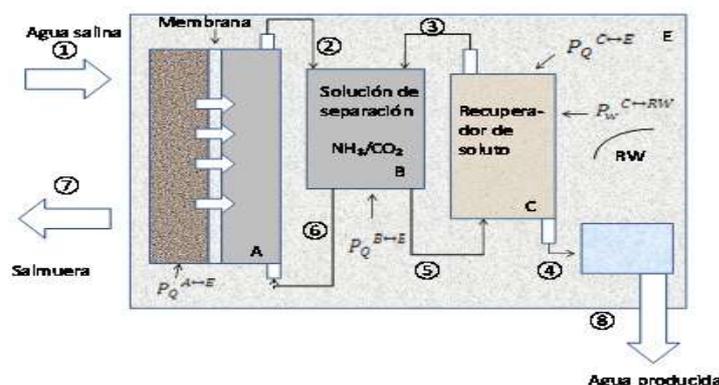


Figura 2. Aplicación del proceso FO para desalinización de agua de mar.

### Ventajas principales de la ósmosis directa

Las principales causas para seguir desarrollando esta tecnología se centran sobre todo en [1]:

- Un consumo bajo de la energía al tratarse de un proceso espontáneo: los costes de la desalinización mediante el uso de ósmosis inversa (RO) están entre el 20 y el 35 % de los costes totales, un porcentaje muy alto cuando el precio de la electricidad es elevado, por lo que la ósmosis directa se está abriendo

<sup>1</sup> De aquí en adelante se utilizará, indistintamente, cualquiera de los dos términos.

<sup>2</sup> De aquí en adelante se utilizará, indistintamente, cualquiera de los dos términos.

camino como alternativa a la ósmosis inversa. [5]

- Fácil eliminación de las capas de suciedad de la membrana: debido al proceso de polarización que tienen lugar en todas las tecnologías de membrana, pero en comparación con la ósmosis inversa es más fácil de eliminar debido a la ausencia de compresión. La polarización consiste en un aumento o en una disminución de solutos en la superficie de membranas como veremos más adelante. [1]
- Tratamiento simultáneo de dos corrientes en un mismo paso. [1]

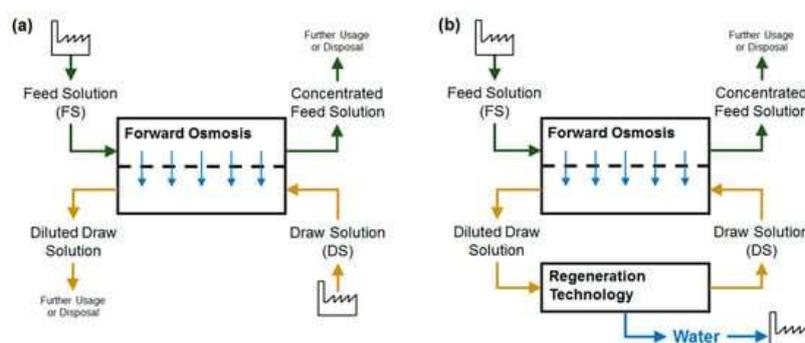


Figura 3. Proceso de ósmosis directa uso directo de la DS y FS (a); proceso con recuperación (b) [1]

- Tratamiento de líquidos no aptos para otros procesos de membrana. [1]

### Limitaciones principales de la ósmosis directa

Desde un punto de vista económico el proceso de desalinización mediante el uso de forward osmosis (FO) cuando esté desarrollado conlleva una serie de ventajas como acabamos de ver, siempre que se desarrollen a gran escala. No obstante, como se ha comentado anteriormente, existen varios motivos que provocan la disminución del flujo de agua, reduciendo por tanto el rendimiento total, disminuyendo su eficiencia y como consecuencia limitando el potencial de la novel técnica.

#### 3.1.1 Concentración de polarización

La concentración de polarización (CP) es un fenómeno derivado del propio proceso de separación en todo tipo de membranas, se desarrolla debido a la aparición de la diferencia de concentración en la interfase de la membrana, es decir, se produce por la acumulación o disminución de solutos cerca de la superficie de la membrana.

La concentración de polarización en procesos FO pueden ser clasificados como polarización de concentración interna (ICP) y polarización de concentración externa (ECP) [7], esta separación se debe a la geometría característica de las membranas asimétricas de ósmosis directa, las cuales constan de una capa activa densa y una capa soporte porosa como se verá más adelante. Normalmente la capa activa está en contacto con la alimentación, de modo que la transferencia de disolvente se realiza desde la capa activa hasta la otra cara de la membrana. La polarización por concentración sucede externamente en la interfase disolución-superficie de la membrana, e internamente en la capa soporte porosa.

La ocurrencia de CP fue encontrada a ambos lados de la membrana e influyen de forma directa en la disminución del flujo de agua y en la recuperación a través de la membrana selectiva [7]. Esto se debe a que la presión osmótica de cada disolución se ve afectada en la superficie de la membrana por el cambio de concentración. El efecto de ambas polarizaciones es la reducción de la fuerza motriz por reducción del gradiente de presiones osmóticas a través de la membrana.

##### 3.1.1.1 Polarización por concentración externa (ECP)

Este fenómeno es común tanto en los procesos de ósmosis directa como de ósmosis inversa. Podemos diferenciar entre polarización por concentración externa concentrativa o dilutiva, que se dé una u otra depende principalmente de la orientación de la membrana.

Cuando la alimentación fluye sobre la capa activa de la membrana dando lugar a la acumulación de solutos y se produce un aumento de la concentración de alimentación en la interfase de alimentación- capa activa, nos encontramos frente a una ECP concentrativa; sin embargo, si la variación de la concentración se alcanza en la interfase *draw solution*-capa activa, se produce una ECP diluida. Esta aparece cuando la capa soporte de la membrana está confrontada a la solución de alimentación. Hay que anotar que los efectos producidos por este fenómeno son relativamente insignificantes [3].

### 3.1.1.2 Polarización por concentración interna (ICP)

La polarización por concentración interna se refiere a la ocurrencia de polarización dentro de la capa porosa de la membrana debido a la incapacidad del soluto para penetrar la capa densa selectiva de la membrana fácilmente. Esto provoca un flujo transmembrana bastante bajo. Al igual que en la ECP podemos distinguir entre concentrativa y dilutiva. La ICP concentrativa tiene lugar cuando se opera de tal forma que la alimentación se enfrenta a la capa soporte porosa de la membrana. La penetración de soluto a través de la capa activa hace que la solución de alimentación se concentre, provocando una zona más concentrada en la capa porosa, por lo que la fuerza de accionamiento se reduce bastante. Por el contrario, si la capa soporte porosa está enfrentada a la *draw solution* en vez de a la solución de alimentación lo que acaece es la ICP dilutiva [7].

Basándonos en algunos estudios experimentales, la reducción del flujo de agua en la FO se debe principalmente al origen de la ICP, pudiendo incluso disminuir el flujo de agua en un 80% [7].

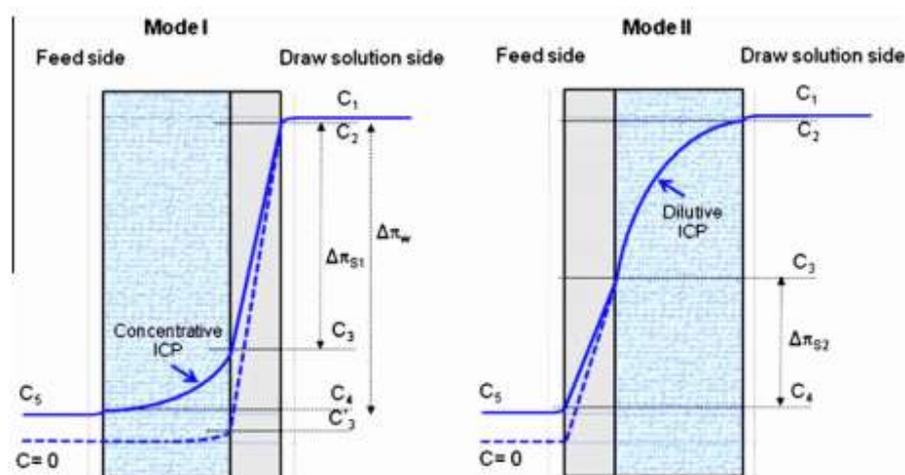


Figura 4. Transporte a través de membranas asimétricas FO [7]

La polarización por concentración interna concentrativa es más deseada que la dilutiva ya que se producen mayores flujos de agua durante la desalinización.

### 3.1.2 Ensuciamiento de las membranas

El ensuciamiento de las membranas puede afectar adversamente al rendimiento de estas, disminuyendo con ello el flujo de agua a través de ellas. El problema reside en que es un hecho inevitable y se hace visible con el paso del tiempo, lo que puede llegar a ser un serio problema si no se limpian periódicamente.

Sin embargo, esta disposición es menor que en los procesos de ósmosis inversa, que requerían mayor limpieza y los costes de mantenimiento serían también más elevados, por lo que la vida de la membrana en procesos FO es mayor. Otra de las ventajas que llevan adscritas este tipo de membranas es que en muchos casos pueden limpiarse mediante retro lavado, lo que simplifica la eliminación del ensuciamiento orgánico e inorgánico, reduciendo así la necesidad del uso externo de agentes químicos para la limpieza; lo que supone una ventaja debido a que no sólo no perjudica la selectividad de la membrana y le quita vida de la útil, sino que también reduce el consumo energía adicional y elimina los flujos de residuos concentrados [8]. Otra alternativa que también se ha aplicado con éxito para su lavado ha sido el uso de un campo eléctrico, el uso de esta técnica puso

de manifiesto una restauración completa de los flujos de agua a su valor original [7].

### 3.1.3 Difusión inversa del soluto

La difusión inversa del soluto a través de la membrana hacia la solución de alimentación parece una realidad inevitable. Es un hecho que hay que tener bien presente, puesto que podría dañar el proceso, aparte de que empeora el ensuciamiento de la membrana. Este suceso según señalan algunas investigaciones está fuertemente ligado a la selectividad de la membrana, aunque no se ve afectado por la estructura de la capa soporte y la concentración de la *draw solution* [7].

Una proporción elevada del flujo inverso del soluto respecto al flujo directo de agua ( $J_s/J_w$ ) refleja un descenso de la selectividad de la membrana y una menor eficiencia de FO.

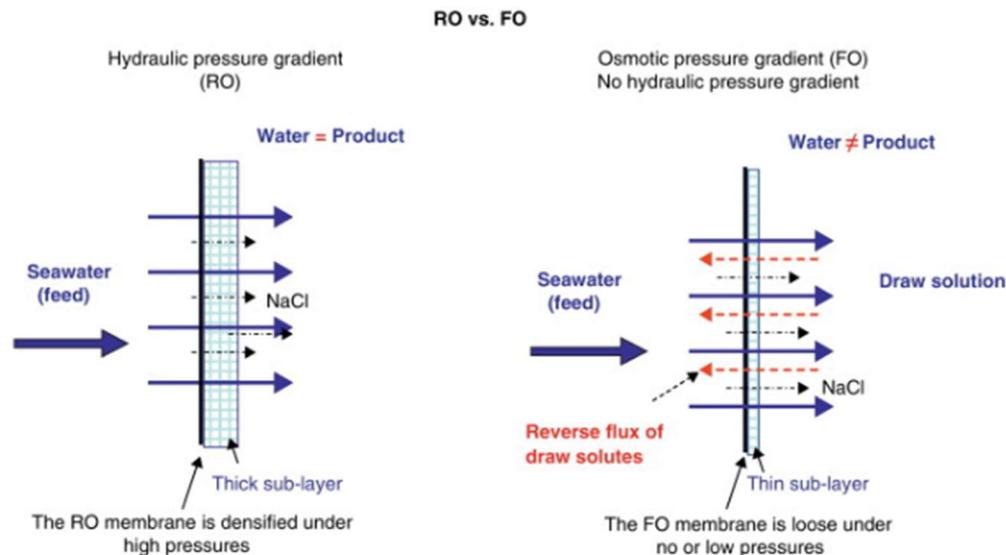


Figura 5. Comparación de solutos en RO y FO [4]

Teniendo en cuenta las ventajas y las limitaciones del proceso FO queda de manifiesto que la viabilidad de la desalación de agua mediante el uso de ósmosis directa depende en gran parte de la necesidad de regeneración de la solución extractora con un consumo energético menor que el de la ósmosis inversa.

Otros factores que influirán será el saber escoger la *draw solution* adecuada para el proceso. En parte este paso se quiere salvar mediante el uso de soluciones extractoras reutilizables, es decir, una vez que la solución extractora se diluye debido al proceso de concentración, e inevitablemente debe descartarse por cuestiones de rendimiento darle un segundo uso y reutilizarlas en procesos industriales posteriores. [34]

## 4 MEJORAS DE LOS ÚLTIMOS AÑOS

### Membranas

Como hemos señalado anteriormente en los últimos años ha crecido el interés por el desarrollo de la ósmosis directa debido a las ventajas técnicas que presenta, pero sigue siendo una tecnología inmadura para aplicarla a escala industrial. Uno de los objetivos principales es dar con la membrana ideal para este proceso. [6]

A finales del siglo XX, los primeros experimentos de la ósmosis directa utilizaron las mismas membranas que se aplicaban en la tecnología de ósmosis inversa. Esto supuso unos flujos de permeados muy bajos debido a la polarización de alta concentración, por lo que el desarrollo de esta nueva tecnología quedó en un segundo plano como recurso para tratamiento de agua. Esto se debe a que las membranas aplicadas en la RO suelen tener dos capas: una capa activa densa y una capa porosa. La capa activa requiere un espesor mínimo debido a las altas presiones que soporta. Como resultado de este gran espesor la concentración de polarización es muy alta al usar membranas de RO en FO, produciendo flujos de permeado bajo. [1]

En el desarrollo continuo en búsqueda de la membrana específica para la ósmosis directa se plantean capas activas más delgadas, ya que en la *forward osmosis* no es necesario soportar una alta presión hidráulica al tratarse de un proceso espontáneo. En una capa activa más delgada la polarización de concentración disminuye obteniendo como resultado mayores flujos de permeado, lo que supone que la FO tiene potencial para tratar agua salada y aguas residuales de manera eficiente.

#### 4.1.1 Características de las membranas

Como hemos señalado anteriormente, toda membrana tiene dos caras, la capa activa y la capa porosa.

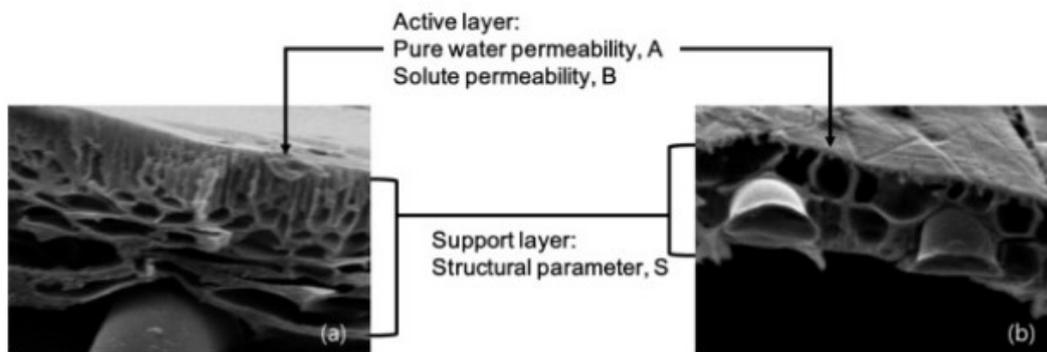


Figura 6. Ejemplo de capa activa y porosa de una membrana de FO [6]

##### 4.1.1.1 Capa activa

La capa activa desempeña el papel principal desde el punto de vista selectivo, el rendimiento de la ósmosis directa está estrechamente relacionado con las características de esta capa, así mismo lo estarán el flujo de agua y el flujo del soluto inverso. La capa activa deberá diseñarse de forma que sea lo más selectiva hacia las moléculas de agua, rechazando, en la medida de sus posibilidades los solutos y los contaminantes del flujo de alimentación. [6]

El flujo de agua es el resultado de la difusión del flujo al atravesar la membrana, los dos factores que afectarán al flujo de transporte serán la fuerza impulsora y la selectividad de la membrana. La fuerza impulsora vendrá dada por el gradiente de presión osmótica. Por lo que el flujo de agua en la capa activa ( $J_w$ ) vendrá dado por la siguiente ecuación. [6]

$$J_w = A \cdot \Delta\pi \quad (4.1)$$

donde A es la permeabilidad del agua y  $\Delta\pi$  es la diferencia de presión osmótica entre las soluciones de alimentación y extracción. Por tanto, mediante la ecuación (4.11) queda patente que el flujo de agua pura

aumenta proporcionalmente con el aumento de A. [6]

Por otro lado, la difusión del soluto a través de una membrana de FO está marcado por la diferencia en la concentración de soluto entre las dos soluciones de ambos lados de la membrana. Por lo que, la constante proporcional de la ecuación de transporte de solutos es un indicador de la selectividad de una membrana de FO, que queda definido por la ecuación (4.2). [6]

$$J_s = B \cdot \Delta C \quad (4.2)$$

donde  $J_s$  es el flujo de soluto,  $B$  es la permeabilidad del soluto y  $\Delta C$  es la diferencia de concentración de soluto entre la corriente de alimentación y extracción.  $B$  dependerá de la *draw solution* utilizada en el proceso. [6]

#### 4.1.1.2 Capa de soporte

La capa de soporte de una membrana FO se utiliza para proporcionar resistencia mecánica a la capa activa; como resultado, tiende a ser más gruesa y porosa. Lo que se traduce en una reducción del rendimiento de la membrana. [6]

EL parámetro estructural ( $S$ ) está ligado con el rendimiento de la membrana y relacionado directamente al espesor ( $t_s$ ) de la capa soporte, la tortuosidad ( $\tau$ ) y la porosidad ( $\varepsilon$ ). [6]

$$S = \frac{t_s \cdot \tau}{\varepsilon} \quad (4.3)$$

Como se describe en la ecuación. (4.3), una capa de soporte más delgada, más porosa y menos tortuosa tiene un valor  $S$  más bajo y, en consecuencia, puede alcanzar una diferencia de presión osmótica más alta de la solución de extracción en la interfaz entre las capas activa y de soporte, lo que da como resultado un mayor flujo de agua y, por tanto, un mayor rendimiento. [6]

El parámetro estructural ( $S$ ) de una membrana de FO se estima experimentalmente porque los términos de la Ec. (3) son difíciles de medir directamente. Sin embargo, algunos estudios han intentado calcular la  $S$  mediante la adopción de herramientas de medición. Desafortunadamente, no pudo obtener estimaciones precisas de  $S$  en comparación con los métodos convencionales basados en pruebas. Considerando que algunas propiedades fisicoquímicas del sustrato de la capa de soporte no reflejadas en la Ec. (3), como la hidrofobicidad, puede afectar la difusión de agua y moléculas de soluto, parece que las técnicas experimentales son más adecuadas para la medición de valores  $S$  precisos hasta ahora. [6]

En el curso del desarrollo continuo de la membrana, se desarrollaron membranas FO especiales con una capa de soporte más delgada. Al no producirse una alta presión hidráulica en FO, la capa de soporte no necesita ser tan gruesa como en RO. Con una capa de soporte más delgada, la polarización de la concentración disminuye permitiendo mayores flujos de permeado. [6]

De lo anterior podemos comprobar que mediante el flujo inverso de soluto podemos evaluar, de forma más o menos directa, el rendimiento de las membranas. Las tres características que afectan directamente a la eficiencia de la membrana son la ICP, la difusión inversa de soluto y el ensuciamiento de la membrana, por lo que es conveniente tener en cuenta estos factores a la hora de desarrollar nuevas membranas [7].

#### 4.1.2 Configuración de las membranas

La membrana es la unidad básica de una instalación que compone las diferentes tecnologías de membrana. Estas podrán tener diferentes disposiciones en la instalación, siendo las más comunes:

- Configuración plana: es la tipología inicial, se compone por una serie de membranas planas con forma rectangular o de discos, se apoyan sobre soportes porosos, cuya función principal es dotar de resistencia mecánica a la membrana. Recoge el permeado de forma uniforme siendo este direccionado al exterior. Los diferentes pasos de las membranas están separados entre ellos con la ayuda de unos espaciadores,

responsables de que la solución que la atraviesa lo haga de forma proporcional a lo largo de la membrana, así como de separar dos capas activas de dos membranas consecutivas o recoger el rechazo de forma uniforme. Es decir, en esta tipología de membranas se aplicarán conjunto espaciador-membrana-soporte; soporte-membrana y así sucesivamente. Este tipo de membranas presenta superficies pequeñas, lo que se traduce en poca capacidad de producción. [25]

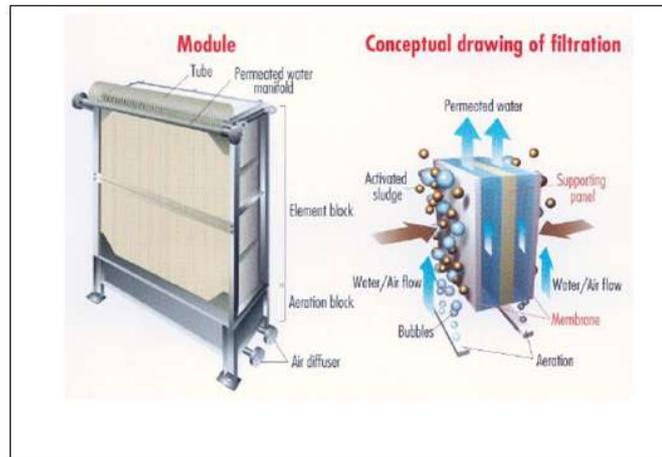


Figura 7. Ejemplo de tipología membrana plana [26]

- **Configuración tubular:** Formada por un conjunto de tubos largos y porosos, típicamente entre 1,5 y 3 m de largo, estos sirven de soporte a las membranas tubulares colocadas en su interior. Operan de manera tangencial, donde el fluido es bombeado a través de la superficie de membrana en una acción de barrido. El permeado se recogerá entre la pared exterior de la membrana y la interior del tubo contenedor [25,27]

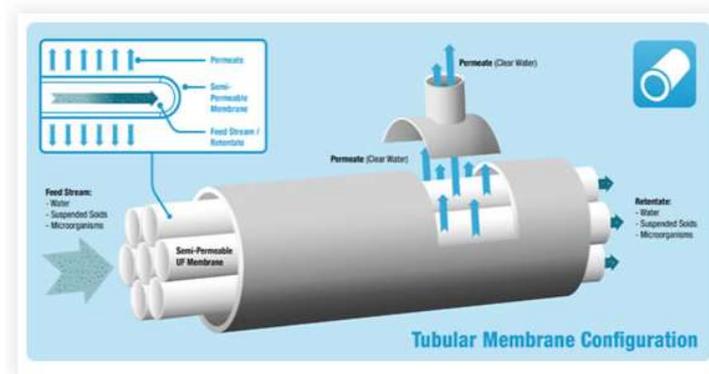


Figura 8. Ejemplo de configuración tubular [27]

- **Configuración de fibra hueca:** Formada por miles de membrana de fibra hueca, en forma de U y dispuestas de forma paralela a un tubo central este tipo de membranas puede operar con flujo de “dentro hacia afuera” o de “fuera hacia adentro” Esta tipología de membrana ofrecen una solución compacta y económica para filtrar grandes volúmenes de líquidos utilizando el mínimo espacio. La solución se introduce a presión en el tubo central donde se reparte de forma radial y uniforme por todo el haz de fibras, cuando la solución entra en contacto con la capa activa el permeado atraviesa la misma por su interior hasta alcanzar el extremo abierto, pasando por la capa porosa, la cual tiene como objetivo conseguir un buen reparto hidráulico en la recogida del permeado. El rechazo se desplazará hacia el otro extremo saliendo por el exterior del mismo. [25, 27]

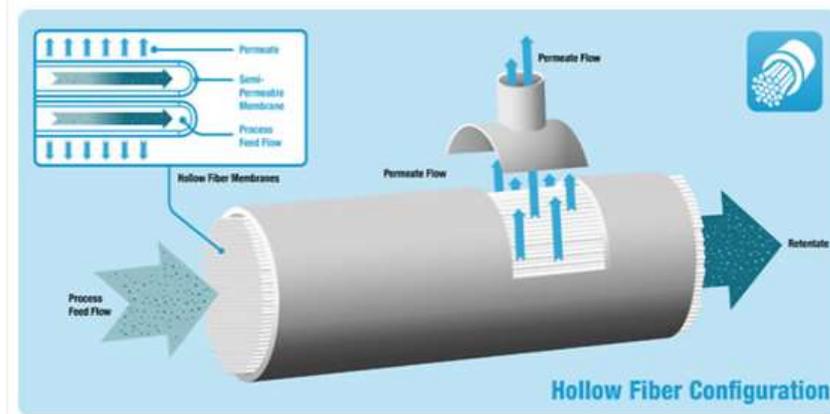


Figura 9. Ejemplo membrana configuración de fibra hueca. [27]

- **Configuración de arrollamiento en espiral:** Es la más extendida en el proceso de ósmosis debido a su robustez, el uso eficiente de la energía y a que es económica. Es la única que se utiliza actualmente en la industria de la desalación. Este tipo de membranas están formadas por membranas planas arrolladas en espiral alrededor de un tubo central, se arrollan dos membranas separadas entre sí por un espaciador más fino, denominado espaciador de permeado. Esta tipología establece en cada cara de las membranas un canal que facilita el flujo de agua a través de la misma, tanto en el lado de alimentación como en el de rechazo. Así se consiguen minimizar las pérdidas dentro de la membrana. [25,27]

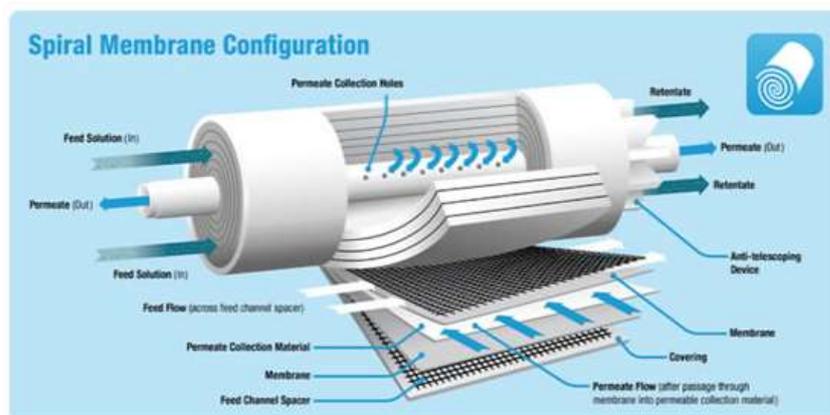


Figura 10. Ejemplo de membrana con configuración en espiral [27]

Para que una membrana tenga buenos resultados en la ósmosis directa deben desarrollarse membranas específicas para esta tecnología. Una membrana de ósmosis directa ha de cumplir ciertos requisitos: debe ser selectivamente permeable (que permita el paso de un determinado fluido o soluto y no el paso de otros), debe tener alta densidad de la cara activa (para un rechazo alto de soluto), cara soporte delgada y de baja porosidad (para reducir la concentración por polarización interna o ICP) y ser hidrofílica (para mejorar la densidad de flujo de permeado, así como reducir el ensuciamiento de la membrana). [38]

Todas las anteriores pueden ser utilizadas en ósmosis directa- cada una presenta unas ventajas y unos inconvenientes- con la salvedad que la configuración en espiral utilizado en ósmosis inversa, Figura 11, tienen la desventaja de que pueden inducir un flujo en el canal de permeado para realizar limpieza o backwashing. Por esta razón los módulos en espiral que se utilizan para la ósmosis directa presentan un diseño ligeramente diferente, el canal de permeado estará bloqueado a la mitad de su longitud para impedir que la disolución de alimento pase al otro lado y así forzar que la *feed solution* recorra toda la membrana. [34,38].

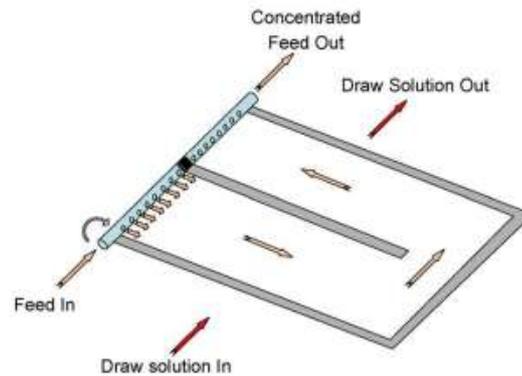


Figura 11. Membrana en espiral para ósmosis inversa [38]

#### 4.1.3 Tipos de membranas para ósmosis directa.

Las membranas actuales se dividen en tres grupos dependiendo del método de fabricación: celulósicas, compuestas de película delgada (TFC) y modificadas químicamente.

- **Membranas celulósicas:** Este modelo de membranas se aplica sobre todo en el ámbito farmacéutico y en menos escala en tratamiento de agua. Este grupo de membranas se comporta muy bien en procesos de ósmosis directa debido a su módulo de fibra hueca. Son estables químicamente, además de presentar gran robustez mecánica y baja tendencia al ensuciamiento, así como altos flujos de agua, de sal, también tienen gran resistencia al cloro y otros oxidantes. Su principal desventaja reside en que presentan cierto rechazo a la hidrofilia [7,11].
- **Membranas modificadas químicamente:** se han ido desarrollando en los últimos años para preparar membranas de fibra óptica, han reducido la polarización por concentración interna y mejorando los flujos de agua. Este tipo de membranas, con fibras huecas, eliminan metales pesados [7, 11].
- **Membranas de película delgada (TFC):** Esta tipología de membrana cuenta con múltiples capas. Se basan en el mismo principio que el utilizado en RO, con la diferencia de que necesitan aguantar menos presión por tanto se puede disminuir el grosor de las diferentes capas que lo forman, aumentando de esta manera el flujo de agua y rechazo de solutos. Además permite optimizar la capa activa y de soporte por separado [15]

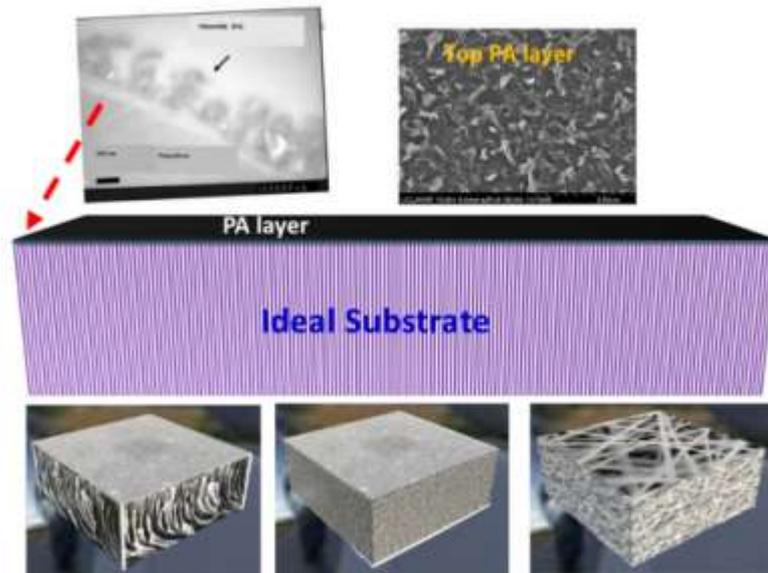


Figura 12. Ejemplo de membrana TFC con diferentes tipologías de capa [15]

#### 4.1.4 Membranas comerciales

Actualmente son muchas las membranas que están en desarrollo para esta tecnología, pero son muy pocas las que alientan una posible viabilidad económica en su desarrollo a gran escala, hay que tener en cuenta que los resultados obtenidos por el fabricante en el laboratorio no son los mismos que obtendríamos a gran escala. [31]

A continuación, presentaremos dos membranas en espiral que, aunque hoy en días solo son un prototipo, prometen viabilidad para su desarrollo a gran escala. La FO8040 y FO4040, ambas son iguales, pero cambian en diámetro y longitud, y por tanto el área de la membrana. [31]

- FO8040

Esta membrana es la FO8040, desarrollada por Toray Chemical Korea, Inc. aún en vías de desarrollo, es una membrana de película delgada en espiral (ver Figura 13). Se ha analizado el rendimiento en su uso para la ósmosis directa mediante la utilización de varios módulos, ya que esto simularía el proceso a escala real. Se ha diseñado teniendo en cuenta que en la ósmosis inversa requiere la utilización de alta presión, a diferencia de la FO, por lo que no solo el consumo de energía es alto también lo es la degradación de la membrana debido a su gran índice de ensuciamiento. [28]

El objetivo principal para esta membrana en la citada referencia es conocer su rendimiento, teniendo en cuenta variables como la pérdida de carga, la tasa de flujo, la presión cuando se aplica a un módulo en serie de múltiples etapas, el cambio en el flujo debido a la presión transmembrana, etc. Una vez conocidos estos factores se podrá ver si es interesante desarrollarla a gran escala. [28]

Hay que tener en cuenta que los resultados obtenidos a pequeña escala variarán cuando se desarrolla a escala real, pero el objetivo principal de los estudios llevados a cabo es presentar datos de rendimiento para poder diseñar un módulo de ósmosis directa en un sistema a gran escala, por tanto, se espera que cambien los datos cuantitativos, pero no el aspecto cualitativo. [28]

El experimento ha tenido lugar con un módulo FO8040 enrollado en espiral, con agua cruda (para evitar daños en la membrana) y como *draw solution* el NaCl, la temperatura del agua se ha fijado en 18 °C. [28]

La Ilustración 1 recoge la concentración de la solución de extracción del módulo en función del caudal comparándola con una lámina de membrana. [28]

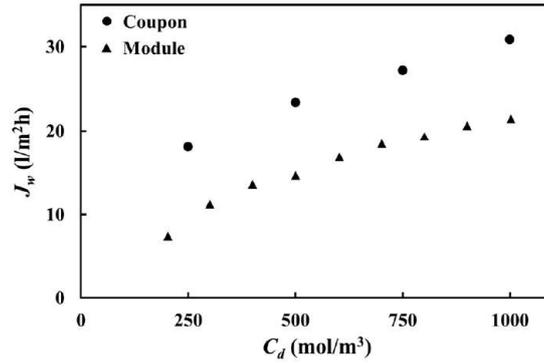


Ilustración 1. Concentración de la solución del módulo vs una sola membrana. [28]

Hay que tener en cuenta que la diferencia de concentración no se debe a que se desarrolla en módulo, es decir, a la simulación de la gran escala, esta diferencia es debido, principalmente, a que en el módulo se llevó a cabo con agua pura, mientras que el otro experimento se realizó con agua del grifo. [28]

Otro de los puntos a tener en cuenta es que la ósmosis directa no se produce completamente de forma espontánea, a no ser que el producto final sea la *draw solution* diluida. Para conseguir otro producto final, como puede ser el agua desalada se necesita que tenga lugar más de una etapa, lo que provocará que haya que tener en cuenta una pérdida de carga en las etapas sucesivas. Teniendo en cuenta lo anterior, y enfocándonos en el flujo de alimentación y la solución diluida en un experimento de tres etapas vemos cómo variará el flujo, la presión y la concentración a lo largo de las diferentes etapas usando un módulo de FO8040.

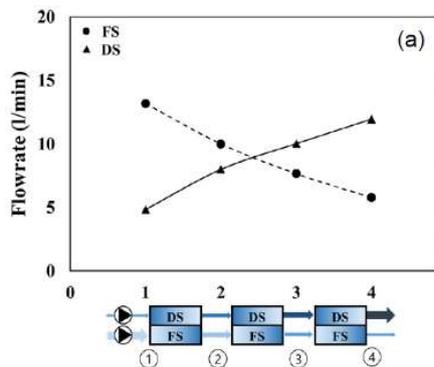


Ilustración 2. Cambio tasa flujo tres etapas FO8040 [28]

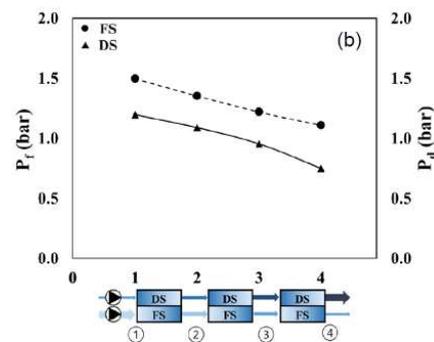


Ilustración 3. Cambio presión tres etapas FO8040 [28]

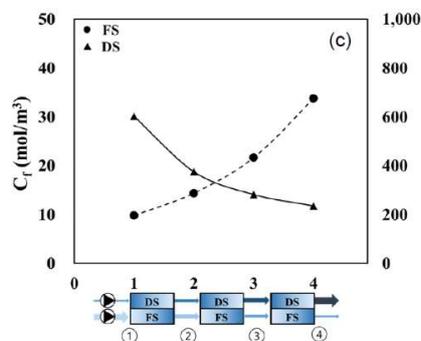


Ilustración 4. Cambio concentración tres etapas FO8040 [28]

En la Ilustración 2 podemos apreciar cómo la velocidad del flujo de entrada disminuye a medida que pasa a través del módulo, mientras que la velocidad de la solución de extracción aumenta, esto es debido a la diferencia

de presiones osmóticas de ambas corrientes.[28]

En la Ilustración 3 se muestra que la diferencia de presión de la entrada/salida de cada módulo es de 1,5 (1ª etapa), 1,3 (2ª etapa) y 1,1 (3ª etapa) bares para el agua de alimentación, tiende a disminuir a medida que avanzan las etapas. Mientras que para la solución de extracción es de 0,7 (1ª etapa), 1,1 (2ª etapa), 1,2 (3ª etapa) bares, mostrando una tendencia a aumentar según se desarrollan las etapas. Como podemos observar la diferencia de presión de las corrientes es diferente, por lo que se pone de manifiesto que la presión de transmembrana tendrá lugar irremediamente. Hay que evitar que la presión del flujo de extracción sea menor que la del flujo de entrada tanto como sea posible, ya que así evitaremos daños en la propia membrana. [28]

Es decir, teniendo en cuenta la Ilustración 2 y la Ilustración 3 la tasa de flujo de entradas disminuye, mientras que el flujo de la *draw solution* aumenta, esto ocurre para minimizar el efecto de la pérdida de carga, mientras que la solución de extracción aumenta para aumentar el efecto de la pérdida de carga. Por lo que habrá que diseñar el sistema de forma que la presión de ambas corrientes sea mayor que la suma de la pérdida de carga de los módulos. [28]

Por último, la Ilustración 4 muestra la concentración del agua de entrada y la dilución de la solución de extracción por el sistema de ósmosis directa en serie de tres etapas. A medida que la diferencia de concentración entre la solución de extracción y la *draw solution* disminuye la diferencia de presión osmótica, fuerza impulsora del proceso de ósmosis directa, se reduce, por lo que se espera que disminuya el rendimiento de la filtración. Hay que tener en cuenta que el agua de alimentación se concentró 3,4 veces más en un sistema de tres etapas, mientras que la solución de arrastre se diluyó 2,6 veces. Es cierto que esto se obtiene en condiciones óptimas, pero no deja de ser un dato alentador que tiene perspectivas brillantes. [28]

Como resumen de lo anterior, debemos ser consciente que al diseñar un proceso de ósmosis directa a escala real el flujo de filtración será menor que el proporcionado por el fabricante de membrana. En segundo lugar, se debe tener cuidado al ajustar la presión de diseño de la bomba de suministro, debido a la pérdida de carga que tendrá lugar. En tercer lugar, hay que tener en cuenta que se producirá una presión transmembrana que se genera irremediamente. [28]

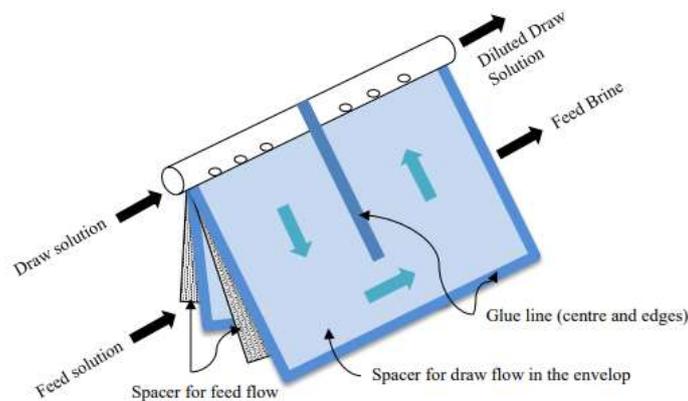


Figura 13. Ilustración de membrana en espiral en un módulo FO [31]

En esta búsqueda por ser los pioneros en el mercado de membranas FO también se ha sumado la compañía de Acuaporin la cual oferta diferentes módulos de ósmosis de fibra hueca, con los cuales promete una minimización de los residuos, una alta recuperación de la *draw solution* y una reutilización del agua. Actualmente oferta tres membranas diferentes: la HFF014 con 13,8 m<sup>2</sup> de área, HFF02, con 2, 3m<sup>2</sup> de área y HFF0.6 con 0,6m<sup>2</sup> de área, todas ellas de huecos de fibra de 0,2mm. Las especificaciones técnicas de cada una de ellas se pueden encontrar en el Anexo1. [44]



Figura 15. Ejemplo módulo HFF014 [44]



Figura 14 Ejemplo módulo HFF02 [44]



Figura 16. Ejemplo módulo HFF02 44]

Otras empresas interesadas en desarrollar su actividad entorno a las membranas de ósmosis directa es Asahi Kasei Corp, junto a Berghof, las cuales se han unido en un intento de desarrollar un sistema de membranas FO para la concentración de líquidos de alto nivel por deshidratación sin calentamiento ni presurización. El nuevo sistema también presenta una tasa de concentración tres veces mayor que la de la ósmosis inversa, pretenden el desarrollo de soluciones de filtración innovadoras para minimizar el consumo de energía, maximizar la reutilización del agua y recuperar recursos valiosos es el núcleo de las membranas En 2018 estos fabricantes prestaron equipos de pequeño y mediano tamaño a diferentes productores de alimentos y productos farmacéuticos, para su introducción a modo de prueba para una comercialización prevista para el 2020, pero lo cierto es que aún no existen conclusiones.[43,45]

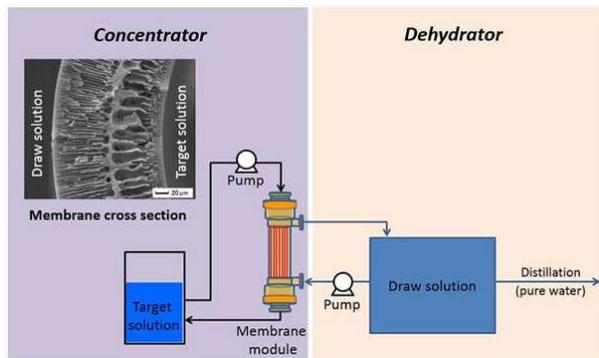


Figura 17. Diagrama del proceso de FO de Asai Kaise [43]



Figura 18. Mediano y pequeño equipo de FO de Asai Kasei [43]

Las membranas en espirales desarrolladas de la mano de Fluid Technology Solutions, FTS' OsmoF2O™; están hechas de celulosa. Son capaces de procesar sales precipitantes y orgánicos polimerizados, teniendo un impacto mínimo en el proceso. Debido a las bajas presiones requeridas en el proceso de ósmosis directa, son fáciles de limpiar, lo que se traducirá en un periodo de vida útil largo, presentan una alta recuperación del flujo. Pueden recuperar hasta el 90% de agua de reutilización de alta calidad minimizando costos [47]



Figura 19. Membrana desarrollada por Fluid Technology Solutions [47]

Por otro lado, la membrana FO de Toyobo tiene una estructura interna en la que las fibras huecas densamente empaquetadas permiten que el agua fluya de manera eficiente, generando corrientes de agua estables con una baja pérdida de presión para hacer girar la turbina. Además, la membrana es lo suficientemente robusta para soportar la alta presión de agua necesaria para una generación de energía osmótica eficiente, una propiedad que poseen las membranas de RO de Toyobo. Estas características llevaron a la planta de energía osmótica danesa a utilizar la membrana FO. [48]. La planta se basa en aplicar al lado de la solución extractora una cierta presión que no impida la transferencia de disolvente en sentido espontáneo (desde la alimentación hacia la solución extractora). El proceso se denomina PRO, Pressure Retarded Osmosis. El caudal presurizado por tanto se incrementa a la salida de los módulos de membrana y posteriormente se expande en una turbina hidráulica. La

potencia eléctrica neta producida es la diferencia entre la generada en la turbina y la empleada en presurizar el caudal de entrada en las membranas.

La planta de energía osmótica está ubicada en uno de los sistemas de calefacción de distrito de Dinamarca, que se han desarrollado y utilizado ampliamente durante muchos años. En los sistemas de calefacción de distrito, el calor producido en forma de agua caliente o vapor se concentra en un solo lugar y se distribuye a través de una red de tuberías a establecimientos comerciales y hogares. El agua salina geotérmica que se bombea de los pozos subterráneos se utiliza como fuente de calor. La planta utiliza aguas residuales geotérmicas, que han regresado a los pozos subterráneos, para obtener agua salina para la generación de energía osmótica.

La producción de la planta de 20 kilovatios es la mayor capacidad para este tipo de generador de energía osmótica en el mundo en noviembre de 2018, según la investigación de Toyobo. Esto es suficiente electricidad para abastecer a unos 50 hogares promedio. Es la primera vez que se pone en funcionamiento una central osmótica de tamaño equivalente a una central práctica, aunque se han realizado instalaciones de potencia osmótica experimentales. La planta planea realizar demostraciones hasta alrededor de septiembre de 2019, después de lo cual se construirá y operará una planta de energía osmótica de clase de un megavatio. [48]



Figura 20. Membrana de FO desarrollada por Toyobo [48]

#### 4.1.5 Tecnologías híbridas

Si bien es cierto que no queda claro la viabilidad de la ósmosis directa, son muchos los estudios que se están centrando en el uso de tecnología híbrida ósmosis directa-ósmosis inversa<sup>3</sup>. Esta tecnología es un proceso de dilución de agua de mar con agua dulce extraída de aguas residuales de baja salinidad para luego volver a tratarla mediante un proceso de ósmosis inversa. La presión aplicada es mucho más baja que la presión requerida mediante un proceso de ósmosis inversa convencional. La tecnología híbrida puede producir agua dulce con una energía relativamente menor que la desalinización mediante ósmosis inversa, y se puede esperar que aumente la estabilidad a través de la filtración múltiple con una membrana osmótica. [29]

---

<sup>3</sup> Se nombrará también como tecnología híbrida a partir de ahora.

# 5 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS

En este apartado se definirán los conceptos termodinámicos necesarios para la correcta comprensión del análisis que tendrá lugar posteriormente.

## Conceptos generales básicos

### 5.1.1 Equilibrio osmótico

Las condiciones de equilibrio de un sistema aislado, formado por dos subsistemas,  $\alpha$  y  $\beta$ , definidos por las variables extensivas energía termodinámica, volumen y cantidad de materia, se determinan según la naturaleza de su límite común,  $L \alpha \rightleftharpoons \beta$ , pudiendo ser éste rígido o móvil, adiabático o diatérmico, impermeable o semipermeable.

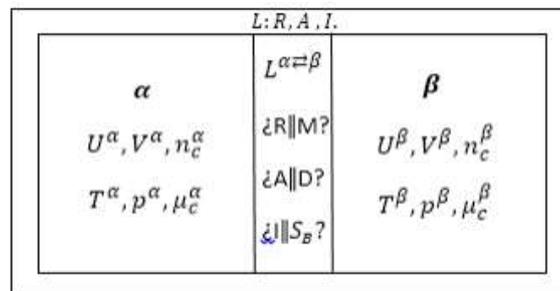


Figura 21. Límite entre dos subsistemas [33]

El equilibrio de un sistema aislado se describe termodinámicamente por su entropía, donde la variación de entropía del sistema es la suma de las entropías de los dos subsistemas,  $\alpha$  y  $\beta$ . Al tratarse de un sistema aislado, las variaciones de las variables de estado de cada subsistema son iguales y opuestas a las del otro. De esta forma, la variación de entropía del conjunto puede expresarse en función de las variaciones de las variables de estado de uno de los subsistemas. [33]

Las siguientes expresiones desarrollan matemáticamente lo antedicho:

$$\begin{aligned}
 dS &= dS^\alpha + dS^\beta = \frac{dU^\alpha}{T^\alpha} + \frac{p^\alpha}{T^\alpha} \cdot dV^\alpha - \sum_c \frac{\mu_B^\alpha}{T^\alpha} \cdot dn_B^\alpha + \frac{dU^\beta}{T^\beta} + \frac{p^\beta}{T^\beta} \cdot dV^\beta - \sum_c \frac{\mu_B^\beta}{T^\beta} \cdot dn_B^\beta \\
 dV &= dV^\alpha + dV^\beta = 0 \Rightarrow dV^\beta = -dV^\alpha \\
 dU &= dU^\alpha + dU^\beta = 0 \Rightarrow dU^\beta = -dU^\alpha \\
 dn_B &= dn_B^\alpha + dn_B^\beta = 0 \Rightarrow dn_B^\beta = -dn_B^\alpha \\
 dS &= dS^\alpha + dS^\beta = dU^\alpha \cdot \left( \frac{1}{T^\alpha} - \frac{1}{T^\beta} \right) + dV^\alpha \cdot \left( \frac{p^\alpha}{T^\alpha} - \frac{p^\beta}{T^\beta} \right) - \sum_c dn_B^\alpha \cdot \left( \frac{\mu_B^\alpha}{T^\alpha} - \frac{\mu_B^\beta}{T^\beta} \right)
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

### 5.1.2 Límite semipermeable rígido

Si el límite intermedio es semipermeable a uno de los componentes, diatérmico y rígido, el equilibrio que se establece se denomina osmótico. En el equilibrio osmótico existe igualdad de temperaturas y diferencia nula de potencial químico del componente al cual el límite es semipermeable. Por otra parte, no existe relación entre presiones ni entre las diferencias de potenciales químicos del resto de componentes. [33]

$$L^{\alpha \rightleftharpoons \beta} \equiv R, S_B \rightarrow D \quad \rightarrow \quad dU^\alpha \neq 0; dV^\alpha = 0; dn_B^\alpha \neq 0; dn_A^\alpha = 0$$

$$\text{Equilibrio} \rightarrow dS = 0$$

$$T^\alpha = T^\beta; \quad p^\alpha \neq p^\beta$$

$$\mu_B^\alpha(T^\alpha, p^\alpha, n_C^\alpha) - \mu_B^\beta(T^\beta, p^\beta, n_C^\beta) = 0$$

$$\mu_A^\alpha(T^\alpha, p^\alpha, n_C^\alpha) - \mu_A^\beta(T^\beta, p^\beta, n_C^\beta) \neq 0$$

El equilibrio osmótico se basa en el principio del aumento de entropía de sistemas aislados. Este principio establece que un sistema aislado que no está en equilibrio evoluciona aumentando su entropía hasta alcanza un máximo, al permanecer su energía termodinámica constante, consecuencia del nulo intercambio de calor y trabajo [33]

### 5.1.3 Presión osmótica

La presión osmótica ( $\pi$ ) es la diferencia de presiones existente entre dos subsistemas ( $\alpha, \beta$ ) que se encuentran en equilibrio osmótico separados por un límite semipermeable al disolvente.

$$\pi = p^\beta - p^\alpha$$

El subsistema  $\alpha$  se corresponde con el disolvente puro ( $A^*$ ), siendo su temperatura  $T$  y estando a la presión de equilibrio  $p^\alpha$ . Por su parte, el subsistema  $\beta$  se corresponde con la disolución, compuesta por el disolvente  $A$  y el soluto  $B$ . Al ser el límite entre ambos subsistemas diatérmico, la temperatura en el equilibrio es  $T$ . La presión de equilibrio de  $\beta$  con el disolvente puro a través de un límite semipermeable únicamente para este último es  $p^\beta$ . Cuando se da el equilibrio osmótico entre dos subsistemas se alcanza una diferencia nula de potencial químico entre el disolvente en la disolución y el disolvente en estado puro. [33]

$$\mu_A^\beta(T, p^\beta, b_B) - \mu_A^{\alpha*}(T, p^\alpha) = 0$$

Esta diferencia de potenciales químicos puede expresarse en función del coeficiente osmótico del disolvente en la disolución mediante el uso de un estado intermedio del disolvente puro a la presión de la disolución. [33]

$$\begin{aligned} & \left[ \mu_A^\beta(T, p^\beta, b_B) - \mu_A^{\alpha*}(T, p^\beta) \right] - \left[ \mu_A^{\alpha*}(T, p^\alpha) - \mu_A^{\alpha*}(T, p^\beta) \right] = 0 \\ & -\varphi(T, p^\beta, b_B) \cdot M_A \cdot b_B \cdot R \cdot T + \int_{p^\alpha}^{p^\beta} V_A^{\alpha*}(T, p) \cdot dp = 0 \end{aligned}$$

La expresión anterior puede formularse según la presión osmótica en forma de cocientes de valor unidad, cuyo numerador dependerá de la disolución y el denominador del disolvente puro. [33]

$$\pi(T, p^R, b_B) = p^R - p^\alpha \quad \rightarrow$$

$$\frac{\varphi(T, p^\beta, b_B) \cdot M_A \cdot R \cdot T \cdot b_B}{\int_{p^{\beta-\pi}}^{p^\beta} V_A^*(T, p) \cdot dp} = 1 \equiv \frac{\varphi(T, p^\alpha + \pi, b_B) \cdot M_A \cdot R \cdot T \cdot b_B}{\int_{p^\alpha}^{p^\alpha + \pi} V_A^*(T, p) \cdot dp} = 1$$

De las dos ecuaciones anteriores, la segunda es la más próxima a la operación. Se puede calcular la presión osmótica mediante la aplicación del teorema del valor medio al denominador de la primera de las dos ecuaciones anteriores. [33]

$$\pi(T, p^\beta, b_B) = \frac{\varphi(T, p^\beta, b_B) \cdot M_A \cdot R \cdot T \cdot b_B}{\langle V_A^*(T, p) \rangle}$$

En base a la expresión anterior, la presión osmótica depende principalmente de la molalidad del soluto, no de la naturaleza del mismo. En el caso de que la solución sea tan diluida que su comportamiento pueda ser considerado ideal y pueda admitirse la nulidad del coeficiente de compresibilidad isoterma del disolvente, la presión osmótica no dependerá de las presiones de disolvente o de solución. Se obtiene así la aproximación de Vant'Hoff. [33]

$$\pi(T, p^\beta, b_B) \approx \pi(T, p^\alpha, b_B) \approx \frac{M_A \cdot R \cdot T \cdot b_B}{V_A^*(T, p^\alpha)}$$

## Propiedades del agua del sistema

Las propiedades del agua del sistema de desalación en estudio han sido obtenidas de M.H Sharqawy [14]. Dichas propiedades dependerán de la temperatura, presión y composición. A continuación, se presentan las ecuaciones de estado correspondientes a las propiedades de agua saturadas y de agua de mar que usaremos para los cálculos.

### 5.1.4 Ecuaciones de agua saturada

#### 5.1.4.1 Densidad del agua pura

$$p_w = a_1 + a_2 \cdot T + a_3 \cdot T^2 + a_4 \cdot T^3 + a_5 \cdot T^4 \quad (5.2)$$

donde,

$$a_1 = 9,999 \cdot 10^2 \quad a_3 = -6,162 \cdot 10^{-3} \quad a_5 = -4,657 \cdot 10^{-8}$$

$$a_2 = 2,034 \cdot 10^{-2} \quad a_4 = 2,261 \cdot 10^{-5}$$

#### 5.1.4.2 Entalpía másica del agua saturada

$$h_w = 141,355 + 4202,07 \cdot T - 0,535 \cdot T^2 + 0,004 \cdot T^3 \quad (5.3)$$

Unidades de  $h_w$ : J/kg

Rango de validez:  $5 \leq T \leq 200$  °C

### 5.1.4.3 Entropía másica del agua saturada

$$S_w = 0,1543 + 15,383 \cdot T - 2,996 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 8,193 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 1,370 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 \quad (5.4)$$

Unidades de  $S_w$ : J/kg.K

Rango de validez:  $5 \leq T \leq 200$  °C

### 5.1.5 Ecuaciones de estado para el agua de mar

#### 5.1.5.1 Densidad de agua de mar

$$p_{sw(P,S,T)} = p_{sw(P_0,S,T)} \cdot F_p \quad (5.5)$$

donde,

$$p_{sw(P_0,S,T)} = (a_1 + a_2 \cdot T + a_3 \cdot T^2 + a_4 \cdot T^3 + a_5 \cdot T^4) + (b_1 \cdot S + b_2 \cdot S \cdot T + b_3 \cdot S \cdot T^2 + b_4 \cdot S \cdot T^3 + b_5 \cdot S^2 \cdot T^2) \quad (5.6)$$

$$a_1 = 9,999 \cdot 10^2$$

$$a_5 = -4,657 \cdot 10^{-8}$$

$$b_4 = -3,060 \cdot 10^{-5}$$

$$a_2 = 2,034 \cdot 10^{-2}$$

$$b_1 = 8,020 \cdot 10^2$$

$$b_5 = -1,613 \cdot 10^{-5}$$

$$a_3 = -6,162 \cdot 10^{-3}$$

$$b_2 = -2,00$$

$$a_4 = 2,261 \cdot 10^{-5}$$

$$b_3 = 1,677 \cdot 10^{-2}$$

y,

$$F_p = e^{((P-P_0) \cdot (c_1 + c_2 \cdot T + c_3 \cdot T^2 + c_4 \cdot T^3 + c_5 \cdot T^4 + c_6 \cdot T^5 + S \cdot (d_1 + d_2 \cdot T + d_3 \cdot T^2))) + \left(\frac{P^2 - P_0^2}{2}\right) \cdot (c_7 + c_8 \cdot T + c_9 \cdot T^3 + d_4 \cdot S)} \quad (5.7)$$

$$c_1 = 5,0792 \cdot 10^{-4}$$

$$c_4 = -3,7263 \cdot 10^{-10}$$

$$c_7 = -1,3389 \cdot 10^{-6}$$

$$c_2 = -3,4168 \cdot 10^{-6}$$

$$c_5 = 1,4465 \cdot 10^{-12}$$

$$c_8 = 4,8603 \cdot 10^{-9}$$

$$c_3 = 5,6931 \cdot 10^{-8}$$

$$c_6 = -1,7058 \cdot 10^{-15}$$

$$c_9 = -6,8039 \cdot 10^{-13}$$

$$d_1 = -1,1077 \cdot 10^{-6}$$

$$d_3 = -4,2539 \cdot 10^{-11}$$

$$d_2 = 5,5584 \cdot 10^{-9}$$

$$d_4 = 8,3702 \cdot 10^{-9}$$

Unidades de  $p_{sw(P,S,T)}$ : kg/m<sup>3</sup>

Rango de validez:  $0 < T < 180$ °C;  $0 < S < 0,16$  kg/kg|

**5.1.5.2 Entalpía de agua de mar**

$$h_{sw(P,S,T)} = h_{sw(P_0,S,T)} + (P - P_0) \cdot (a_1 + a_2 \cdot T + a_3 \cdot T^2 + a_4 \cdot T^3) + S \cdot (a_5 + a_6 \cdot T + a_7 \cdot T^2 + a_8 \cdot T^3) \quad (5.8)$$

donde,

$$h_{sw(P_0,S,T)} = h_{w(t)} - S \cdot (b_1 + b_2 \cdot S + b_3 \cdot S^2 + b_4 \cdot S^3 + b_5 \cdot T + b_6 \cdot T^2 + b_7 \cdot T^3 + b_8 \cdot T \cdot S + b_9 \cdot T \cdot S^2 + b_{10} \cdot S \cdot T^2) \quad (5.9)$$

a1= 996,7767	a7= -2,6185 · 10 <sup>-5</sup>	b5= 7,82607 · 10 <sup>3</sup>
a2= -3,2406	a8= 7,0661 · 10 <sup>-8</sup>	b6= -4,41733 · 10
a3= 0,0127	b1= -2,34825 · 10 <sup>4</sup>	b7= 2,1394 · 10 <sup>-1</sup>
a4= -4,7723 · 10 <sup>-5</sup>	b2= 3,158183 · 10 <sup>5</sup>	b8= -1,99108 · 10 <sup>4</sup>
a5= -1,1748	b3= 2,80269 · 10 <sup>6</sup>	b9= 2,77846 · 10 <sup>4</sup>
a6= 0,01169	b4= -1,44606 · 10 <sup>7</sup>	b10= 9,72801 · 10

Unidades de  $h_{sw(P,S,T)}$ : J/kg

Rango de validez:  $10 \leq T \leq 120$  °C;  $0 \leq S \leq 0,12$  kg/kg|

**5.1.5.3 Entropía de agua de mar**

$$S_{sw(P,S,T)} = S_{sw(P_0,S,T)} + (P - P_0) \cdot (a_1 + a_2 \cdot T + a_3 \cdot T^2 + a_4 \cdot T^3) \quad (5.10)$$

donde,

$$S_{sw(P_0,S,T)} = S_{w(t)} - S \cdot (b_1 + b_2 \cdot S + b_3 \cdot S^2 + b_4 \cdot S^3 + b_5 \cdot T + b_6 \cdot T^2 + b_7 \cdot T^3 + b_8 \cdot T \cdot S + b_9 \cdot T \cdot S^2 + b_{10} \cdot S \cdot T^2) \quad (5.11)$$

a1= -4,4786 · 10 <sup>-3</sup>	b2= 1,463 · 10 <sup>4</sup>	b7= 5,879 · 10 <sup>-4</sup>
a2= -1,1654 · 10 <sup>-2</sup>	b3= -9,880 · 10 <sup>4</sup>	b8= -6,111 · 10
a3= -6,1154 · 10 <sup>-5</sup>	b4= 3,095 · 10 <sup>5</sup>	b9= 8,041 · 10
a4= -4,7723 · 10 <sup>-5</sup>	b5= 2,562 · 10	b10= 3,035 · 10 <sup>-7</sup>
b1= -4,231 · 10 <sup>2</sup>	b6= -1,443 · 10 <sup>-1</sup>	

Unidades de  $S_{sw(P,S,T)}$ : J/kg\*K

Rango de validez:  $10 \leq T \leq 120$  °C;  $0 \leq S \leq 50,12$  g/kg|

#### 5.1.5.4 Capacidad térmica másica isóbara para agua de mar

$$c_{p_{sw}(P,S,T)} = c_{p_{sw}(P_0,S,T)} + (P - P_0) \cdot (a_1 + a_2 \cdot T + a_3 \cdot T^2 + a_4 \cdot T^3) + S \cdot (a_5 + a_6 \cdot T + a_7 \cdot T^2 + a_8 \cdot T^3) \quad (5.12)$$

donde,

$$c_{p_{sw}(P_0,S,T)} = A + B \cdot (T + 273,15) + C \cdot (T + 273,15)^2 + D \cdot (T + 273,15)^3 \quad (5.13)$$

$$a_1 = -3,1118$$

$$a_5 = -0,0107$$

$$a_2 = 0,0157$$

$$a_6 = -3,9716 \cdot 10^{-5}$$

$$a_3 = 5,1014 \cdot 10^{-5}$$

$$a_7 = 3,2088 \cdot 10^{-8}$$

$$a_4 = -1,0302 \cdot 10^{-6}$$

$$a_8 = 1,01119 \cdot 10^{-9}$$

$$A = 4206,8 - 9,76 \cdot 10^{-2} \cdot S + 4,04 \cdot 10^{-4} \cdot S^2$$

$$B = -1,1265 + 73528 \cdot 10^{-4} \cdot S + 3,1508 \cdot 10^{-6} \cdot S^2$$

$$C = 1,2032 \cdot 10^{-2} - 1,9,28 \cdot 10^{-6} \cdot S + 8,2341 \cdot 10^{-9} \cdot S^2$$

$$D = 6,8825 \cdot 10^{-7} + 1,6672 \cdot 10^{-9} \cdot S + 7,1300 \cdot 10^{-1} \cdot S^2$$

Unidades de  $c_{sw}(P,S,T)$ : J/kg·K

Rango de validez:  $10 \leq T \leq 180$  °C;  $0 \leq S \leq 12$  ·Yo|

#### 5.1.5.5 Coeficiente osmótico

$$\sigma_{(S,T)} = (a_1 + a_2 \cdot T + a_3 \cdot T^2 + a_4 \cdot T^3 + a_5 \cdot S + a_6 \cdot S \cdot T + a_7 \cdot S \cdot T^3 + a_8 \cdot S^2 + a_9 \cdot S^2 \cdot T + a_{10} \cdot S^2 \cdot T^2) \quad (5.14)$$

$$a_1 = 8,9453233003 \cdot 10^{-1}$$

$$a_5 = -1,1445456438 \cdot 10^{-4}$$

$$a_9 = 5,6960486681 \cdot 10^{-8}$$

$$a_2 = 4,1560737424 \cdot 10^{-4}$$

$$a_6 = -1,4783462366 \cdot 10^{-6}$$

$$a_{10} = -2,8624032584 \cdot 10^{-10}$$

$$a_3 = -4,6262121398 \cdot 10^{-6}$$

$$a_7 = -1,3526263499 \cdot 10^{-11}$$

$$a_4 = 2,2211195879 \cdot 10^{-11}$$

$$a_8 = 7,0132355546 \cdot 10^{-6}$$

Rango de validez:  $0 \leq T \leq 200$  °C;  $10 \leq S \leq 120$  |

#### Ecuaciones termodinámicas.

A continuación, se presentan las ecuaciones generales planteadas para el equipo de ósmosis directa, serán la ecuación del Primer Principio de la Termodinámica, la de la Exergía y la de la Exergía Destruída (Ecuación de Gouy-Stodola), ya que serán la base de nuestro estudio.

$$0 = P_w^{M \leftrightarrow RW} + P_w^{M \leftrightarrow E} + P_Q^{M \leftrightarrow RQ} + P_Q^{M \leftrightarrow E} + \sum_{\forall e} qm_e \cdot (H_e - H_{ref}) - \sum_{\forall s} qm_s \cdot (H_s - H_{ref}) \quad (5.15)$$

donde,

$P_w^{M \leftrightarrow RW}$  potencia mecánica que la máquina intercambia con un reservorio de trabajo distinto al ambiente.

$P_w^{M \leftrightarrow E}$  potencia mecánica que la máquina intercambia con un el ambiente.

$P_Q^{M \leftrightarrow RQ}$  potencia térmica que el equipo intercambia con un reservorio de calor distinto al ambiente.

$P_Q^{M \leftrightarrow E}$  potencia térmica que el equipo intercambia con un el ambiente.

$qm_e$  caudal másico de las corrientes de entrada en el equipo.

$H_e$  entalpía específica de las corrientes de entrada al equipo.

$H_{ref}$  entalpía específica de referencia.

$qm_s$  caudal másico de las corrientes de salida de la máquina.

$H_s$  entalpía específica de las corrientes de salida.

Exergía:

$$\frac{dE_{xmc}^M}{dt} = P_w^{M \leftrightarrow RW} + P_Q^{M \leftrightarrow RQ} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{RQ}}\right) + \sum_{\forall e \neq E} qm_e \cdot E_{xma}^e - \sum_{\forall e \neq E} qm_s \cdot E_{xma}^s - T_0 \cdot \frac{dS^U}{dt} \quad (5.16)$$

donde,

$T_0$  temperatura de referencia fijada, en este caso el ambiente.

$T_{RQ}$  temperatura del reservorio de calor.

$E_{xmc}^M$  exergía molar de un equipo en un estado.

$E_{xma}^e$  exergía molar de un flujo de materia en las entradas.

$E_{xma}^s$  exergía molar de un flujo de materia en las salidas.

Para calcular la potencia exegética destruida usaremos la ecuación de Gouy-Stodola y Segundo Principio de la Termodinámica, como ya hemos indicado antes, para un equipo genérico vienen recogidas por la ecuación.

$$P_{exD}^M = T_0 \cdot \left[ \sum_{\forall s} qm_s \cdot (S_s - S_{ref}) - \sum_{\forall e} qm_e \cdot (S_e - S_{ref}) \right] - P_Q^{M \leftrightarrow E} \quad (5.17)$$

donde,

$P_{exD}^M$  potencia exergética destruida del equipo estudiado.

$S_s$  entropía de las corrientes de salida del equipo.

$S_e$  entropía de las corrientes de entrada en el equipo.

$S_{ref}$  entropía específica de referencia.

## 6 EVALUACIÓN DEL PROCESO MEDIANTE ÓSMOSIS DIRECTA

El objeto del estudio se llevará a cabo a través del desarrollo de una herramienta de cálculo. Inicialmente la aplicaremos sobre una instalación de ósmosis directa formada por cuatro módulos, como se muestra en la Figura 22. En cada uno de los módulos encontraremos una membrana FO8040, el objetivo es diseñar y simular el comportamiento de una planta real. Se tendrán en cuenta parámetros como la pérdida de carga, la polarización, la permeabilidad, la salinidad etc. Uno de los parámetros iniciales elegidos por el usuario será el caudal de agua transferida con la finalidad de poder comparar parámetros de diseño y operación que conducen a una misma cantidad de disolvente transferido.

En el caso mostrado en la citada figura, partiremos de unas condiciones iniciales en las que ambas corrientes, tanto la *feed solution* como la *draw solution*, entran a la misma temperatura, además se considerará que el traspaso de las sales por las diferentes membranas es nulo. Se muestran en la Figura 22 puntos del eje horizontal que separan unidades conceptuales de módulos de FO tal que el agua transferida en cada una de ellas será la misma. Se estudiarán las condiciones en los citados 10 puntos a lo largo de la configuración para más tarde ver cómo varían los resultados obtenidos según cambiamos las condiciones iniciales.

Estudio preliminar:

Se parte de dos corrientes con diferente concentración, una menos concentrada, corriente de alimentación,  $S_f=0,033\text{kg/kg}$  y la *draw solution*, más concentrada,  $S_d=0,056\text{ kg/kg}$ . Tomaremos los siguientes datos:

Inputs		Unidades
qf	30	LPM
qf	0,0005	m <sup>3</sup> /s
qd	15	LPM
qd	0,00025	m <sup>3</sup> /s
qwt	0,000009	m <sup>3</sup> /s
Sf	0,033	
Sd	0,056	
Pfout	1,1	bar
Pdout	1,2	bar
P0	1,013	bar
P0	0,1013	Mpa
Tf	15	°C
Td	15	°C
Aplossf	0,3	bar
Aplossd	0,5	bar
R	8,31E-06	Mj/(mol*K)
Ms	0,062808	kg/mol
CPF	1,1	
Lw	0,246	L/(m <sup>2</sup> *h*bar)
Lw	6,83333E-08	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> *s*bar)
Largo	1	m
Área	15,3	m <sup>2</sup>

Tabla 1. Datos entrada estudio preliminar

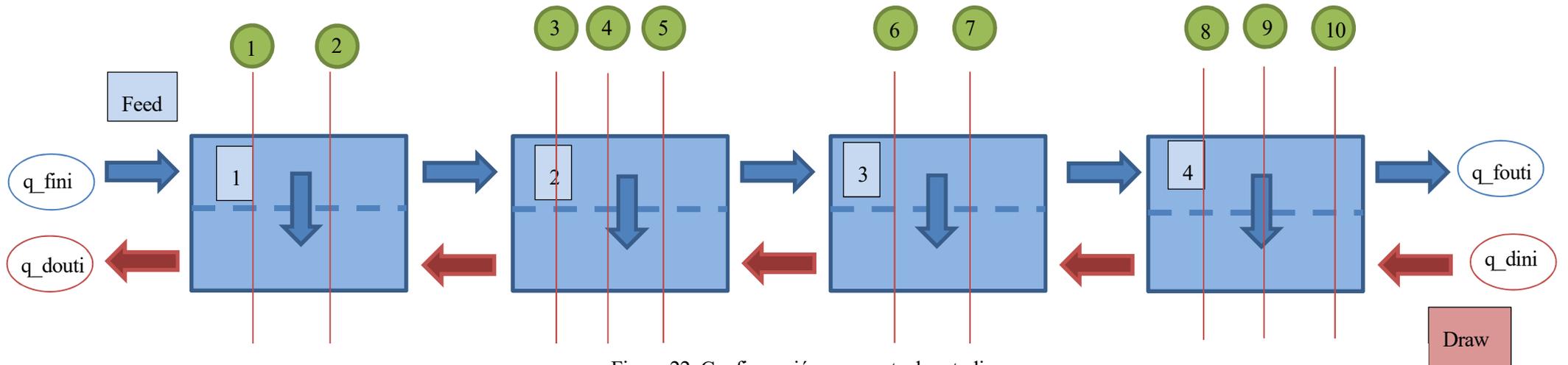


Figura 22. Configuración propuesta de estudio

En base a la configuración anterior se calcularán los valores de las principales corrientes, así como las propiedades de cada una, pueden consultarse los valores obtenidos en el anexo2.

De forma que, gráficamente, los resultados obtenidos son los siguientes:

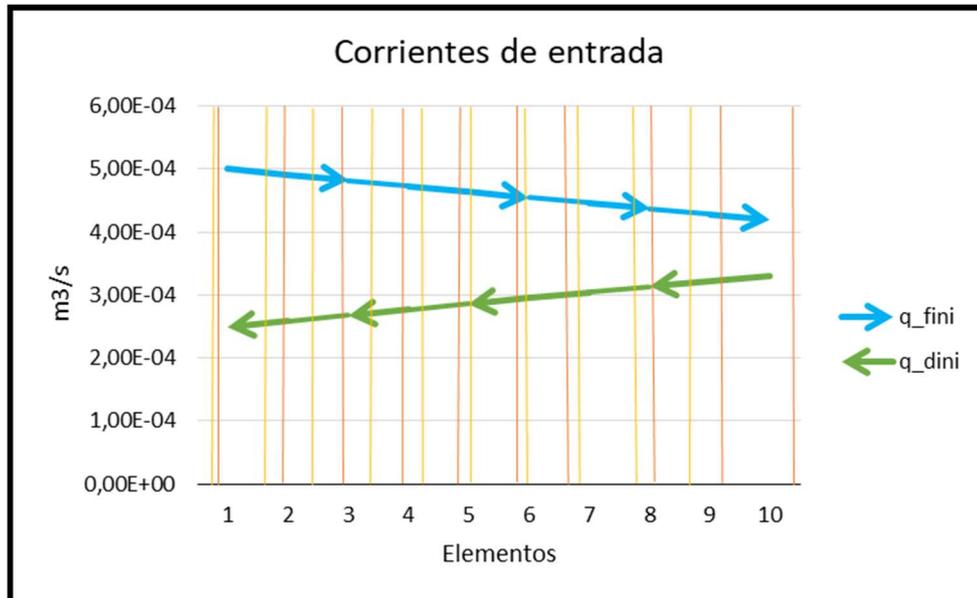


Ilustración 5. Corrientes de entrada del estudio preliminar

Los cortes verticales representan dónde se están tomando los valores a lo largo de la configuración. Numéricamente están en los siguientes puntos, en amarillo la entrada y en rojo la salida<sup>4</sup>.

Xi_ini (m)	Xi_out (m)
0,8358	0,9785
1,6750	1,9569
2,5184	2,9434
3,3668	3,9391
4,2212	4,9457
5,0829	5,9650
5,9530	6,9989
6,8331	8,0499
7,7251	9,1209
8,6309	10,2152

Tabla 2. Puntos de estudio de la configuración en condiciones preliminares.

Como podemos ver en Ilustración 5. Corrientes de entrada del estudio preliminar la Ilustración 5 a medida que la corriente de alimentación recorre la configuración va disminuyendo, mientras que el flujo de la corriente de extracción va aumentando. Hay que tener en cuenta que el flujo es a contracorriente, por lo que en un mismo punto una corriente disminuirá a favor de la otra y viceversa.

<sup>4</sup> De ahora en adelante no se representarán las x en las diferentes ilustraciones, pero estas no varían.

De forma análoga, ocurrirá con las corrientes de salida, tal y como muestra la Ilustración 6, esto es debido a la diferencia de las presiones osmóticas de ambas corrientes.

La tasa de flujo de entradas disminuye, mientras que el flujo de la *draw solution* aumenta, esto ocurre para minimizar el efecto de la pérdida de carga, mientras que la solución de extracción aumenta para aumentar el efecto de la pérdida de carga.

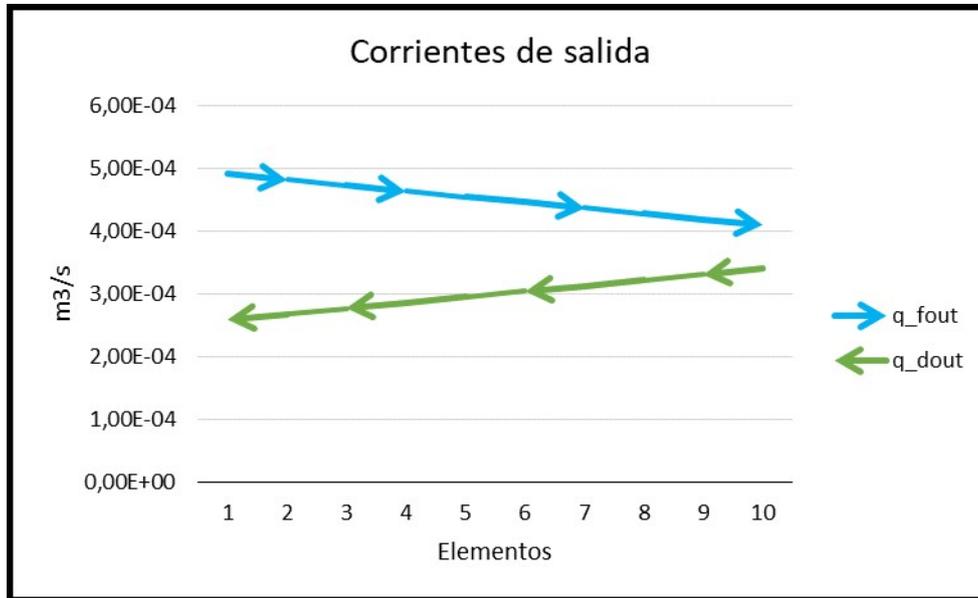


Ilustración 6. Corrientes de salida en el estudio preliminar

Otros parámetros interesantes a lo largo de la evolución de la configuración son las salinidades.

A medida que ambas corrientes se desplazan por los diferentes módulos, la *draw solution* se va diluyendo, mientras que la corriente de alimentación se irá concentrando, como muestran tanto la Ilustración 7 como la Ilustración 8.

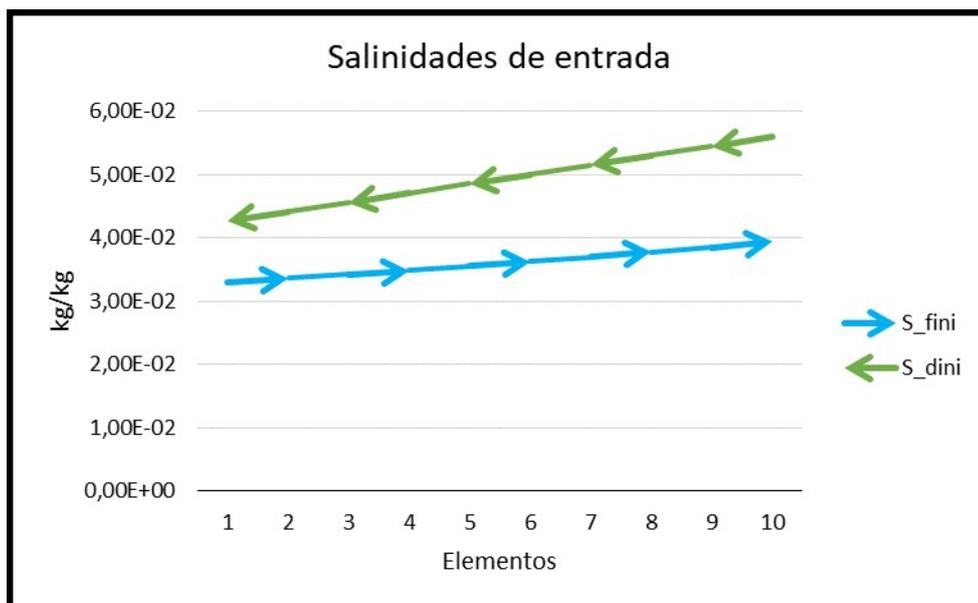


Ilustración 7. Salinidades de entrada en el estudio preliminar

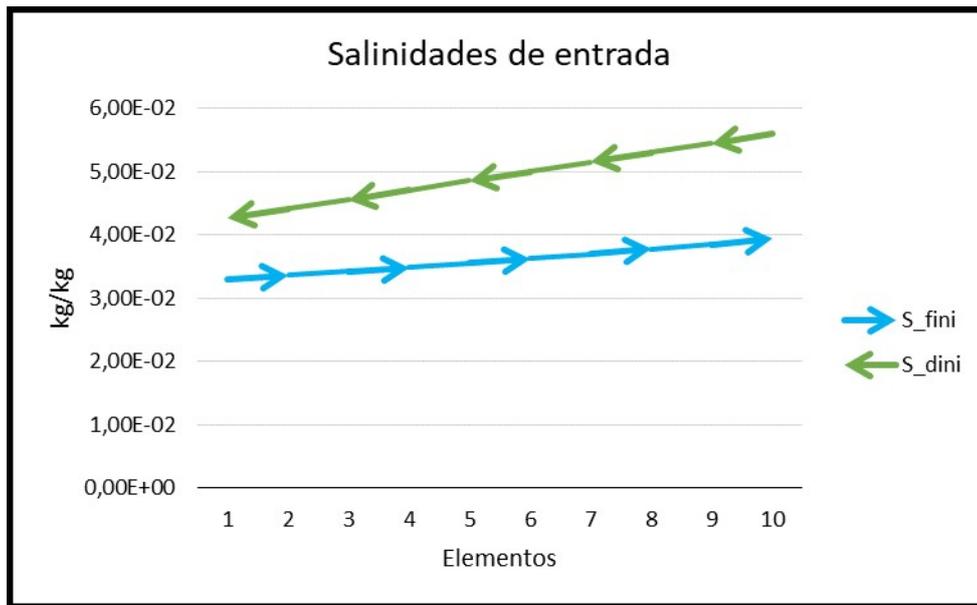


Ilustración 8. Salinidades de salida en el estudio preliminar

Por otro lado, las presiones obtenidas, teniendo en cuenta la pérdida de carga que se producirá en cada módulo, será las reflejadas en las Ilustración 9 e Ilustración 10 . Estas pérdidas de carga se simulan debido a que el producto final, como podría ser el agua desalada, no se obtiene directamente, como ya hemos comentado antes, si no que será necesario que tenga lugar una segunda etapa. Introduciendo esta pérdida de carga se tendrá en cuenta dicho paso. En ambas ilustraciones se muestra las presiones de entrada/salida en cada uno de los puntos seleccionados de la configuración, para el agua de alimentación tiende a disminuir a medida que avanza, mientras que para la solución de extracción aumenta según se van desarrollando las etapas. La diferencia de presiones de ambas corrientes pone de manifiesto el fenómeno de la presión de transmembra.

El sistema se ha diseñado de modo que la presión de ambas corrientes sea mayor que la suma de la pérdida de carga de todos los módulos.

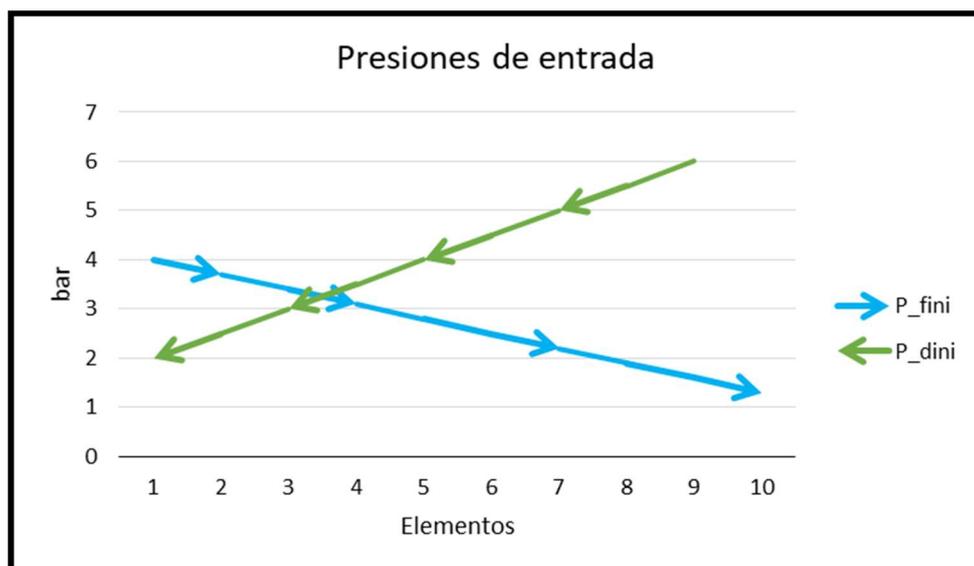


Ilustración 9. Presiones de entrada en el estudio preliminar

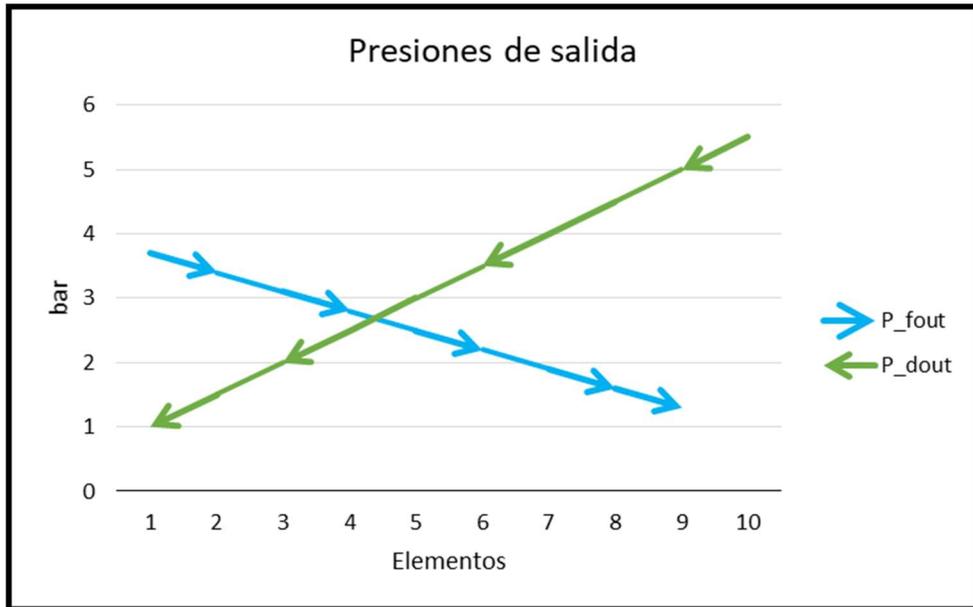


Ilustración 10. Presiones de salida en el estudio preliminar.

A continuación, la Ilustración 11 y la Ilustración 12 muestran las diferencias de la presión osmótica, fuerza impulsora del proceso de ósmosis directa. Como puede verse la diferencia de ambas presiones se reducen a medida que la concentración del agua de entrada y la dilución de la solución de extracción disminuye (ver Ilustración 7 e Ilustración 8), por lo que se espera que decaiga el rendimiento de la filtración.

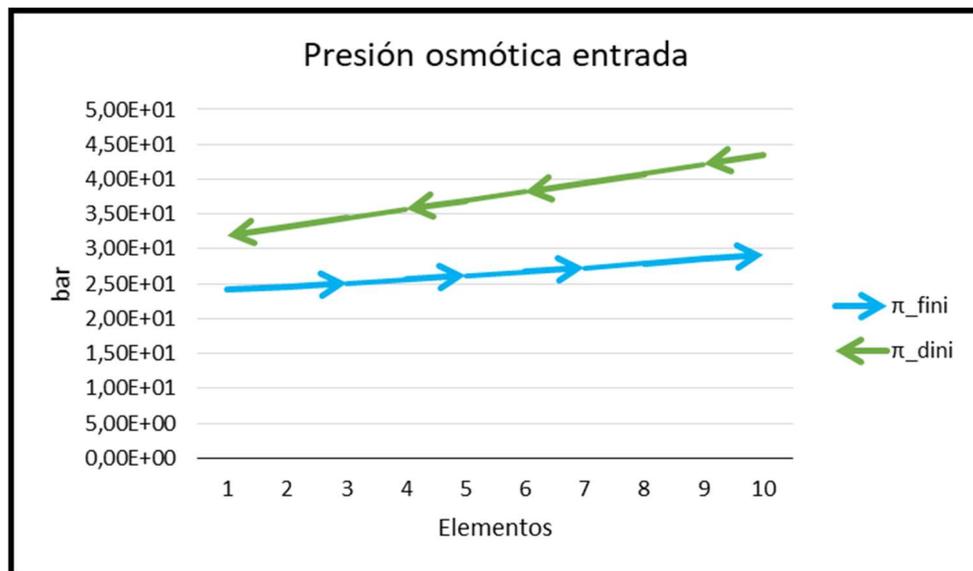


Ilustración 11. Presión osmótica de entrada en el estudio preliminar

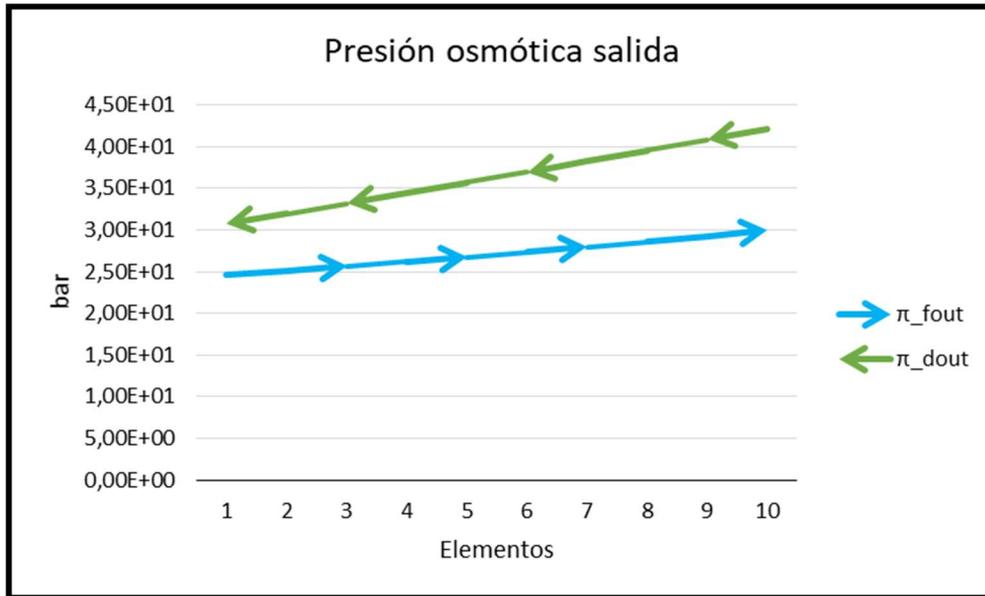


Ilustración 12. Presión osmótica de salida en el estudio preliminar

Por último, la Ilustración 13 nos muestra la evolución de la NDP, observamos que en todos los puntos es negativa, por lo que en todos los módulos tiene lugar el proceso de ósmosis directa. Es decir, valores de NDP positiva significa que el proceso que tiene lugar es de ósmosis inversa en lugar de FO. Cuanto mayor sea en valor absoluto la presión neta del trabajo, o NDP, mayor será la productividad de la membrana.

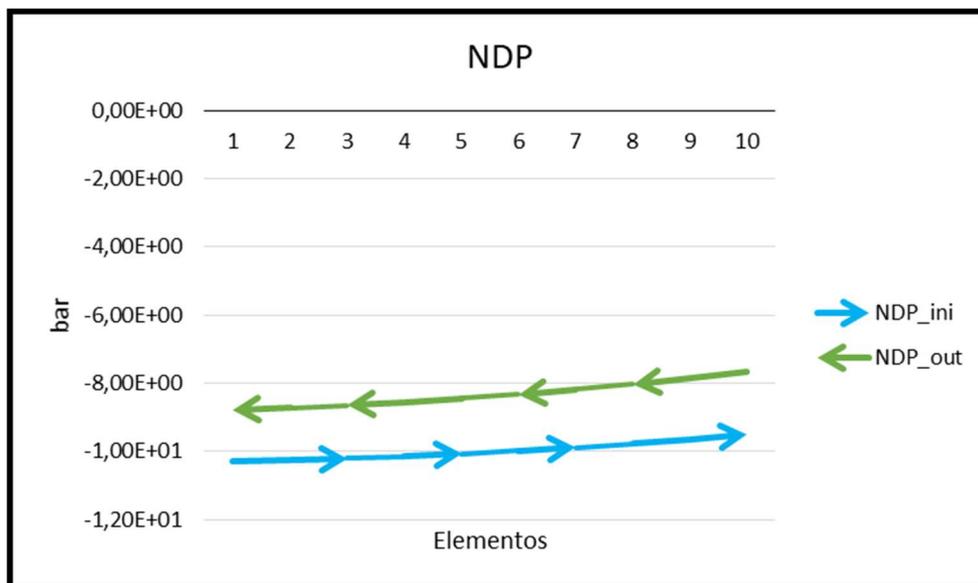


Ilustración 13. NDP de corrientes de entrada y salida.

En resumen, el flujo de entrada disminuye a medida que se va concentrando, esto es posible gracias al gradiente osmótico de ambas corrientes, que define a su vez la NDP, es decir, la velocidad del flujo de entrada disminuye según va aumentando la presión osmótica a lo largo de los diferentes módulos, de la misma forma que la corriente de extracción va aumentando a medida que se reduce la presión osmótica de esta. El paso de agua a través de la membrana semipermeable será posible gracias a la diferencia de presiones existentes entre el flujo de alimentación y de extracción junto con la diferencia de presiones osmóticas como refleja Ilustración 13.

Otro resultado a tener en cuenta es que la corriente de entrada se concentra en menor medida que lo que se diluye la corriente de extracción, esto podría deberse a que no está operando en condiciones óptimas.

### Estudio dependiente de la temperatura

A continuación veremos los resultados obtenidos al variar la temperatura de entrada de ambas corrientes. Los cálculos se llevarán a cabo para  $T_1 = 15^\circ C$ ,  $T_2 = 25^\circ C$  y  $T_3 = 45^\circ C$ . (Ver resultados numéricos obtenidos en el anexo 2).

Como podemos ver a continuación la temperatura no hace variar los flujos de las corrientes de entrada ni de salida, ya sea en la corriente de alimentación o en la de extracción, así como las salinidades.

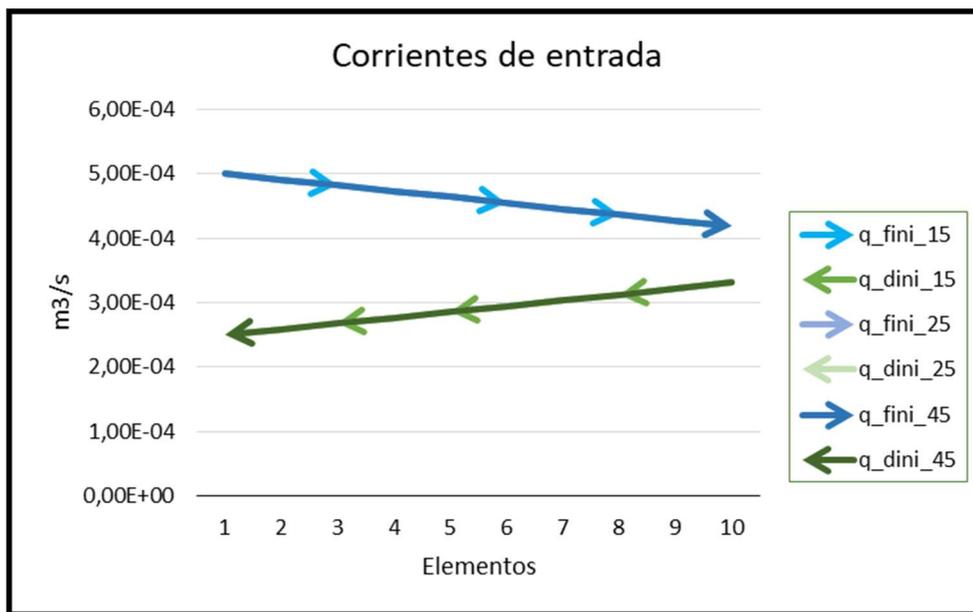


Ilustración 14. Corrientes de entrada en función de la temperatura

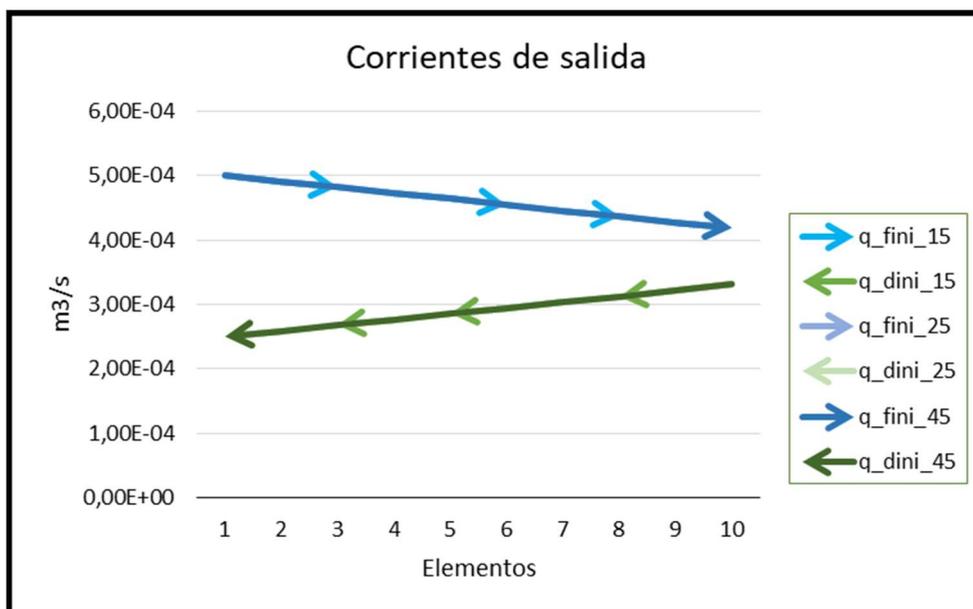


Ilustración 15. Corrientes de salida en función de la temperatura

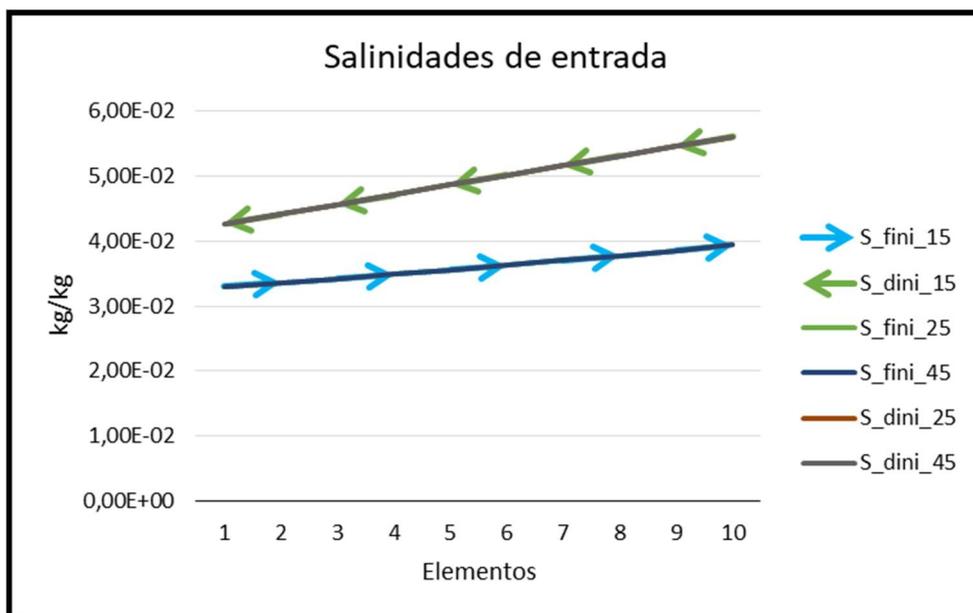


Ilustración 16. Salinidades de entrada en función de la temperatura

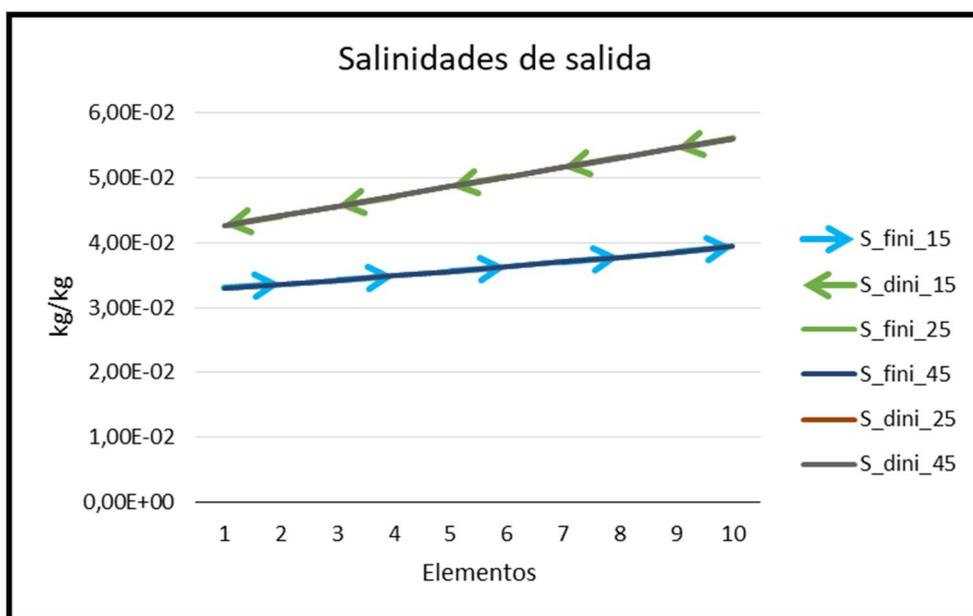


Ilustración 17. Salinidades de salida en función de la temperatura

A diferencia de lo anterior, las presiones osmóticas si sufrirán una ligera variación con la temperatura, y por tanto también variará la NDP.

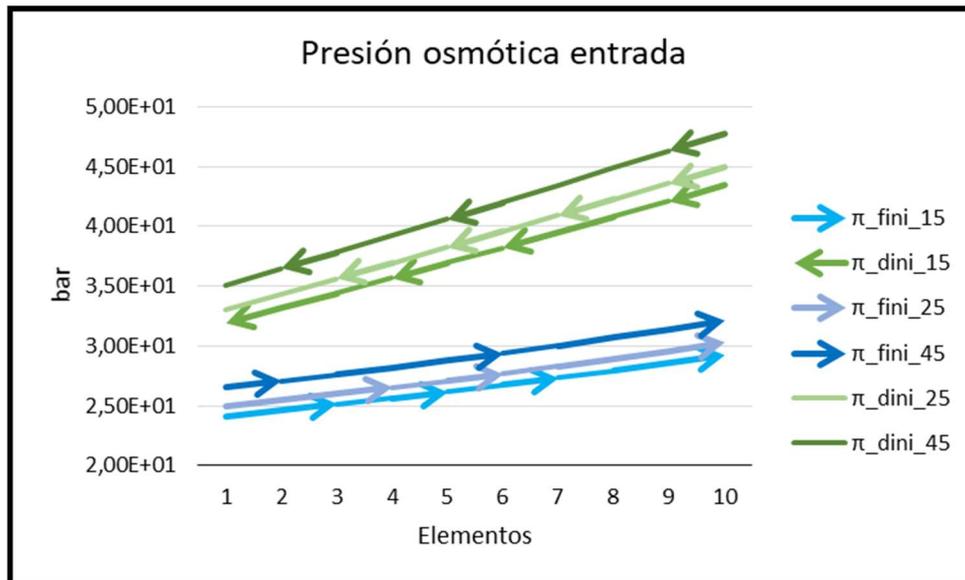


Ilustración 18. Presiones osmóticas de entrada en función de la temperatura

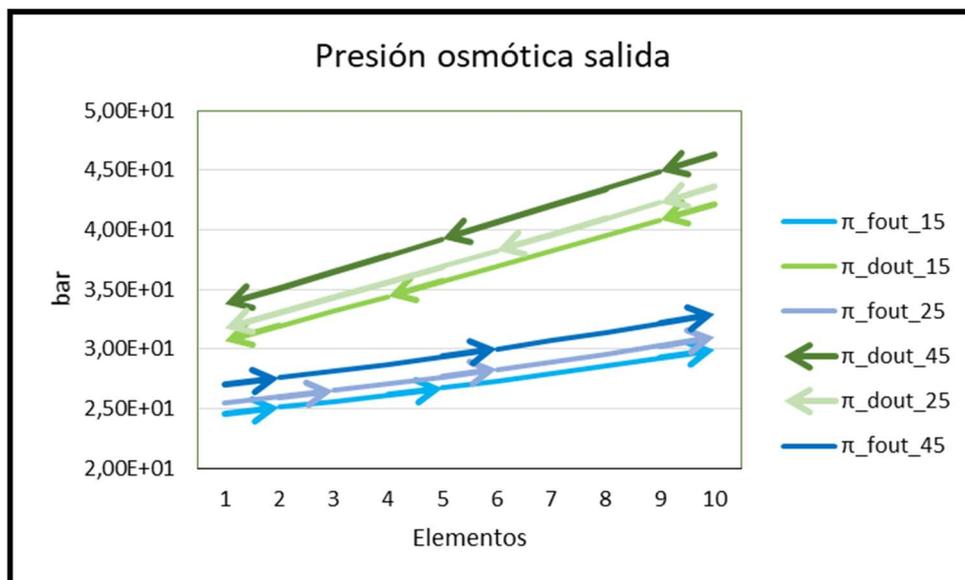


Ilustración 19. Presiones osmóticas de salida en función de la temperatura

Como podemos observar en los anteriores gráficos la presión aumenta en función de la temperatura, es decir, cuanto mayor sea la temperatura mayor será la presión. Pero observamos que lo hace de forma proporcional

	T=15 °C	T=25 °C	T=45 °C
$\Delta S_{in1}$	9,66E-03	9,66E-03	9,66E-03
$\Delta S_{in2}$	1,05E-02	1,05E-02	1,05E-02
$\Delta S_{in3}$	1,14E-02	1,14E-02	1,14E-02
$\Delta S_{in4}$	1,22E-02	1,22E-02	1,22E-02
$\Delta S_{in5}$	1,30E-02	1,30E-02	1,30E-02
$\Delta S_{in6}$	1,38E-02	1,38E-02	1,38E-02
$\Delta S_{in7}$	1,46E-02	1,46E-02	1,46E-02
$\Delta S_{in8}$	1,53E-02	1,53E-02	1,53E-02
$\Delta S_{in9}$	1,60E-02	1,60E-02	1,60E-02
$\Delta S_{in10}$	1,66E-02	1,66E-02	1,66E-02

Tabla 3 Incremento absoluto de la entrada en función de T

	T=15 °C	T=25 °C	T=45 °C
$\Delta S_{out1}$	7,57E-03	7,57E-03	7,57E-03
$\Delta S_{out2}$	8,43E-03	8,43E-03	8,43E-03
$\Delta S_{out3}$	9,26E-03	9,26E-03	9,26E-03
$\Delta S_{out4}$	1,01E-02	1,01E-02	1,01E-02
$\Delta S_{out5}$	1,08E-02	1,08E-02	1,08E-02
$\Delta S_{out6}$	1,16E-02	1,16E-02	1,16E-02
$\Delta S_{out7}$	1,23E-02	1,23E-02	1,23E-02
$\Delta S_{out8}$	1,30E-02	1,30E-02	1,30E-02
$\Delta S_{out9}$	1,37E-02	1,37E-02	1,37E-02
$\Delta S_{out10}$	1,43E-02	1,43E-02	1,43E-02

Tabla 4. Incremento de las salinidad de salida en función de T

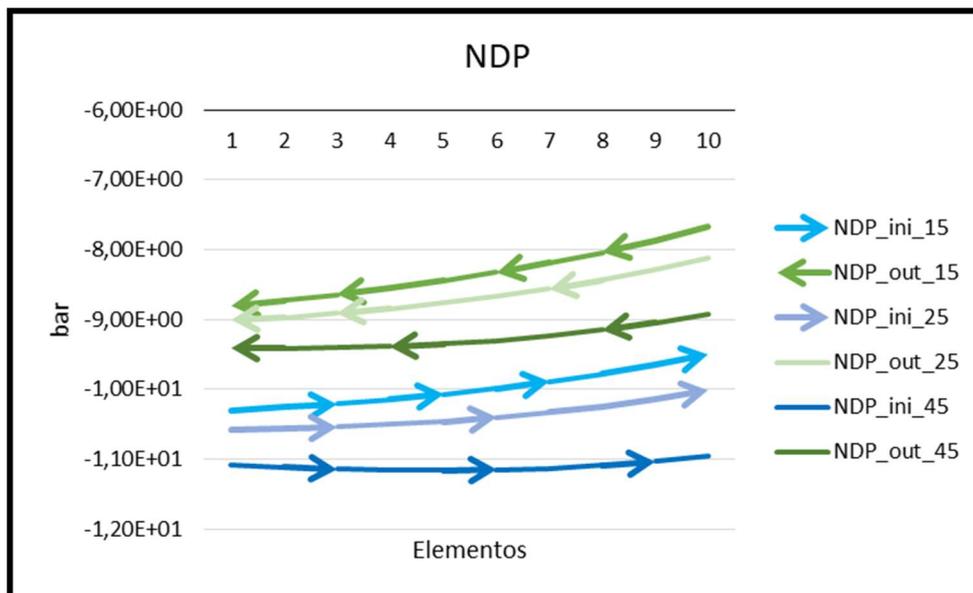


Ilustración 20. NDP de entrada y salida en función de la temperatura

De forma análoga ocurre con la NDP, se desplaza hacia arriba, es decir, la presión neta de trabajo requerida es menor según aumentamos la temperatura. Como cuanto mayor es la NDP mayor es la productividad de la membrana, por tanto las condiciones más óptimas serían las obtenidas con  $T=15\text{ °C}$

	T=15 °C	T=25 °C	T=45 °C
$\Delta NDP1$	1,50E+00	1,56E+00	1,67E+00
$\Delta NDP2$	1,53E+00	1,59E+00	1,71E+00
$\Delta NDP3$	1,56E+00	1,63E+00	1,74E+00
$\Delta NDP4$	1,59E+00	1,66E+00	1,78E+00
$\Delta NDP5$	1,63E+00	1,69E+00	1,81E+00
$\Delta NDP6$	1,66E+00	1,73E+00	1,85E+00
$\Delta NDP7$	1,70E+00	1,77E+00	1,90E+00
$\Delta NDP8$	1,74E+00	1,81E+00	1,94E+00
$\Delta NDP9$	1,78E+00	1,86E+00	1,99E+00
$\Delta NDP10$	1,83E+00	1,90E+00	2,04E+00

Tabla 5. Diferencias de NDP a la entrada y la salida en función de la temperatura

### Estudio en función de la permeabilidad

En este apartado se representan los resultados obtenidos al variar la permeabilidad, le asignaremos tres valores diferentes,  $L_w = 0,245$ ;  $L_w = 0,75$  y  $L_w = 1,5$  L/ (m<sup>2</sup>\*h\*bar), mantendremos la temperatura a 15 °C Los resultados obtenidos pueden consultarse en el anexo 2.

Hay que tener en cuenta que la variación de la permeabilidad sólo influirá en el agua transferida por la membrana de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$q_w = A * L_w * (-NDP)$$

Al haber impuesto que el agua transferida será constante a lo largo de los módulos, así como que la longitud de la membrana es de 1 m, la variación de este parámetro sólo nos influirá en el ancho de la membrana y por tanto en los módulos a utilizar necesarios para transferir 0,000009 m<sup>3</sup>/s

$L_w = 0,245$ L/(m <sup>2</sup> *h*bar)	$X_i$ ini (m)	$X_i$ out (m)	$L_w = 0,75$ L/(m <sup>2</sup> *h*bar)	$X_i$ ini (m)	$X_i$ out (m)	$L_w = 1,5$ L/(m <sup>2</sup> *h*bar)	$X_i$ ini (m)	$X_i$ out (m)
1	1	1		0	0		0	0
2	2	2		1	1		0	0
3	3	3		1	1		0	0
4	3	4		1	1		1	1
5	4	5		1	2		1	1
6	5	6		2	2		1	1
7	6	7		2	2		1	1
8	7	8		2	3		1	1
9	8	9		3	3		1	1
10	9	10		3	3		1	2

Tabla 6. Módulos necesarios en función de  $L_w$

Como podemos observar a mayor permeabilidad menor será el área de la membrana necesaria para mantener el flujo de agua transportada. Siendo necesario 10 módulos en el primero de los casos, tres en el segundo y dos en el tercero.

## Estudio en función de la salinidad de las corrientes

A continuación se verá el comportamiento del sistema variando la salinidad de la *draw solution*, ya que parte del éxito de esta tecnología recaerá en saber elegir una solución de extracción adecuada para cada caso. La corriente de alimentación la mantendremos constante para  $S_d=0,033$ , ya que es aproximadamente el agua típica de mar. Se estudian los siguientes casos.

- $S_f=0,033$  kg/kg //  $S_d=0,039$  kg/kg

- $S_f=0,033$  kg/kg //  $S_d=0,065$  kg/kg

- $S_f=0,033$  kg/kg //  $S_d=0,085$  kg/kg

De nuevo, pueden encontrarse los valores numéricos de este estudio en el anexo 2.

La variación de la salinidad supone, a parte de en la propia salinidad, en la presión osmótica y en la NDP. Partiendo del caso preliminar obtenemos los siguientes resultados:

### 6.1.1 $S_f=0,033$ kg/kg // $S_d=0,039$ kg/kg

Para estas condiciones, las concentraciones a lo largo del proceso serán las siguientes; dejamos las propiedades del estudio preliminar para poder comparar los resultados (en verde):

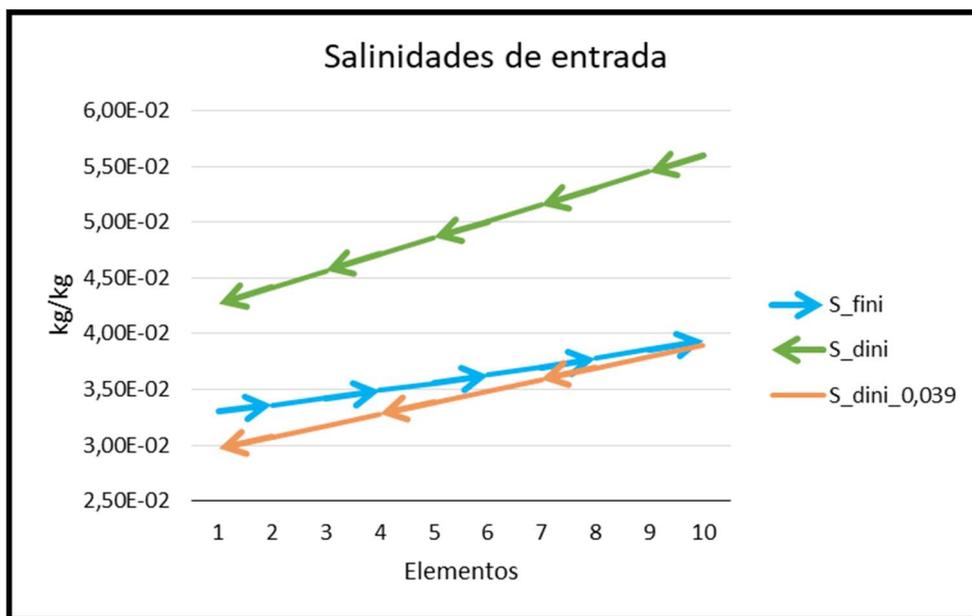


Ilustración 21. Salinidades en la entrada para salinidades  $S_f= 0,033$  //  $S_d= 0,039$

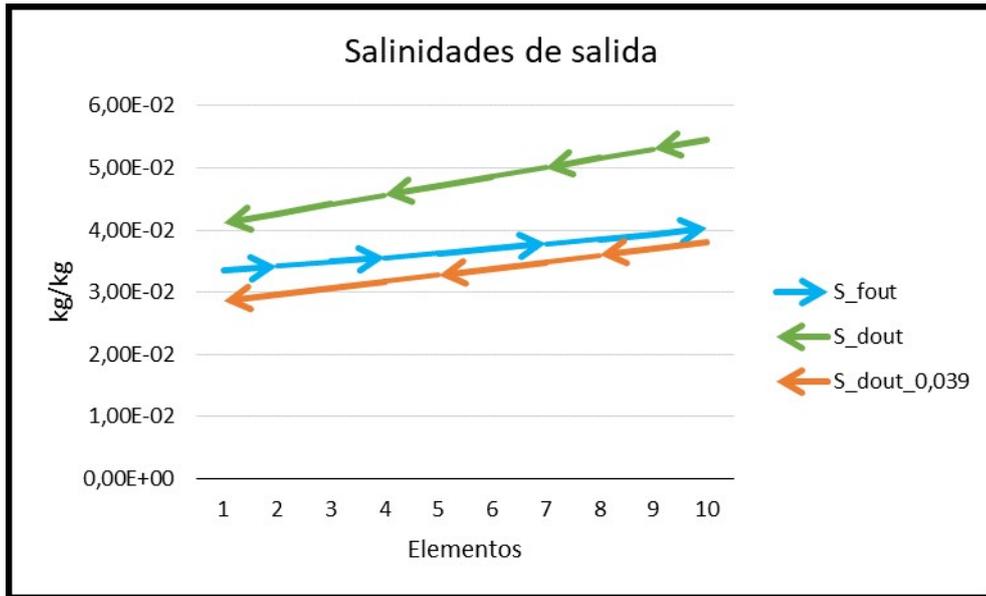


Ilustración 22 Salinidades en la salida para salinidades Sf= 0,033 // Sd= 0,039

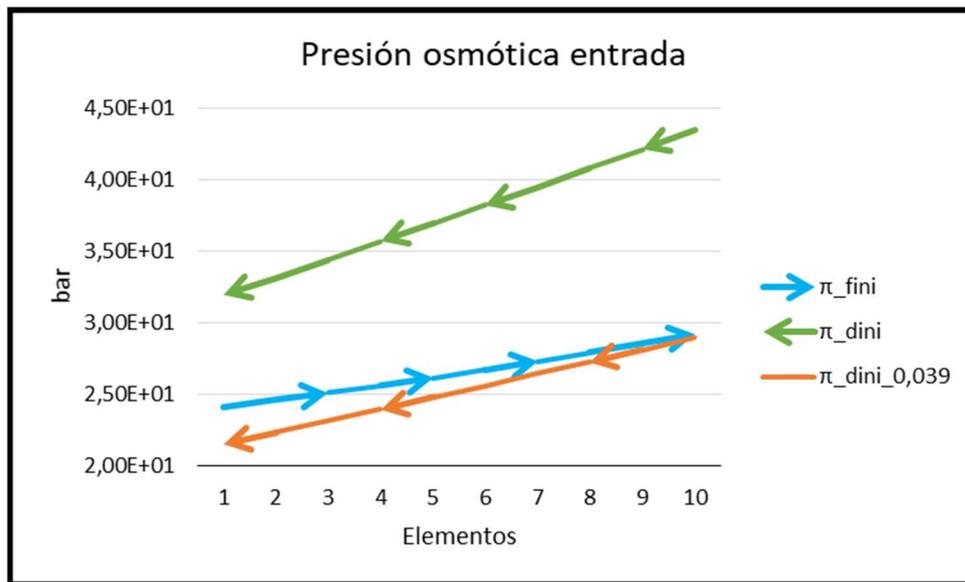


Ilustración 23. Presión osmótica de entrada para salinidades Sf= 0,033 // Sd= 0,039

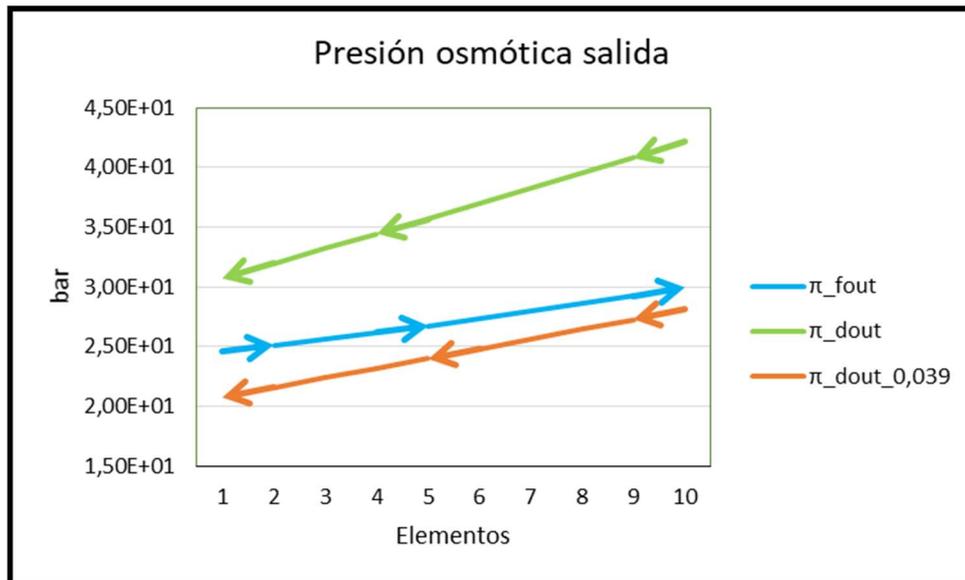


Ilustración 24. Presión osmótica de salida para salinidades Sf= 0,033 // Sd= 0,039

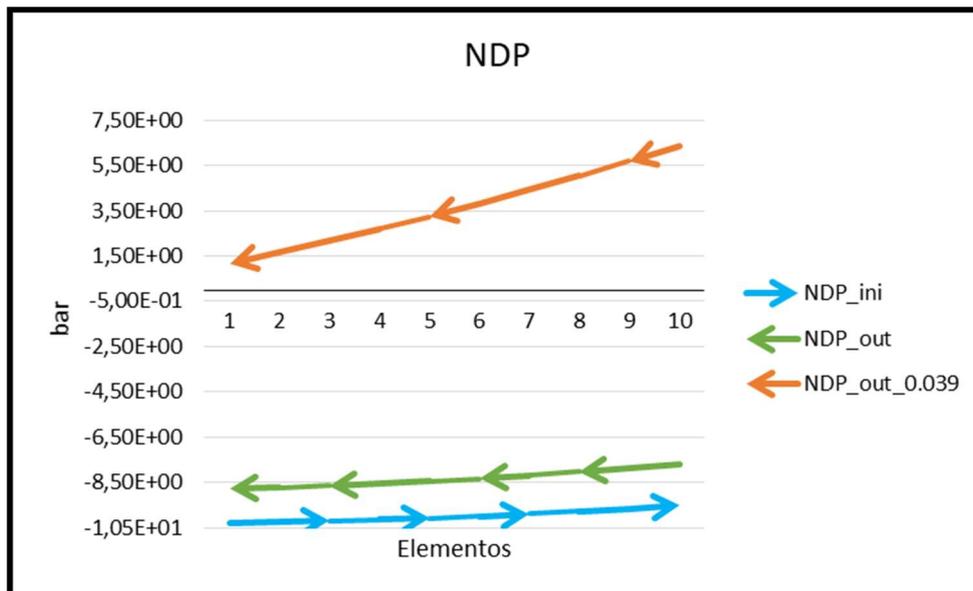


Ilustración 25. NDP de entrada y salida para salinidades Sf= 0,033 // Sd= 0,039

Como se demuestra en las Ilustraciones anteriores en caso de que la dos corrientes tengan una salinidad aproximada al agua típica de mar se traduce en que no tiene lugar el fenómeno de ósmosis directa, ya que la presiones osmóticas de la *draw solution* es menor que en el lado de alimentación, por lo cual, la fuerza impulsora de este proceso que es la presión osmótica no podrá aportar la suficiente energía para que tenga lugar.

### 6.1.2 $S_f=0,033 \text{ kg/kg}$ // $S_d=0,065 \text{ kg/kg}$

En caso de que las corrientes entren con  $S_f=0,033 \text{ kg/kg}$  y  $S_d= 0,065 \text{ kg/kg}$ , los resultados obtenidos son:

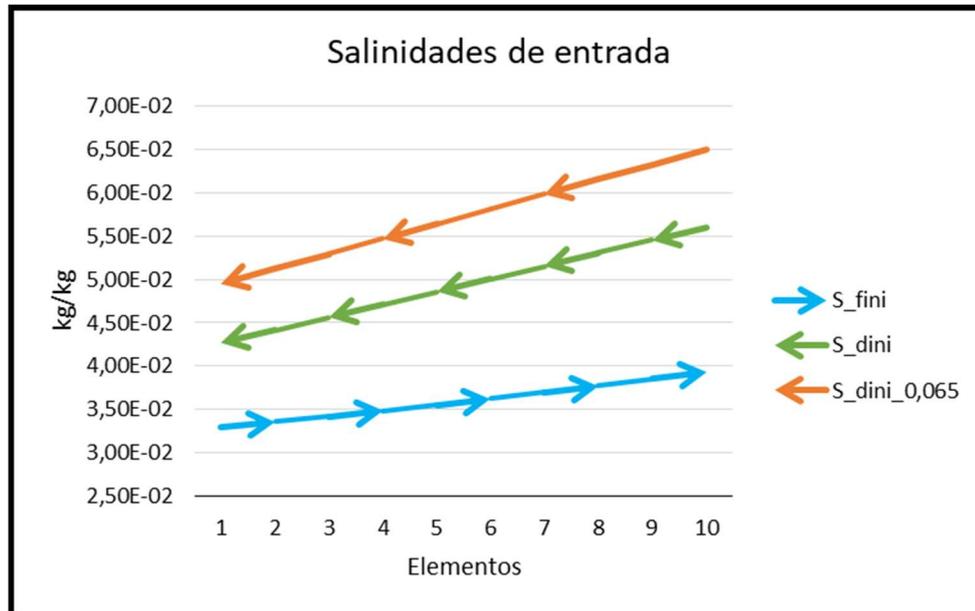


Ilustración 26. Salinidades en la entrada para salinidades  $S_f= 0,033$  //  $S_d= 0,065$

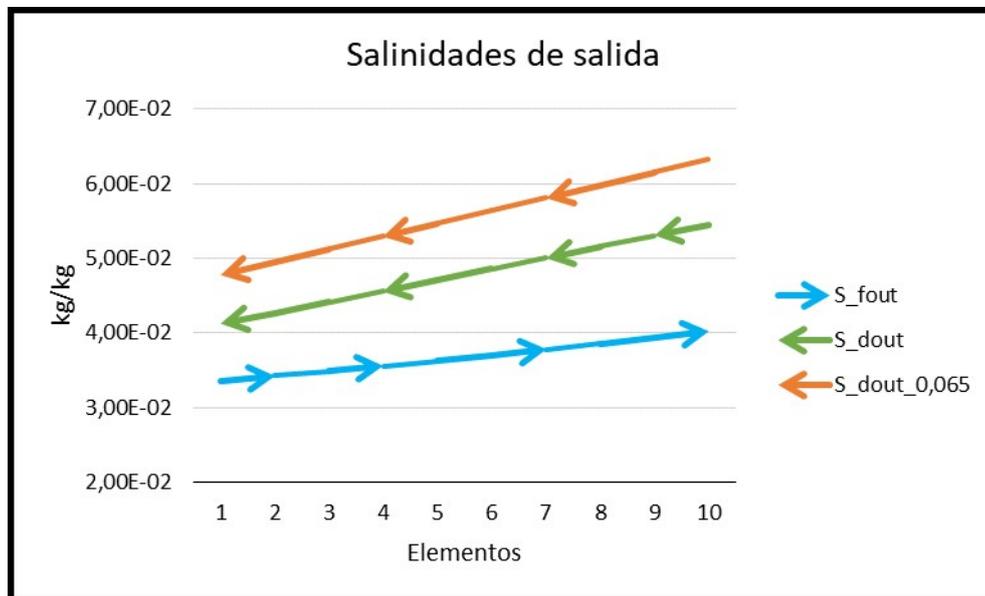


Ilustración 27. Salinidades en la salida para salinidades  $S_f= 0,033$  //  $S_d= 0,065$

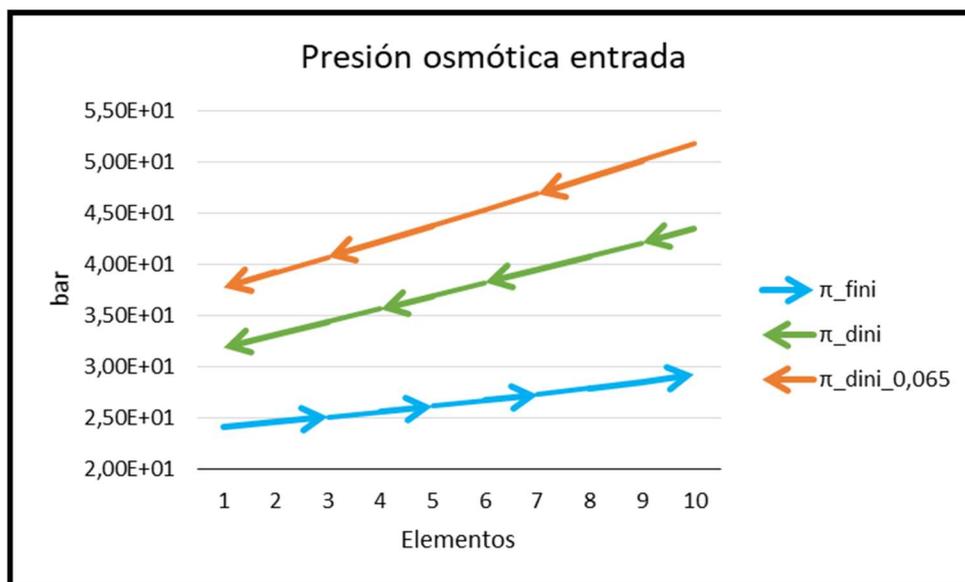


Ilustración 28. Presión osmótica en la entrada para salinidades  $S_f= 0,033$  //  $S_d= 0,065$

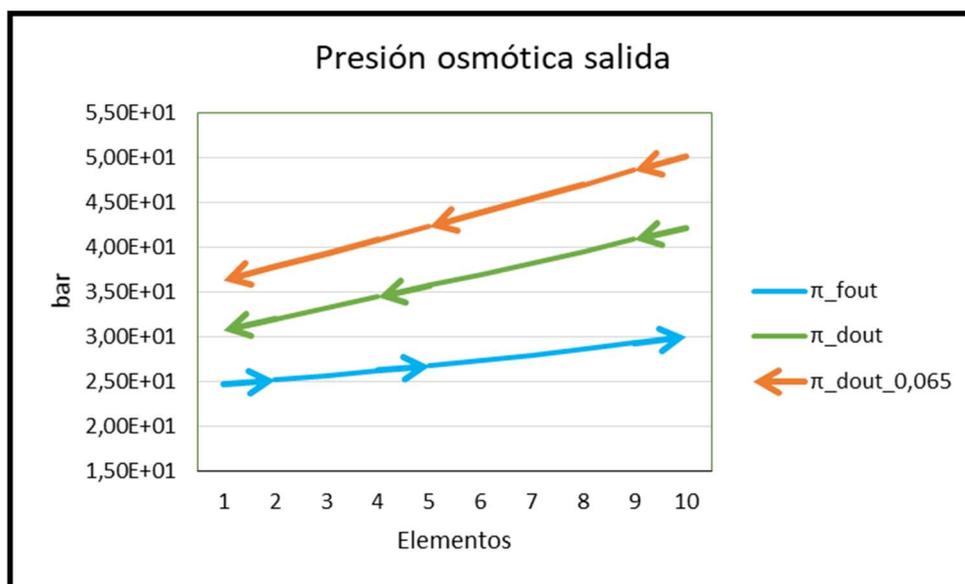


Ilustración 29. . Presión osmótica en la salida para salinidades  $S_f= 0,033$  //  $S_d= 0,065$

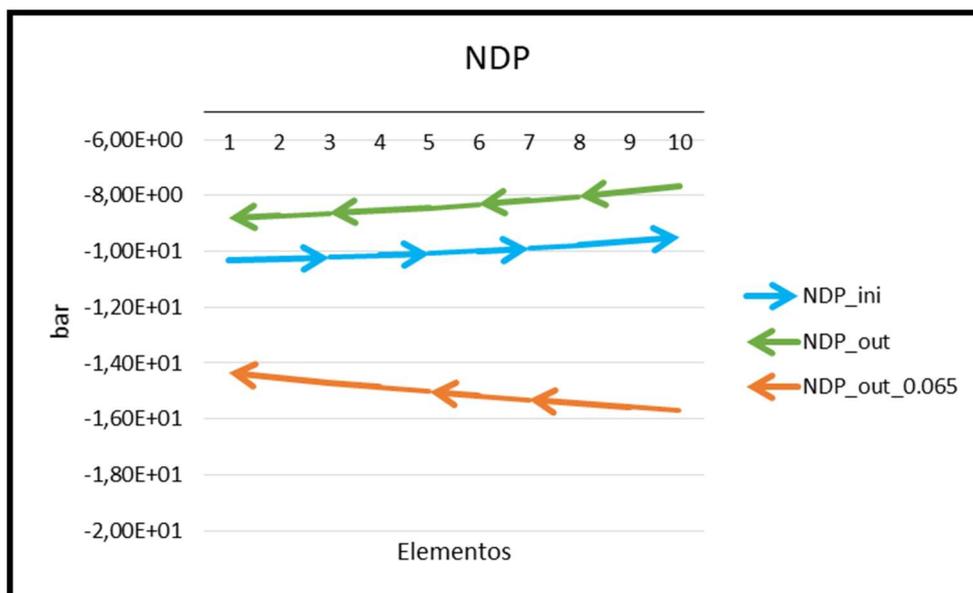


Ilustración 30. NDP para salinidades  $S_f= 0,033$  //  $S_d= 0,065$

En este caso, a diferencia del caso anterior tiene lugar el proceso de ósmosis directa en todos los módulos. La diferencia de la presión osmótica entre la corriente de alimentación y de extracción es mayor debido a una mayor diferencia de las salinidades, lo que se traduce en que el proceso tenga la fuerza suficiente para que tenga lugar espontáneamente.

### 6.1.3 $S_f=0,033 \text{ kg/kg}$ // $S_d=0,085 \text{ kg/kg}$

Por último la comparativa se hará con dos corrientes, una poco concentrada y otra muy concentrada.

Obteniendo los siguientes resultados:

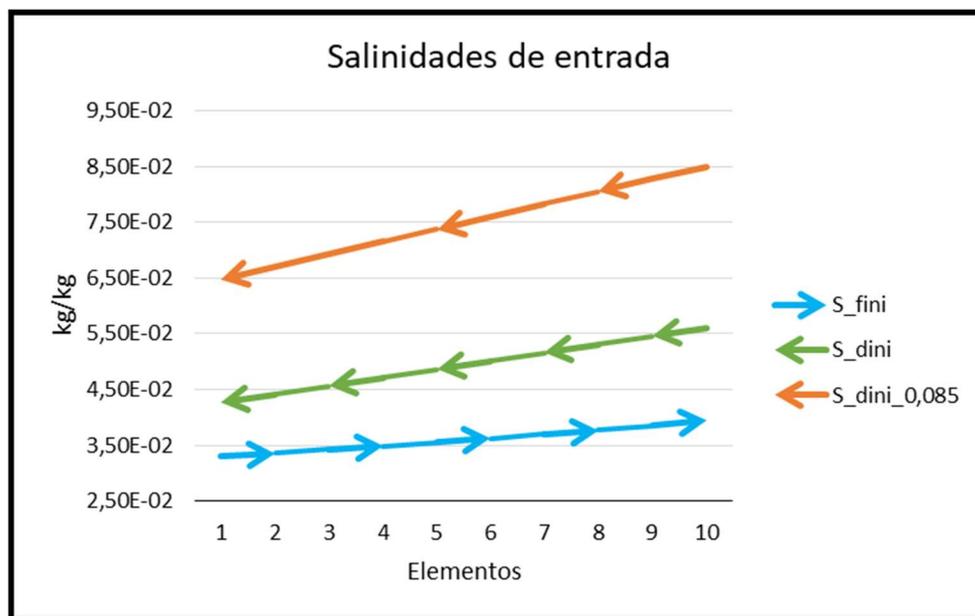


Ilustración 31. Salinidades en la entrada para salinidades  $S_f= 0,033$  //  $S_d= 0,085$

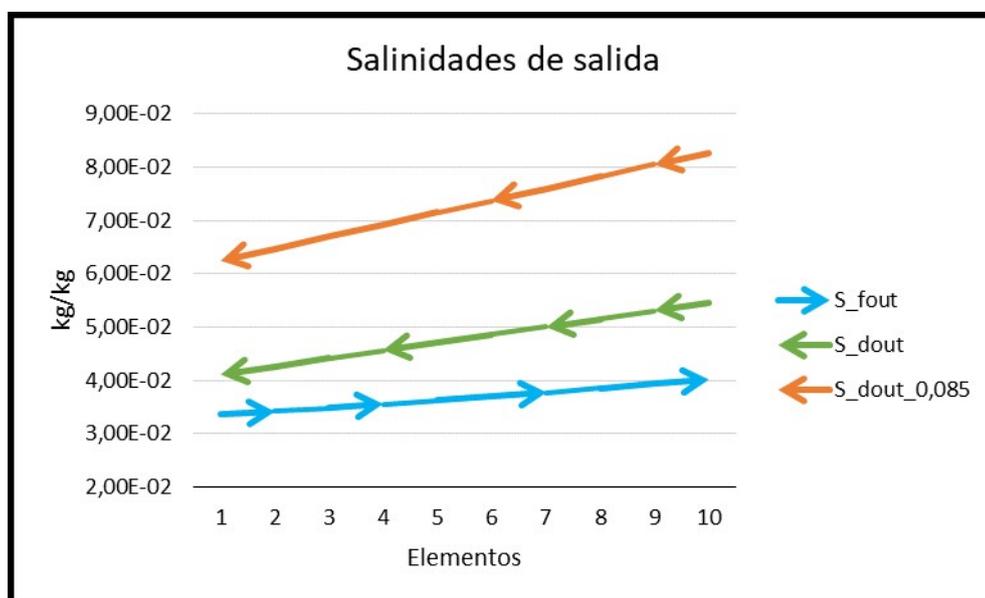
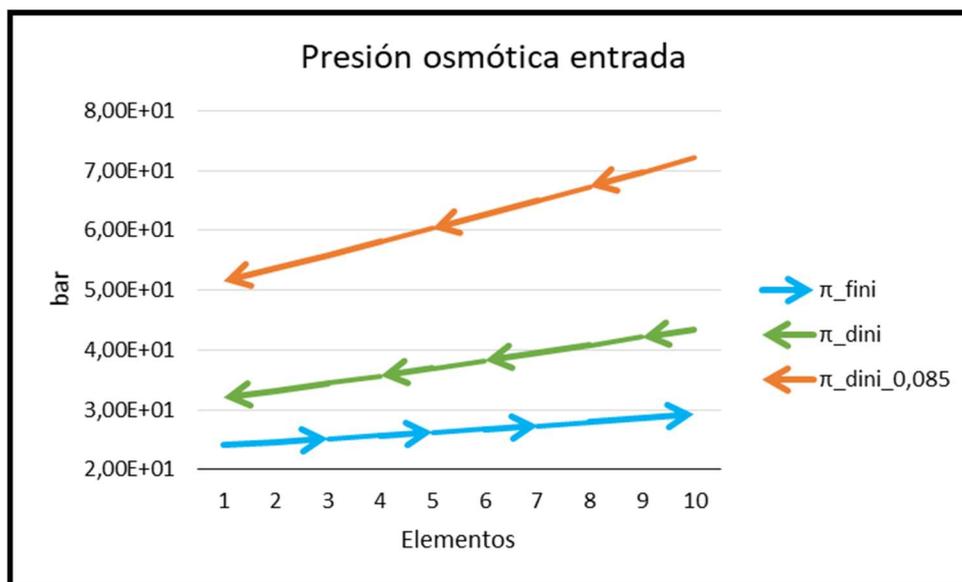
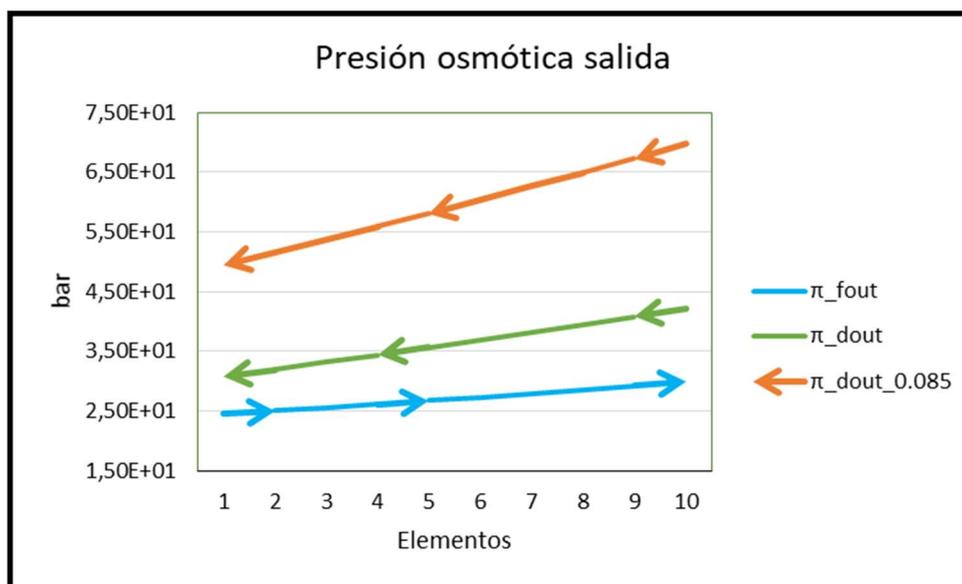


Ilustración 32. Salinidades en la salida para salinidades  $S_f= 0,033$  //  $S_d= 0,085$

Ilustración 33. Presión osmótica en la entrada para salinidades  $S_f = 0,033$  //  $S_d = 0,085$ Ilustración 34 Presión osmótica en la salida para salinidades  $S_f = 0,033$  //  $S_d = 0,085$

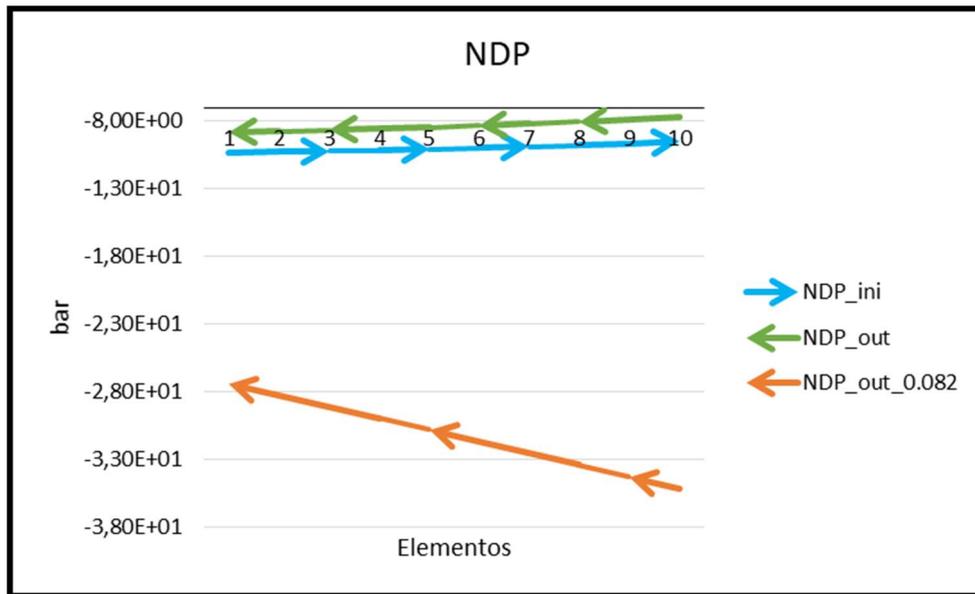


Ilustración 35. NDP para salinidades  $S_f=0,033$  //  $S_d=0,085$

Al introducir una corriente mucho más concentrada, la diferencia de salinidades supondrá una gran diferencia de la presión osmótica en ambas corrientes y por tanto la NDP será negativa, por lo que no será necesaria ningún aporte de energía adicional, si no que la corriente de alimentación se concentrará de forma espontánea debido a la ósmosis directa.

### Variación con la corriente de entrada

A continuación, simularemos las variaciones que tiene nuestra configuración variando la corriente de entrada del caudal de alimentación y dejaremos fija la corriente de la *draw solution*. Se han cogido tres valores en torno a las características técnicas facilitadas por el proveedor. Estos valores serán 30,35 y 40 LPM

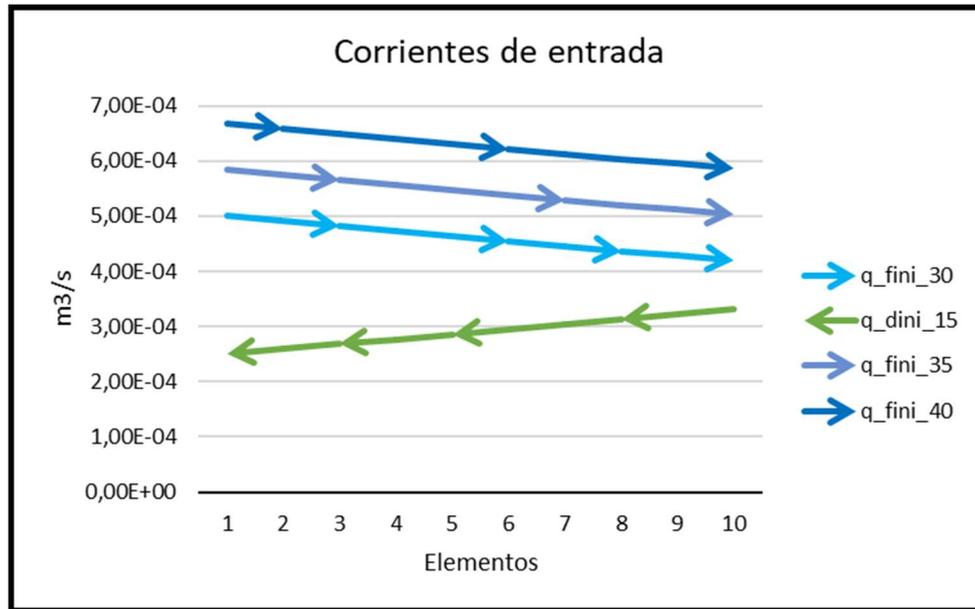


Ilustración 36. Corrientes de entrada en función del caudal de alimentación

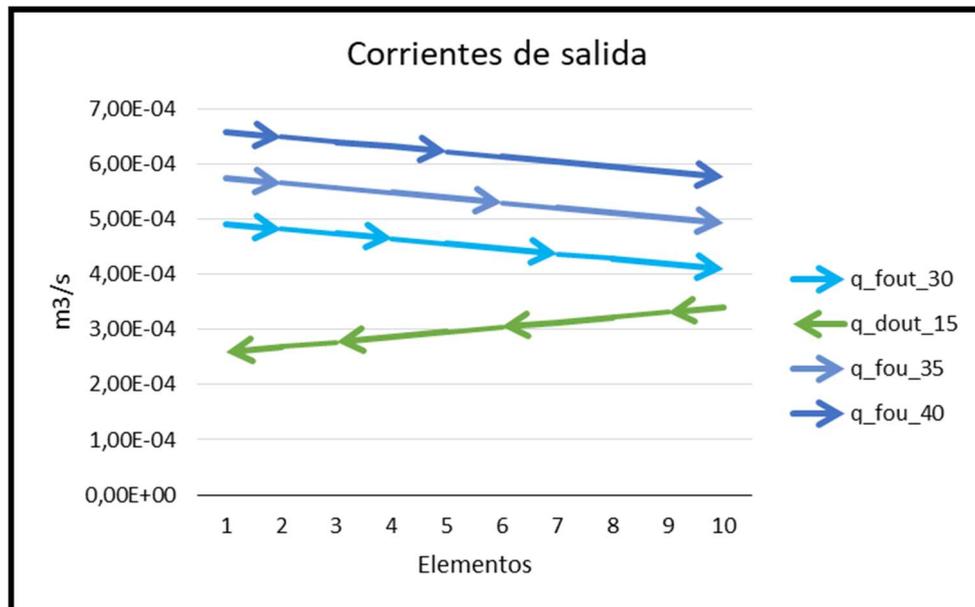


Ilustración 37. Corrientes de salida en función del caudal de alimentación

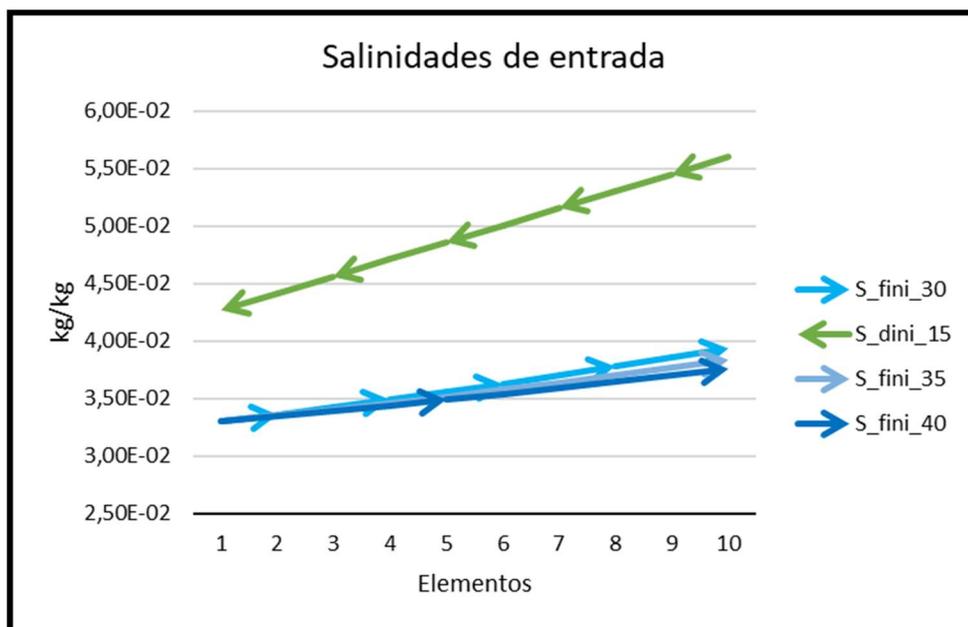


Ilustración 38. Salinidades a la entrada según la corriente de alimentación

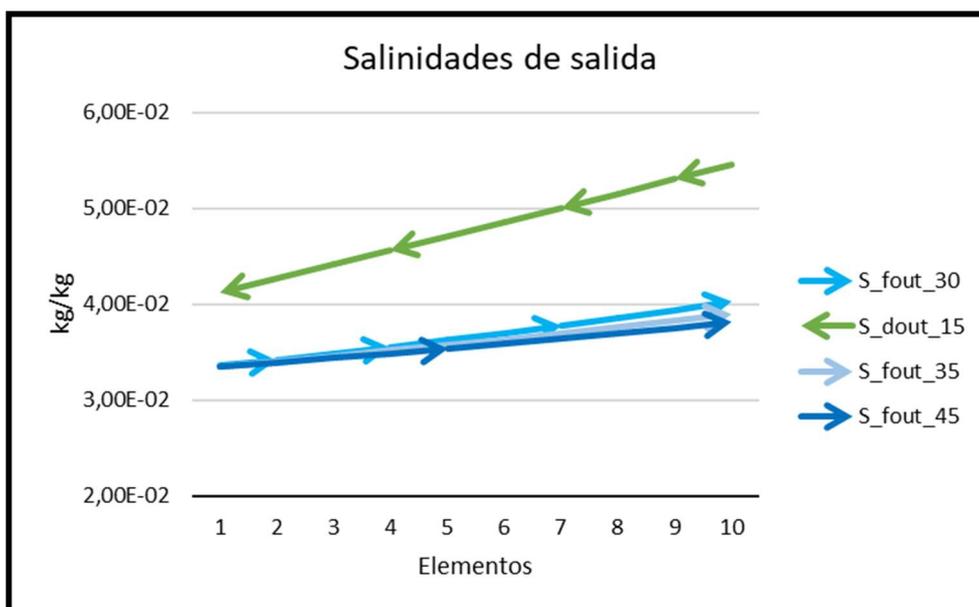


Ilustración 39. Salinidades a la salida según la corriente de alimentación

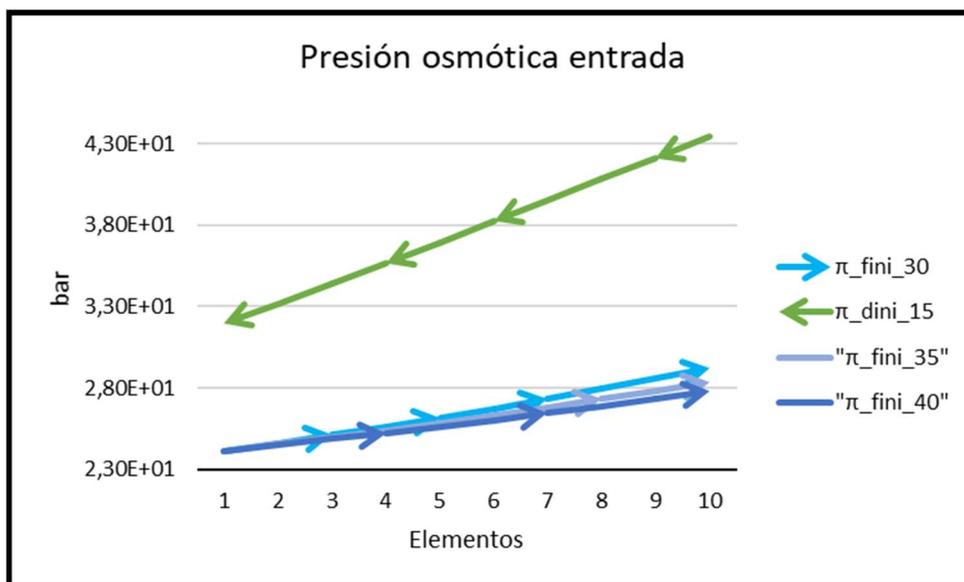


Ilustración 40. Presión osmótica de entrada en función del caudal de alimentación

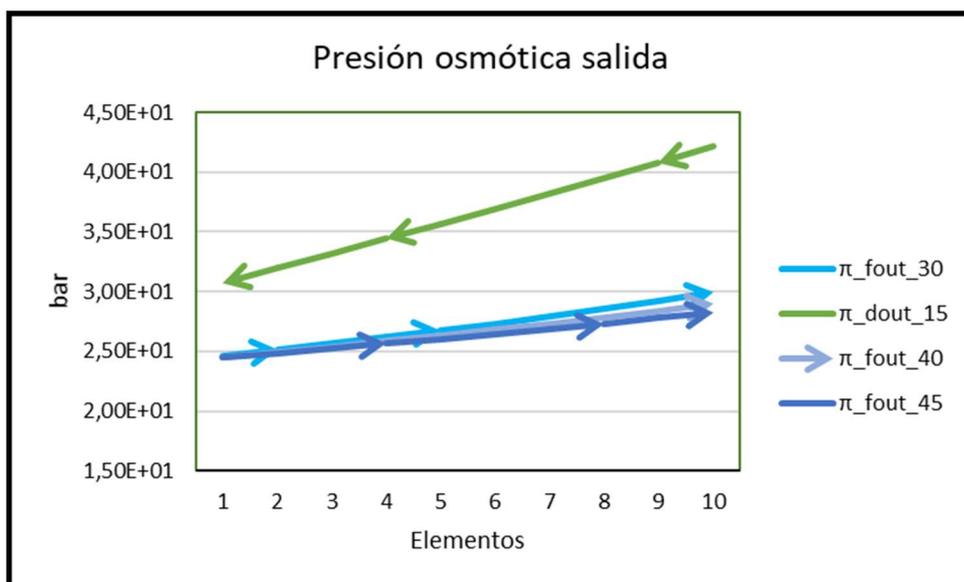


Ilustración 41. Presión osmótica de salida en función del caudal de alimentación

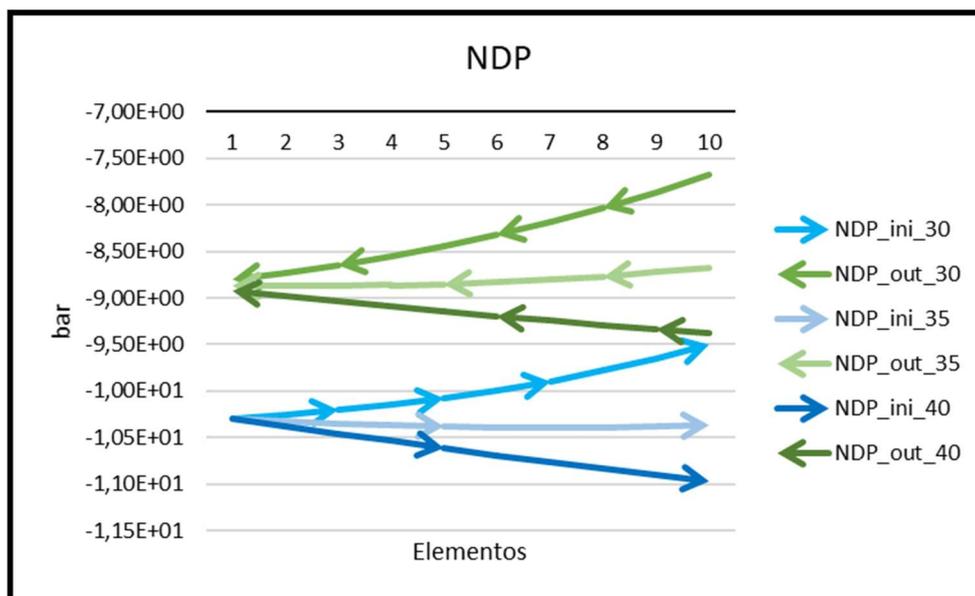


Ilustración 42. NDP en función del caudal de alimentación

En esta ocasión vemos que cuanto mayor es la diferencia de caudales de la entrada y la salida, mayor será la diferencia de salinidades de las corrientes, que se traducirá de forma proporcional en un aumento de la presión osmótica.

Mientras que la NDP vemos que la diferencia de ambas corrientes se hace más pequeña con el aumento del caudal, siendo las condiciones con mejor rendimiento las  $Q_f=30$  LPM.

	$Q_f=30$	$Q_f=35$	$Q_f=40$
$\Delta NDP1$	1,50	1,43	1,38
$\Delta NDP2$	1,53	1,46	1,40
$\Delta NDP3$	1,56	1,48	1,42
$\Delta NDP4$	1,59	1,51	1,45
$\Delta NDP5$	1,63	1,54	1,47
$\Delta NDP6$	1,66	1,56	1,49
$\Delta NDP7$	1,70	1,59	1,52
$\Delta NDP8$	1,74	1,62	1,54
$\Delta NDP9$	1,78	1,66	1,57
$\Delta NDP10$	1,83	1,69	1,60

Tabla 7. Incremento de NDP en función del caudal de alimentación, manteniendo fijo el de extracción

También podemos comprobar que los módulos necesarios varían, aunque no en gran proporción.

$Q_f=30$	$X_{i\_ini}$ (m)	$X_{i\_out}$ (m)	$Q_f=35$	$X_{i\_ini}$ (m)	$X_{i\_out}$ (m)	$Q_f=40$	$X_{i\_ini}$ (m)	$X_{i\_out}$ (m)
	0,84	0,98		0,84	0,97		0,8392	0,9691
	1,68	1,96		1,68	1,95		1,6720	1,9382
	2,53	2,96		2,51	2,92		2,4985	2,9010
	3,38	3,96		3,34	3,90		3,3189	3,8577
	4,24	4,97		4,18	4,87		4,1333	4,8086
	5,10	5,99		5,01	5,85		4,9418	5,7537
	5,98	7,03		5,84	6,83		5,7448	6,6935
	6,86	8,08		6,67	7,81		6,5424	7,6282
	7,76	9,16		7,50	8,80		7,3348	8,5582
	8,67	10,26		8,34	9,79		8,1224	9,4839

Tabla 8. Módulos necesarios en función de la corriente de alimentación

### Variación con la corriente de salida.

En esta ocasión, y como último estudio, cambiaremos la corriente de entrada de la solución de extracción, manteniendo constante la corriente de alimentación en 30 LPM. Los valores de la corriente de la *draw solution* se tomarán en 10 y 15 LPM.

La simulación muestra los siguientes resultados:

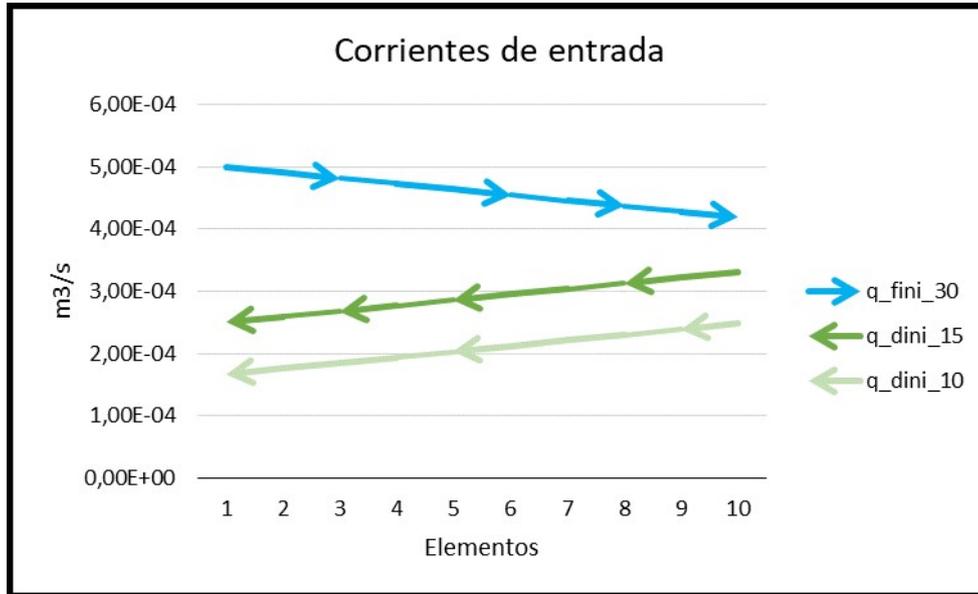


Ilustración 43. Corrientes de entrada en función del caudal de *draw solution*

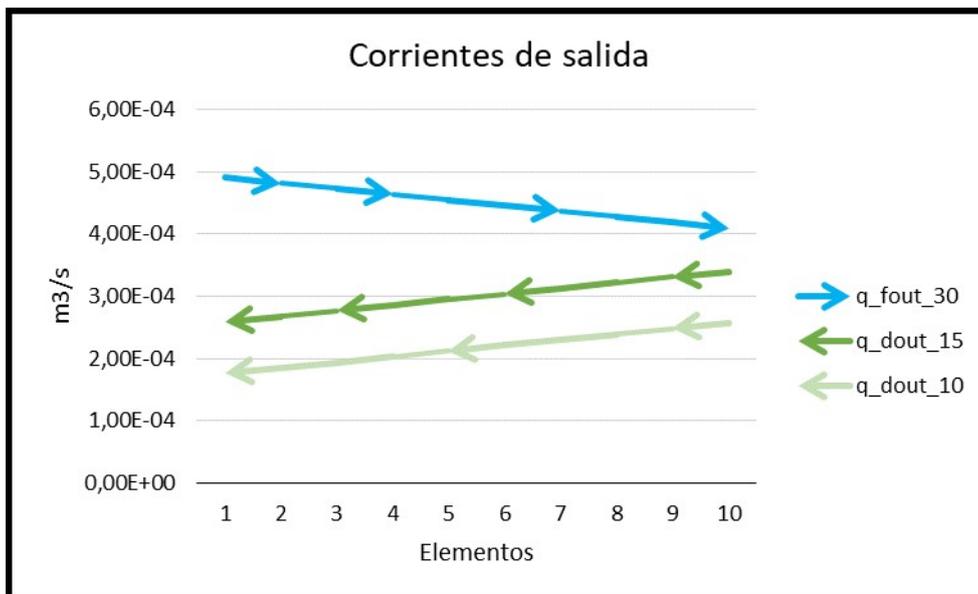
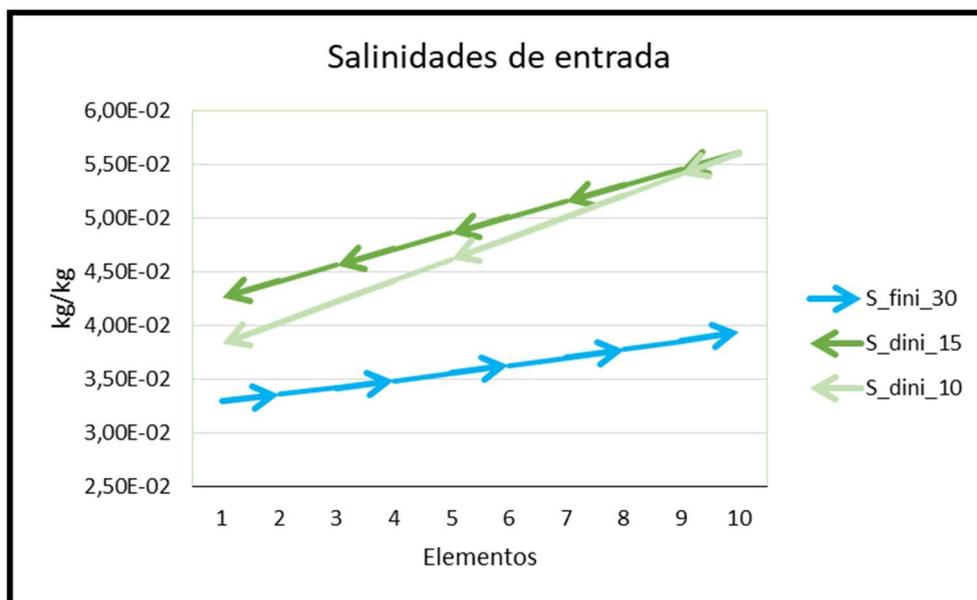
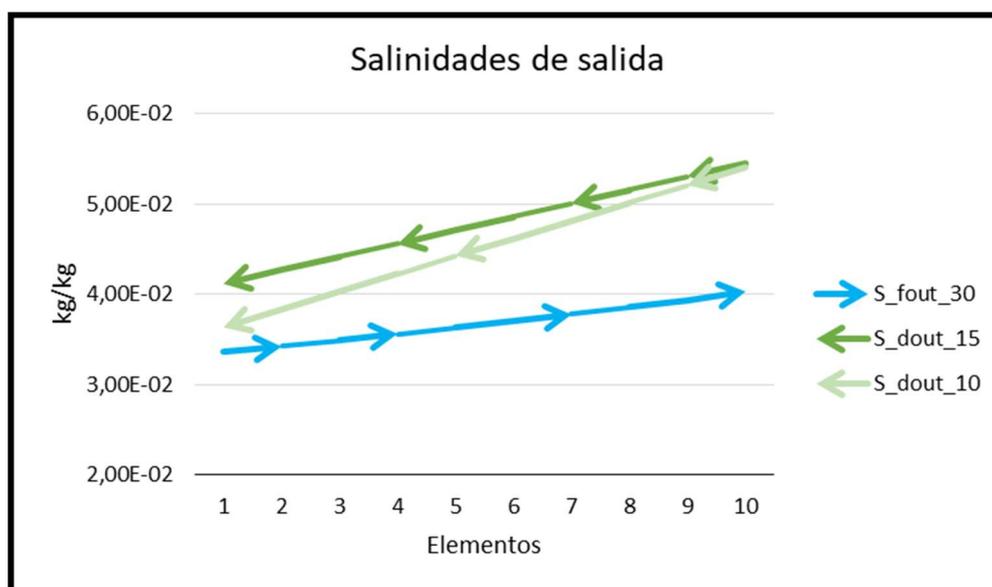
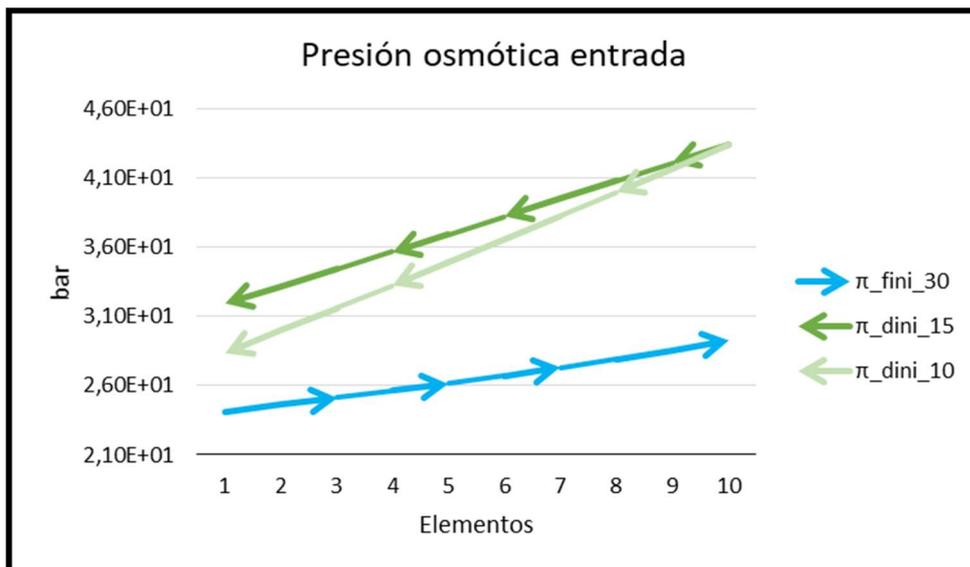
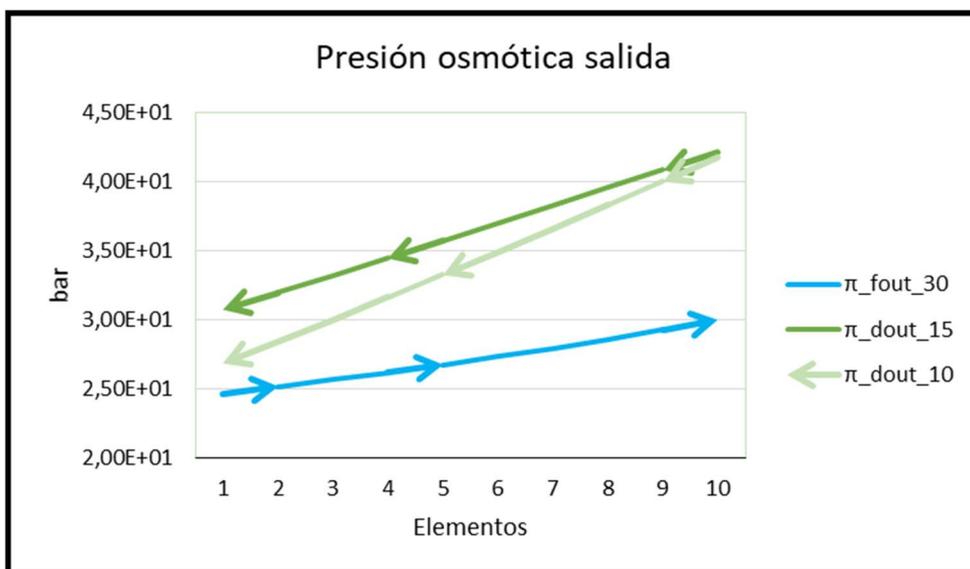
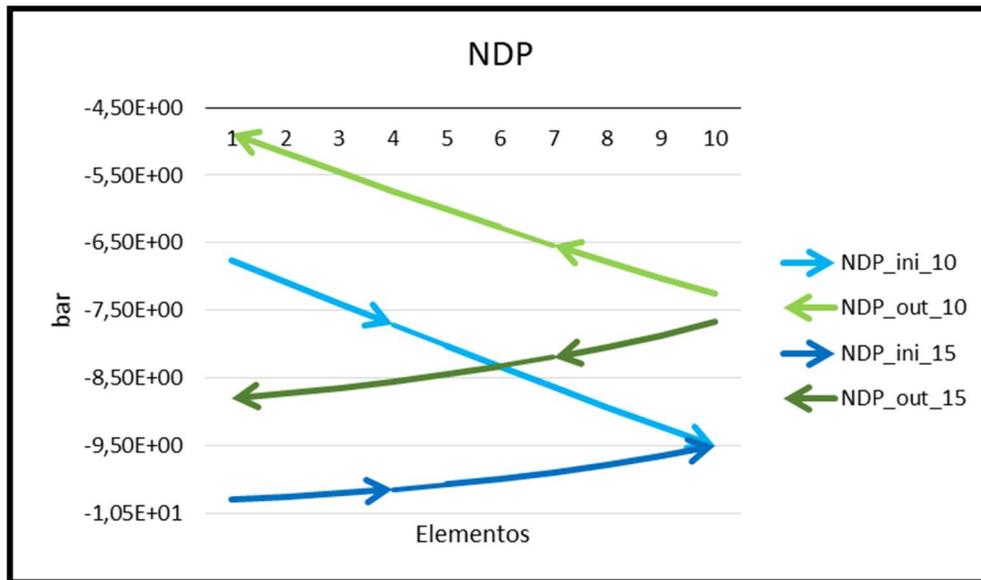


Ilustración 44. Caudales de salida en función del caudal de *draw solution*

Ilustración 45. Salinidades de entrada en función del caudal de *draw solution*Ilustración 46. Salinidades de salida en función del caudal de *draw solution*

Ilustración 47. Presiones osmóticas de entrada en función del caudal de *draw solution*Ilustración 48. Presiones osmóticas de salida en función del caudal de *draw solution*

Ilustración 49. NDP en función de la variación de la *draw solution*

Al igual que en el caso anterior, una variación del flujo de la *draw solution* supone una mayor diferencia entre ambos caudales, esto también supondrá una variación en la salinidad de la corriente de extracción, y de nuevo una ligera variación en la presión osmótica. Esta variación se reflejará en la NDP de la siguiente manera:

	Qd=10	Qd=15
$\Delta NDP1$	1,86	1,50
$\Delta NDP2$	1,90	1,53
$\Delta NDP3$	1,93	1,56
$\Delta NDP4$	1,97	1,59
$\Delta NDP5$	2,01	1,63
$\Delta NDP6$	2,06	1,66
$\Delta NDP7$	2,10	1,70
$\Delta NDP8$	2,15	1,74
$\Delta NDP9$	2,20	1,78
$\Delta NDP10$	2,26	1,83

Tabla 9. Incremento de NDP en función del caudal de extracción, manteniendo fijo el alimentación

Cuanto menor es el caudal, mayor será la diferencia de la NDP y por tanto mayor será la eficiencia de la membrana.

Respecto a los módulos necesarios para llegar al caudal transferido sí variarán notablemente con una disminución del caudal de entrada, como se refleja en la

Tabla 10

Tabla 10. Si disminuimos de 15 LPM a 10 LPM los módulos necesarios serán 15 en lugar de los 10 definidos anteriormente.

Qd=10	Xi_ini (m)	Xi_out (m)	Qd=15	Xi_ini (m)	Xi_out (m)
	1,28	1,77		0,8392	0,9824
	2,50	3,53		1,6818	1,9649
	3,67	5,20		2,5287	2,9554
	4,79	6,79		3,3805	3,9552
	5,87	8,29		4,2385	4,9659
	6,91	9,73		5,1036	5,9893
	7,91	11,11		5,9773	7,0275
	8,87	12,43		6,8610	8,0828
	9,81	13,71		7,7566	9,1581
	10,72	14,94		8,6662	10,2569

Tabla 10. Módulos necesarios en función de la corriente de *draw solution*

## 7 CONCLUSIONES

---

En el presente capítulo se exponen las conclusiones obtenidas a partir de los resultados obtenidos anteriormente.

Como principal conclusión del estudio, se ha desarrollado un modelo teórico y una herramienta de cálculo adecuadas para estudiar con carácter general la influencia de los parámetros de diseño y operación de un sistema compuesto por una serie de módulos de FO interconectados en serie. Cabe destacar que el modelo es independiente del diseño interno del módulo de membranas, esta característica de la herramienta puesto que los fabricantes no proporcionan información pública al respecto.

Los resultados que proporciona el modelo son consistentes con la literatura consultada sobre el módulo FO8040.

Sin embargo, para la debida validación de la herramienta desarrollada es necesario disponer de valores experimentales. Estos valores se obtendrán en el laboratorio de motores de la Universidad de Sevilla gracias a los proyectos SOLMIDIFF y EERES4WATER, donde se testarán en 2022 dos módulos de FO, fabricados por la empresa Toray FO4040 y F=8040, respectivamente.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Haupt, Anita and Lerch, André. "Forward Osmosis Application in Manufacturing Industries: A Short Review". *Membranes (Basel)*, 2018-07-23, Vol.8 (3), p.47
- [2] Tzahi Y.CathaAmy E.ChildressbMenachemElimelechc. "Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments". *Journal of Membrane Science*, vol. 281, 2006, pp.70-87.
- [3] Abdelrahman M.AwadaRemJalabaJoelMinier-MatarbSamerAdhambMustafa S.NasseraS.J.Judda. "The status of forward osmosis technology implementation". *Journal of Membrane Science*, vol. 461, 219, pp.10-21.
- [4] M. Elimelech. "Yale constructs forward osmosis desalination pilot plan". *Membrane Technology*. Volume 2007. (January 2007). pp 7-8.
- [5] Ronan K. McGovern, John H. Lienhard V. "On the potential of forward osmosis to energetically outperform reverse osmosis desalination". *Journal of Membrane Science*, vol.469 (2014). pp 245-250
- [6] Kim, B.; Gwak, G.; Hong, S. "Review on methodology for determining forward osmosis (FO) membrane characteristics: Water permeability (A), solute permeability (B), and structural parameter (S)". *Desalination* (2017) 422,5-16
- [7] N. Akther, A. Sodiq, A. Giwa, S. Dear, H.A. Arafat, S.W. Hasan. "Recent advancements in forward osmosis desalination: A review". *Chemical Engineering Journal*, vol. 281 (2015). pp 502-522
- [8] B. Mi and M. Elimelech, "Organic fouling of forward osmosis membranes: Fouling reversibility and cleaning without chemical reagents". *Journal of Membrane Science*, vol. 348, 2009, pp. 337-345.
- [9] Daniel James Johnsona;Wafa Ali Suwaileha; Abdul Wahab Mohammedb; Nida IHilala. "Osmotic's potential: An overview of draw solutes for forward osmosis". *Desalatio*, vol 434, 2018, pp.100-120.
- [10] Muhammad Amjadb; Jabbar Gardy; Ali Hassanpour; Dongsheng Wenca. "Novel draw solution for forward osmosis based solar desalination" *Applied Energy*; vol 230, 2018, pp.220-231.
- [11] S. Zhao, L. Zou, C. Y. Tang, and D. Mulcahy, "Recent developments in forward osmosis: Opportunities and challenges". *Journal of Membrane Science*, vol. 396, Apr. 2012, pp. 1–21.
- [12] XinJei Ge and Xidong Wang. "A Simple Two-Parameter Correlation Model for Aqueous Electrolyte Solutions across a Wide Range of Temperature". *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol 54, No 2 (2009). pp179-186
- [13] Mark Wilf. "The Guidebook to Membrane Desalination Technology: Reverse Osmosis, Nanofiltration and Hybrid Systems Process, Design, Applications and Economics". *Baladan Desalination Publications* (2007) pp. 471-493
- [14] K. G. Nayar, M. H. Sharqawy, L. D. Banchik, and J. H. Lienhard, "Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence," *Desalination*, vol. 390 (2016), pp. 1–24.
- [15] M. Obaid; Mohammad Ali Abdelkareemd; Seungho Kook; Hank-Yong Kinf; Nidal Hilalg; "Breakthroughs in the fabrication of electrospun-nanofibers-supported thin film composite membranes for forward osmosis process: A review" *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. [https://repository.kaust.edu.sa/bitstream/handle/10754/659227/Proof\\_Breakthroughs%20in%20the%20fabrication%20of%20electrospunnanofiber-.pdf;jsessionid=F618534B7F5D8A96FDD4256F08DEF7F2?sequence=1](https://repository.kaust.edu.sa/bitstream/handle/10754/659227/Proof_Breakthroughs%20in%20the%20fabrication%20of%20electrospunnanofiber-.pdf;jsessionid=F618534B7F5D8A96FDD4256F08DEF7F2?sequence=1)
- Consultado el 01/10/2021
- [16] Alejandro Ibáñez Hergueta "Diseño de un proceso de ósmosis directa para la desalación de agua de mar". TFG. Escuela superior de ingenieros de Valencia. Consultado: 15/09/2021 (2016/2017). [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/85727/22595747\\_TFG\\_14993710767755934498593671441340.pdf?sequence=2](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/85727/22595747_TFG_14993710767755934498593671441340.pdf?sequence=2)
- [17] Youngpil Chun, Dennis Mulcahy, Linda Zou and In S. Kim. "A Short Review of Membrane Fouling in



- [36] R. Wang, L. Shi, C. Y. Tang, S. Chou, C. Qiu, and A. G. Fane, "Characterization of novel forward osmosis hollow fiber membranes," *Journal of Membrane Science*. Vol 355 (2010) pp.158-167.
- [37] L. Huang, D.-J. Lee, and J.-Y. Lai, "Forward osmosis membrane bioreactor for wastewater treatment with phosphorus recovery," *Bioresour. Technol.*, vol. 198, pp. 418–423, 2015.
- [38] D. Xiao, C. Y. Tang, J. Zhang, W. C. L. Lay, R. Wang, and A. G. Fane, "Modeling salt accumulation in osmotic membrane bioreactors: Implications for FO membrane selection and system operation," *Journal of Membrane Science*. Vol 366 (2011) pp.314-324.
- [39] Andrea Achilli, Tzahi Y. Cathb, Amy E. Childress. "Selection of inorganicbased draw solutions for forward osmosis applications". *Journal of Membrane Science* (2010) .Vol. 364, pp 233-241.
- [40] June-Seok Choia, Hwan Kimb, Sangho Leea, Tae-Mun Hwanga, Hyunje Oha, Dae Ryook Yangc, Joon Ha Kim "Theoretical investigation of hybrid desalination system combining reverse osmosis and forward osmosis". *Desalination and water treatment* (2010) Vol. 15. Pp 114-120
- [41] Anita Haupt, André Lerch. "Forward Osmosis Application in Manufacturing Industries: A Short Review" *Membranes* (2018). Vol.47.
- [42] Elorm Obotey Ezugbe, Emmanuel Kweiner Tetteh, Sudesh Rathilal, Dennis Asante-Sackey, Gloria Amo-Duodu, "Desalation of Municipal Wasterwater Using Forward Osmosis". *Membranes* (2021) Vol. 119
- [43] Asahi Kaisei. Group. "Asahi Kasei develops new forward osmosis membrane system for high-level concentration of liquids without heating or pressurization" (2018) Consultado en línea el 24/11/2021. <https://www.asahi-kasei.co.jp/asahi/en/news/2018/e181130.html>
- [44].Aquaporin. "Hollow.fiber.forward.osmosis.modules". Consultado.en.línea.el.24/11/2021 <https://aquaporin.com/forward-osmosis-membranes/>
- [45] Berghor "Companies take next step in commercializing Tubular Forward Osmosis Membrane technology" (2018). Consultado en línea el 24/11/2021 <https://www.berghofmembranes.com/berghof-membranes-and-aquaporin-announce-joint-development-agreement-2/>
- [46] Mostafa H. Sharqawya, John H. Lienhard Va, Syed M. Zubairb, "Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data" *Desalination and Water Treatment*. (2010) Vol 16. pp.354-380.
- [47] Fluid Technology Solutions, Inc. "OsmoBC™ Integrated Membrane Systems For Industrial Wastewater Treatment" Consultado en línea el 27/11/2021 [http://ftsh2o.com/wp-content/uploads/2018/07/Osmo-BC-System\\_FTSIND-0816.pdf](http://ftsh2o.com/wp-content/uploads/2018/07/Osmo-BC-System_FTSIND-0816.pdf)
- [48] Toboyos Ideas and Chemistry. "Toyobo's hollow fiber forward osmosis membrane adopted at Danish osmotic power plant. (2018). Consultado en línea 27/11/2021. [http://www.toyobo-global.com/news/2018/release\\_2.html](http://www.toyobo-global.com/news/2018/release_2.html)
- [49] Interreg Atlantic Area. Consultado en línea el 02/12/2021 <https://www.eeres4water.eu/>

# 8 ANEXO 1

## Especificaciones técnicas de las membranas de ósmosis directas desarrolladas por Aquaporin

- Módulo HFF014



High rejection of difficult compounds



Low specific reverse salt flux



High recovery of water



Low footprint due to high packing density

### PRODUCT TYPE

The Aquaporin Inside® HFFO®14 module is designed for Forward Osmosis (FO) applications. Biomimetic hollow fiber module comprising an active layer of polyamide thin film composite (TFC) with integrated aquaporin proteins. The addition of aquaporin water channels into the rejection

layer makes the Aquaporin Inside® FO membrane capable of rejecting difficult contaminants and preserving valuable components. The use of hollow fibers allows for a very high packing density.

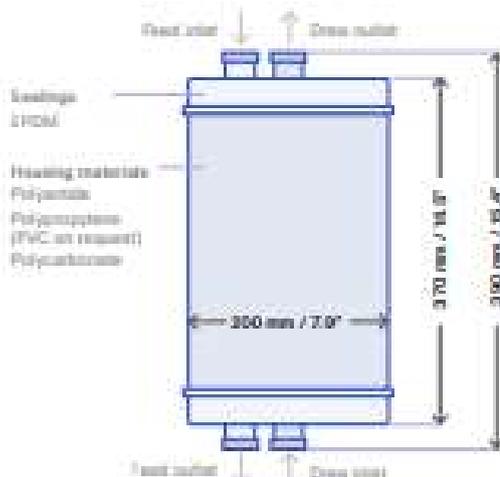
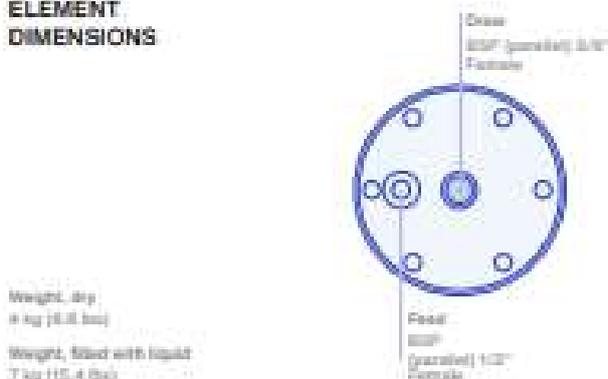
### PRODUCT SPECIFICATIONS

Product name	Fiber ID	Membrane area	Water flux	Specific reverse salt flux
HFFO®14 module	0.20 mm	13.8 m <sup>2</sup> 148.5 ft <sup>2</sup>	11 ± 1.5 LMH	0.15 ± 0.05 g/L

The stated product performance is based on following testing conditions:  
0.5 M NaCl (2.9 %) draw vs DI water (FO mode), temperature: 25°C (77°F), single pass mode, counter-current flow, feed flow rate: 400 LPH, draw flow rate: 500 LPH, membrane pressure (TMP) based on draw: 5.9 bar (85.8 psi)

AQUAPORIN INSIDE® HFF6014 MODULE

ELEMENT DIMENSIONS



RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Operating mode	Counter-current flow, inside-out
Transmembrane pressure (TMP) feed to draw	≤ 0.2 bar / 2.9 psi
pH and Temperature range <sup>a</sup>	pH 3-7 at 5-40°C / 41-104°F pH 3-8 at 5-35°C / 41-95°F pH 3-9 at 5-25°C / 41-77°F
Pre-filtration <sup>b</sup>	≤ 50 µm

<sup>a</sup>It is of utmost importance to respect the ranges for the different pH and temperature combinations. If in doubt, contact Aquaporin A/S to assist with a case-specific evaluation.  
<sup>b</sup>The optimal pre-filtration is application dependent.  
<sup>c</sup>Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, Aquaporin A/S recommends removing residual free chlorine by pre-treatment prior to membrane exposure.  
<sup>d</sup>Refer to cleaning guidelines in the User Manual.

MAXIMUM OPERATING CONDITIONS

Transmembrane pressure (TMP) feed to draw	≤ 2 bar / 29.0 psi
Feed inlet pressure	≤ 2 bar / 29.0 psi
Draw inlet pressure	≤ 2 bar / 29.0 psi
Max. particle size	≤ 50 µm
Free chlorine tolerance <sup>d</sup>	≈ 0.1 mg/L

CLEAN-IN-PLACE (CIP)<sup>d</sup>

Temperature	≤ 40°C / 122°F
pH range (feed side)	2-11
pH range (draw side)	2-7
Pressure	≤ 0.5 bar / 7.3 psi
Duration	≤ 20 min

ADDITIONAL INFORMATION

- ✓ Module should be operated in vertical position with feed inlet in the top and draw inlet in the bottom.
- ✓ It is recommended to rinse the module for 30 min, prior to first use.
- ✓ It is advisable to pre-treat the feed solution to remove suspended solids. Particles might damage the fibers and possibly cause a decrease in performance.
- ✓ Run feed solution prior to draw solution to avoid osmotic drying of the membrane.
- ✓ Do not allow the module to run dry as this will compromise the membrane performance.
- ✓ Immediately flush the module on feed side with clean water for ≥ 30 min after use (draw side connections open).

- ✓ The module can be stored at room temperature, but preferred storage is at 4°C.
- ✓ Keep out of direct sunlight.
- ✓ To prevent biological growth during prolonged system shutdowns, the module should be immersed in a preservative solution. Rinse thoroughly before re-use.
- ✓ Keep the module moist at all times after initial wetting.
- ✓ The information provided in this document is for informative purposes only. It is the users own responsibility to ensure appropriate usage of this product. Aquaporin A/S assumes no obligation, liability or damages incurred for the misuse of the product or for the information provided in this document. This document does not express or imply any warranty as to the merchantability or fitness of the products.

Aquaporin A/S  
 Nymøllevej 76  
 2800 Kongens Lyngby

Phone: +45 8230 3082  
 sales@aquaporin.com

Aquaporin Inside®

- Módulo. HHF02

AQUAPORIN INSIDE® HFFO\*2 MODULE

# Aquaporin Inside® HFFO®2 module

Hollow Fiber Forward Osmosis module





**High rejection of  
difficult compounds**



**Low specific  
reverse salt flux**



**High recovery  
of water**



**Low footprint due  
to high packing  
density**

**PRODUCT TYPE**

The Aquaporin Inside® HFFO\*2 module is designed for Forward Osmosis (FO) applications. Biomimetic hollow fiber module comprising an active layer of polyamide thin film composite (TFC) with integrated aquaporin proteins. The addition of aquaporin water channels into the rejection

layer makes the Aquaporin Inside® FO membrane capable of rejecting difficult contaminants and preserving valuable components. The use of hollow fibers allows for a very high packing density.

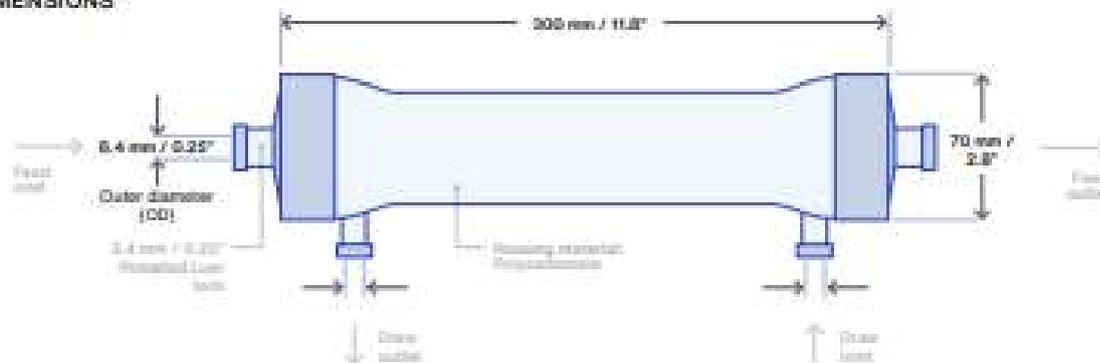
**PRODUCT SPECIFICATIONS**

Product name	Fiber ID	Membrane area	Water flux	Specific reverse salt flux
HFFO*2 module	0.20 mm	2.3 m <sup>2</sup> 24.7 ft <sup>2</sup>	11 ± 1.5 LMH	0.15 ± 0.05 g/L

The stated product performance is based on following testing conditions: 0.5 M NaCl (2.9%) draw vs DI water (FO mode), temperature: 25°C (77°F), single pass mode, counter-current flow, feed flow rate: 60 LPH, draw flow rate: 25 LPH, transmembrane pressure (TMP) feed to draw: 0.5 bar (2.9 psi)

AQUAPORIN INSIDE® HFF022 MODULE

ELEMENT DIMENSIONS



RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Operating mode	Counter-current flow, inside-out
Transmembrane pressure (TMP) feed to draw	0.2 bar / 2.9 psi
Temperature range	5-30°C / 41-86°F
pH range	3-10
Pre-filtration*	≤ 50 µm

\*The optimal pre-filtration is application dependent.

\*Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, Aquaporin A/S recommends removing residual free chlorine by pre-treatment prior to membrane exposure.

\*Refer to cleaning guidelines in the User Manual.

MAXIMUM OPERATING CONDITIONS

Transmembrane pressure (TMP) feed to draw	≤ 4 bar / 58.0 psi
Feed inlet pressure	≤ 4 bar / 58.0 psi
Draw inlet pressure	≤ 2 bar / 29.0 psi
Max. particle size	≤ 50 µm
Free chlorine tolerance*	< 0.1 mg/L

CLEAN-IN-PLACE (CIP)\*

Temperature	≤ 50°C / 122°F
pH range	2-11
Pressure	≤ 0.5 bar / 7.3 psi
Duration	≤ 20 min

ADDITIONAL INFORMATION

- ✓ Module can be operated in vertical and horizontal position.
- ✓ It is recommended to rinse the module for 30 min, prior to first use.
- ✓ It is advisable to pre-treat the feed solution to remove suspended solids. Particles might damage the fibers and possibly cause a decrease in performance.
- ✓ Run feed solution prior to draw solution to avoid osmotic drying of the membrane.
- ✓ Do not allow the module to run dry as this will compromise the membrane performance.
- ✓ Immediately flush the module on feed side with clean water for ≥ 30 min after use (draw side connections open).

- ✓ The module can be stored at room temperature, but preferred storage is at 4°C.
- ✓ Keep out of direct sunlight.
- ✓ To prevent biological growth during prolonged system shutdowns, the module should be immersed in a preservative solution. Rinse thoroughly before re-use.
- ✓ Keep the module moist at all times after initial wetting.
- ✓ The information provided in this document is for informative purposes only. It is the users own responsibility to ensure appropriate usage of this product. Aquaporin A/S assumes no obligation, liability or damages incurred for the misuse of the product or for the information provided in this document. This document does not express or imply any warranty as to the merchantability or fitness of the products.

Aquaporin A/S  
 Nymøllevej 78  
 2800 Kongens Lyngby

Phone: +45 8230 3082  
 sales@aquaporin.com

Aquaporin Inside®

- Módulo HFFO.6

AQUAPORIN INSIDE® HFFO®.6 MODULE

# Aquaporin Inside® HFFO®.6 module

Hollow Fiber Forward Osmosis module





High rejection of  
difficult compounds



Low specific  
reverse salt flux



High recovery  
of water



Low footprint due  
to high packing  
density

**PRODUCT TYPE**

The Aquaporin Inside® HFFO®.6 module is designed for Forward Osmosis (FO) applications. Biomimetic hollow fiber module comprising an active layer of polyamide thin film composite (TFC) with integrated aquaporin proteins. The addition of aquaporin water channels into the rejection

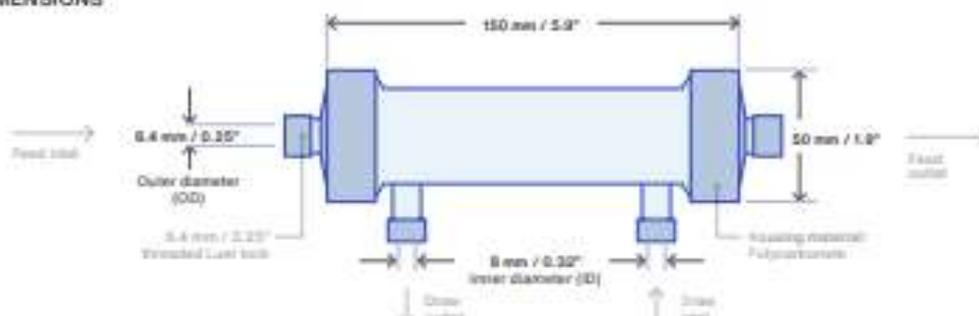
layer makes the Aquaporin Inside® FO membrane capable of rejecting difficult contaminants and preserving valuable components. The use of hollow fibers allows for a very high packing density.

**PRODUCT SPECIFICATIONS**

Product name	Fiber ID	Membrane area	Water flux	Specific reverse salt flux
HFFO®.6 module	0.20 mm	0.8 m <sup>2</sup> 6.46 ft <sup>2</sup>	11 ± 1.5 LMH	0.15 ± 0.05 g/L

The stated product performance is based on following testing conditions: 0.8 M NaCl (2.9 %) draw vs DI water (FO mode), temperature: 25°C (77 °F), single pass mode, counter-current flow, feed flow rate: 25 LPM, draw flow rate: 45 LPM, transmembrane pressure (TMP) feed to draw: 0.2 bar (2.9 psi)

## AQUAPORIN INSIDE® HFFO® 8 MODULE

ELEMENT  
DIMENSIONS

## RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Operating mode	Counter-current flow, inside-out
Transmembrane pressure (TMP) feed to draw	0.2 bar / 2.9 psi
Temperature range	5-30°C / 41-86°F
pH range	3-10
Pre-filtration*	≤ 50 µm

\* The optimal pre-filtration is application dependent.

\*\* Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, Aquaporin A/S recommends removing residual free chlorine by pre-treatment prior to membrane exposure.

\*\* Refer to cleaning guidelines in the User Manual.

## MAXIMUM OPERATING CONDITIONS

Transmembrane pressure (TMP) feed to draw	≤ 4 bar / 58.0 psi
Feed inlet pressure	≤ 4 bar / 58.0 psi
Draw inlet pressure	≤ 2 bar / 29.0 psi
Max. particle size	≤ 50 µm
Free chlorine tolerance*	< 0.1 mg/L

## CLEAN-IN-PLACE (CIP)

Temperature	≤ 50°C / 122°F
pH range	2-11
Pressure	≤ 0.5 bar / 7.3 psi
Duration	≤ 20 min

## ADDITIONAL INFORMATION

- ✓ Module can be operated in vertical and horizontal position.
- ✓ It is recommended to rinse the module for 30 min, prior to first use.
- ✓ It is advisable to pre-treat the feed solution to remove suspended solids. Particles might damage the fibers and possibly cause a decrease in performance.
- ✓ Run feed solution prior to draw solution to avoid osmotic drying of the membrane.
- ✓ Do not allow the module to run dry as this will compromise the membrane performance.
- ✓ Immediately flush the module on feed side with clean water for ≥ 30 min after use (draw side connections open).
- ✓ The module can be stored at room temperature, but preferred storage is at 4°C.
- ✓ Keep out of direct sunlight.
- ✓ To prevent biological growth during prolonged system shutdowns, the module should be immersed in a preservative solution. Rinse thoroughly before re-use.
- ✓ Keep the module moist at all times after initial wetting.
- ✓ The information provided in this document is for informative purposes only. It is the users own responsibility to ensure appropriate usage of this product. Aquaporin A/S assumes no obligation, liability or damages incurred for the misuse of the product or for the information provided in this document. This document does not express or imply any warranty as to the merchantability or fitness of the products.

Aquaporin A/S  
Nymøllevej 78  
2800 Kongens Lyngby

Phone: +45 8230 3082  
sales@aquaporin.com

Aquaporin Inside®

# 9 ANEXO 2

## Resultados obtenidos del estudio preliminar:

balance de m	q_fini [m3/s]	q_fouti [m3/s]	q_sfini [m3/s]	q_sfouti [m3/s]	S_fini [m3/s]	rho_fini [kg/m3]	q_fini	pi_fini [bar]	S_fouti [m3/s]	rho_fouti [kg/m3]	phi_fouti	pi_fouti [bar]	q_wti [m3/s]	q_dini [m3/s]	q_douti [m3/s]	q_s dini [m3/s]	q_s douti [m3/s]	S_dini [m3/s]	rho_dini [kg/m3]	phi_dini	pi_dini [bar]	S_douti [m3/s]	rho_douti [kg/m3]	phi_douti	pi_douti [bar]	NDP_ini [bar]	NDP_out [bar]	Lx_ini (m)	Xi_ini (m)	Lx_out (m)	Xi_out (m)
1	5,00E-04	4,91E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,30E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,41E+01	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	9,00E-06	2,50E-04	2,59E-04	1,07E-05	1,07E-05	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	4,12E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,07E+01	-1,03E+01	-8,80E+00	8,36E-01	0,84	9,78E-01	0,98
2	4,91E-04	4,82E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	9,00E-06	2,59E-04	2,68E-04	1,14E-05	1,14E-05	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	-1,03E+01	-8,73E+00	8,39E-01	1,68	9,86E-01	1,96
3	4,82E-04	4,73E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	9,00E-06	2,68E-04	2,77E-04	1,22E-05	1,22E-05	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	-1,02E+01	-8,64E+00	8,43E-01	2,52	9,96E-01	2,94
4	4,73E-04	4,64E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	9,00E-06	2,77E-04	2,86E-04	1,30E-05	1,30E-05	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	-1,01E+01	-8,55E+00	8,48E-01	3,37	1,01E+00	3,94
5	4,64E-04	4,55E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	9,00E-06	2,86E-04	2,95E-04	1,39E-05	1,39E-05	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	-1,01E+01	-8,45E+00	8,54E-01	4,22	1,02E+00	4,95
6	4,55E-04	4,46E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	9,00E-06	2,95E-04	3,04E-04	1,48E-05	1,48E-05	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,82E+01	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	-9,99E+00	-8,33E+00	8,62E-01	5,08	1,03E+00	5,96
7	4,46E-04	4,37E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	9,00E-06	3,04E-04	3,13E-04	1,57E-05	1,57E-05	5,16E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,95E+01	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,82E+01	-9,89E+00	-8,19E+00	8,70E-01	5,95	1,05E+00	7,00
8	4,37E-04	4,28E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	9,00E-06	3,13E-04	3,22E-04	1,66E-05	1,66E-05	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,08E+01	5,16E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,95E+01	-9,78E+00	-8,04E+00	8,80E-01	6,83	1,07E+00	8,05
9	4,28E-04	4,19E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	9,00E-06	3,22E-04	3,31E-04	1,76E-05	1,76E-05	5,45E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,21E+01	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,08E+01	-9,65E+00	-7,87E+00	8,92E-01	7,73	1,09E+00	9,12
10	4,19E-04	4,10E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	4,02E-02	1,03E+03	9,09E-01	3,00E+01	9,00E-06	3,31E-04	3,40E-04	1,85E-05	1,85E-05	5,60E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,35E+01	5,45E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,21E+01	-9,50E+00	-7,67E+00	9,06E-01	8,63	1,12E+00	10,22

Tabla 11. Resultados de corrientes, propiedades y secciones del estudio preliminar

P_fini [bar]	P_fouti [bar]	P_dini [bar]	P_douti [bar]
4	3,7	1,5	1
3,7	3,4	2	1,5
3,4	3,1	2,5	2
3,1	2,8	3	2,5
2,8	2,5	3,5	3
2,5	2,2	4	3,5
2,2	1,9	4,5	4
1,9	1,6	5	4,5
1,6	1,3	5,5	5
1,3	1	6	5,5

Tabla 12. Presiones del estudio preliminar

Resultados obtenidos en funcion de la temperatura

9.1.1 T=15 °C

Balance de m	q <sub>a</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>f</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>s</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>sf</sub> [m <sup>3</sup> /s]	S <sub>fini</sub> [m <sup>3</sup> /s]	rho <sub>fini</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	phi <sub>fini</sub>	pi <sub>fini</sub> [bar]	S <sub>fout</sub> [m <sup>3</sup> /s]	rho <sub>fout</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	phi <sub>fout</sub>	pi <sub>fout</sub> [bar]	q <sub>w</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>dini</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>dout</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>sdini</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>sdout</sub> [m <sup>3</sup> /s]	S <sub>dini</sub> [m <sup>3</sup> /s]	rho <sub>dini</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	phi <sub>dini</sub>	pi <sub>dini</sub> [bar]	S <sub>dout</sub> [m <sup>3</sup> /s]	rho <sub>dout</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	phi <sub>dout</sub>	pi <sub>dout</sub> [bar]	NDP <sub>ini</sub> [bar]	NDP <sub>out</sub> [bar]	Δx <sub>ini</sub> (m)	Xi <sub>ini</sub> (m)	Δx <sub>out</sub> (m)	Xi <sub>out</sub> (m)
1	5,00E-04	4,91E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,30E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,41E+01	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	9,00E-06	2,50E-04	2,59E-04	1,07E-05	1,07E-05	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	4,12E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,07E+01	-1,03E+01	-8,80E+00	8,36E-01	0,84	9,78E-01	0,98
2	4,91E-04	4,82E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	9,00E-06	2,59E-04	2,68E-04	1,14E-05	1,14E-05	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	-1,03E+01	-8,73E+00	8,39E-01	1,68	9,86E-01	1,96
3	4,82E-04	4,73E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	9,00E-06	2,68E-04	2,77E-04	1,22E-05	1,22E-05	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	-1,02E+01	-8,64E+00	8,43E-01	2,52	9,96E-01	2,94
4	4,73E-04	4,64E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	9,00E-06	2,77E-04	2,86E-04	1,30E-05	1,30E-05	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	-1,01E+01	-8,55E+00	8,48E-01	3,37	1,01E+00	3,94
5	4,64E-04	4,55E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	9,00E-06	2,86E-04	2,95E-04	1,39E-05	1,39E-05	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	-1,01E+01	-8,45E+00	8,54E-01	4,21	1,02E+00	4,95
6	4,55E-04	4,46E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	9,00E-06	2,95E-04	3,04E-04	1,48E-05	1,48E-05	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,82E+01	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	-9,99E+00	-8,33E+00	8,62E-01	5,08	1,03E+00	5,96
7	4,46E-04	4,37E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	9,00E-06	3,04E-04	3,13E-04	1,57E-05	1,57E-05	5,16E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,95E+01	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,82E+01	-9,89E+00	-8,19E+00	8,70E-01	5,95	1,05E+00	7,00
8	4,37E-04	4,28E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	9,00E-06	3,13E-04	3,22E-04	1,66E-05	1,66E-05	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,08E+01	5,16E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,95E+01	-9,78E+00	-8,04E+00	8,80E-01	6,83	1,07E+00	8,05
9	4,28E-04	4,19E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	9,00E-06	3,22E-04	3,31E-04	1,76E-05	1,76E-05	5,45E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,21E+01	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,08E+01	-9,65E+00	-7,87E+00	8,92E-01	7,79	1,08E+00	9,12
10	4,19E-04	4,10E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	4,02E-02	1,03E+03	9,09E-01	3,00E+01	9,00E-06	3,31E-04	3,40E-04	1,85E-05	1,85E-05	5,60E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,35E+01	5,45E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,21E+01	-9,50E+00	-7,67E+00	9,06E-01	8,63	1,12E+00	10,22

Tabla 13 Corrientes, propiedades y secciones para T=15°C

9.1.2 T=25 °C

Balance de m	q <sub>a</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>f</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>s</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>sf</sub> [m <sup>3</sup> /s]	S <sub>fini</sub> [m <sup>3</sup> /s]	rho <sub>fini</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	phi <sub>fini</sub>	pi <sub>fini</sub> [bar]	S <sub>fout</sub> [m <sup>3</sup> /s]	rho <sub>fout</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	phi <sub>fout</sub>	pi <sub>fout</sub> [bar]	q <sub>w</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>dini</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>dout</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>sdini</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>sdout</sub> [m <sup>3</sup> /s]	S <sub>dini</sub> [m <sup>3</sup> /s]	rho <sub>dini</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	phi <sub>dini</sub>	pi <sub>dini</sub> [bar]	S <sub>dout</sub> [m <sup>3</sup> /s]	rho <sub>dout</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	phi <sub>dout</sub>	pi <sub>dout</sub> [bar]	NDP <sub>ini</sub> [bar]	NDP <sub>out</sub> [bar]	Δx <sub>ini</sub> (m)	Xi <sub>ini</sub> (m)	Δx <sub>out</sub> (m)	Xi <sub>out</sub> (m)
1	5,00E-04	4,91E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,30E-02	1,02E+03	9,07E-01	2,50E+01	3,36E-02	1,02E+03	9,08E-01	2,55E+01	9,00E-06	2,50E-04	2,59E-04	1,07E-05	1,07E-05	4,27E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,31E+01	4,12E-02	1,03E+03	9,12E-01	3,18E+01	-1,06E+01	-9,01E+00	8,14E-01	0,81	9,55E-01	0,95
2	4,91E-04	4,82E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,36E-02	1,02E+03	9,08E-01	2,55E+01	3,42E-02	1,02E+03	9,08E-01	2,60E+01	9,00E-06	2,59E-04	2,68E-04	1,14E-05	1,14E-05	4,41E-02	1,03E+03	9,14E-01	3,43E+01	4,27E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,31E+01	-1,06E+01	-8,97E+00	8,15E-01	1,63	9,66E-01	1,91
3	4,82E-04	4,73E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,42E-02	1,02E+03	9,08E-01	2,60E+01	3,49E-02	1,02E+03	9,08E-01	2,65E+01	9,00E-06	2,68E-04	2,77E-04	1,22E-05	1,22E-05	4,56E-02	1,03E+03	9,15E-01	3,56E+01	4,41E-02	1,03E+03	9,14E-01	3,43E+01	-1,05E+01	-8,91E+00	8,17E-01	2,45	9,76E-01	2,87
4	4,73E-04	4,64E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,49E-02	1,02E+03	9,08E-01	2,65E+01	3,56E-02	1,02E+03	9,09E-01	2,71E+01	9,00E-06	2,77E-04	2,86E-04	1,30E-05	1,30E-05	4,71E-02	1,03E+03	9,16E-01	3,69E+01	4,56E-02	1,03E+03	9,15E-01	3,56E+01	-1,05E+01	-8,85E+00	8,19E-01	3,27	9,73E-01	3,84
5	4,64E-04	4,55E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,56E-02	1,02E+03	9,09E-01	2,71E+01	3,63E-02	1,02E+03	9,09E-01	2,77E+01	9,00E-06	2,86E-04	2,95E-04	1,39E-05	1,39E-05	4,86E-02	1,03E+03	9,18E-01	3,82E+01	4,71E-02	1,03E+03	9,16E-01	3,69E+01	-1,05E+01	-8,77E+00	8,23E-01	4,09	9,93E-01	4,81
6	4,55E-04	4,46E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,63E-02	1,02E+03	9,09E-01	2,77E+01	3,70E-02	1,03E+03	9,10E-01	2,83E+01	9,00E-06	2,95E-04	3,04E-04	1,48E-05	1,48E-05	5,01E-02	1,04E+03	9,19E-01	3,96E+01	4,86E-02	1,03E+03	9,18E-01	3,82E+01	-1,04E+01	-8,67E+00	8,27E-01	4,92	9,93E-01	5,79
7	4,46E-04	4,37E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,70E-02	1,03E+03	9,10E-01	2,83E+01	3,78E-02	1,03E+03	9,10E-01	2,89E+01	9,00E-06	3,04E-04	3,13E-04	1,57E-05	1,57E-05	5,16E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,09E+01	5,01E-02	1,04E+03	9,19E-01	3,96E+01	-1,04E+01	-8,56E+00	8,33E-01	5,75	1,01E+00	6,78
8	4,37E-04	4,28E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,78E-02	1,03E+03	9,10E-01	2,89E+01	3,86E-02	1,03E+03	9,10E-01	2,96E+01	9,00E-06	3,13E-04	3,22E-04	1,66E-05	1,66E-05	5,30E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,23E+01	5,16E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,09E+01	-1,02E+01	-8,43E+00	8,40E-01	6,59	1,02E+00	7,79
9	4,28E-04	4,19E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,86E-02	1,03E+03	9,10E-01	2,96E+01	3,94E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,03E+01	9,00E-06	3,22E-04	3,31E-04	1,76E-05	1,76E-05	5,45E-02	1,04E+03	9,23E-01	4,36E+01	5,30E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,23E+01	-1,01E+01	-8,28E+00	8,49E-01	7,44	1,04E+00	8,81
10	4,19E-04	4,10E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,94E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,03E+01	4,02E-02	1,03E+03	9,12E-01	3,10E+01	9,00E-06	3,31E-04	3,40E-04	1,85E-05	1,85E-05	5,60E-02	1,04E+03	9,24E-01	4,50E+01	5,45E-02	1,04E+03	9,23E-01	4,36E+01	-1,00E+01	-8,11E+00	8,59E-01	8,30	1,06E+00	9,85

Tabla 14. Corrientes, propiedades y secciones para T=25°C

9.1.3 T=45 °C

Balance de m	q <sub>a</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>f</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>s</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>sf</sub> [m <sup>3</sup> /s]	S <sub>fini</sub> [m <sup>3</sup> /s]	rho <sub>fini</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	phi <sub>fini</sub>	pi <sub>fini</sub> [bar]	S <sub>fout</sub> [m <sup>3</sup> /s]	rho <sub>fout</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	phi <sub>fout</sub>	pi <sub>fout</sub> [bar]	q <sub>w</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>dini</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>dout</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>sdini</sub> [m <sup>3</sup> /s]	q <sub>sdout</sub> [m <sup>3</sup> /s]	S <sub>dini</sub> [m <sup>3</sup> /s]	rho <sub>dini</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	phi <sub>dini</sub>	pi <sub>dini</sub> [bar]	S <sub>dout</sub> [m <sup>3</sup> /s]	rho <sub>dout</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	phi <sub>dout</sub>	pi <sub>dout</sub> [bar]	NDP <sub>ini</sub> [bar]	NDP <sub>out</sub> [bar]	Δx <sub>ini</sub> (m)	Xi <sub>ini</sub> (m)	Δx <sub>out</sub> (m)	Xi <sub>out</sub> (m)
1	5,00E-04	4,91E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,30E-02	1,01E+03	9,09E-01	2,65E+01	3,36E-02	1,02E+03	9,10E-01	2,70E+01	9,00E-06	2,50E-04	2,59E-04	1,07E-05	1,07E-05	4,27E-02	1,02E+03	9,15E-01	3,51E+01	4,12E-02	1,02E+03	9,14E-01	3,38E+01	-1,11E+01	-9,41E+00	7,77E-01	0,7768	9,15E-01	0,9150
2	4,91E-04	4,82E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,36E-02	1,02E+03	9,10E-01	2,70E+01	3,42E-02	1,02E+03	9,10E-01	2,76E+01	9,00E-06	2,59E-04	2,68E-04	1,14E-05	1,14E-05	4,41E-02	1,02E+03	9,16E-01	3,65E+01	4,27E-02	1,02E+03	9,15E-01	3,51E+01	-1,11E+01	-9,41E+00	7,74E-01	1,5512	9,15E-01	1,8299
3	4,82E-04	4,73E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,42E-02	1,02E+03	9,10E-01	2,76E+01	3,49E-02	1,02E+03	9,10E-01	2,82E+01	9,00E-06	2,68E-04	2,77E-04	1,22E-05	1,22E-05	4,56E-02	1,02E+03	9,17E-01	3,78E+01	4,41E-02	1,02E+03	9,16E-01	3,65E+01	-1,11E+01	-9,40E+00	7,77E-01	2,3236	9,15E-01	2,7446
4	4,73E-04	4,64E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,49E-02	1,02E+03	9,10E-01	2,82E+01	3,56E-02	1,02E+03	9,11E-01	2,88E+01	9,00E-06	2,77E-04	2,86E-04	1,30E-05	1,30E-05	4,71E-02	1,03E+03	9,19E-01	3,92E+01	4,56E-02	1,02E+03	9,17E-01	3,78E+01	-1,12E+01	-9,38E+00	7,71E-01	3,0950	9,17E-01	3,6600
5	4,64E-04	4,55E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,56E-02	1,02E+03	9,11E-01	2,88E+01	3,63E-02	1,02E+03	9,11E-01	2,94E+01	9,00E-06	2,86E-04	2,95E-04	1,3															

## Resultados obtenidos en función de la variabilidad de la permeabilidad

### 9.1.4 Lw=0,245 L / (m2\*h\*bar)

Balance de m	q_fini (m3/s)	q_fout (m3/s)	q_sfini (m3/s)	q_sfout (m3/s)	S_fini (m3/s)	rho_fini (kg/m3)	phi_fini	tau_fini (bar)	S_fout (m3/s)	rho_fout (kg/m3)	phi_fout	tau_fout (bar)	q_wti (m3/s)	q_dini (m3/s)	q_dout (m3/s)	q_sdni (m3/s)	q_sdout (m3/s)	S_dini (m3/s)	rho_dini (kg/m3)	phi_dini	tau_dini (bar)	S_douti (m3/s)	rho_douti (kg/m3)	phi_douti	tau_douti (bar)	NDP_ini (bar)	NDP_out (bar)	lx_ini (m)	xi_ini (m)	lx_out (m)	xi_out (m)
1	5,00E-04	4,91E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,30E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,41E+01	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	9,00E-06	2,50E-04	2,59E-04	1,07E-05	1,07E-05	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	4,12E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,07E+01	-1,03E+01	-8,80E+00	8,36E-01	0,84	9,78E-01	0,98
2	4,91E-04	4,82E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	9,00E-06	2,59E-04	2,68E-04	1,14E-05	1,14E-05	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	-1,03E+01	-8,73E+00	8,39E-01	1,68	9,86E-01	1,96
3	4,82E-04	4,73E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	9,00E-06	2,68E-04	2,77E-04	1,22E-05	1,22E-05	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	-1,02E+01	-8,64E+00	8,43E-01	2,52	9,96E-01	2,94
4	4,73E-04	4,64E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	9,00E-06	2,77E-04	2,86E-04	1,30E-05	1,30E-05	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	-1,01E+01	-8,55E+00	8,48E-01	3,37	1,01E+01	3,94
5	4,64E-04	4,55E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	9,00E-06	2,86E-04	2,95E-04	1,39E-05	1,39E-05	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	-1,01E+01	-8,45E+00	8,54E-01	4,22	1,02E+01	4,95
6	4,55E-04	4,46E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	9,00E-06	2,95E-04	3,04E-04	1,48E-05	1,48E-05	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,82E+01	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	-9,99E+00	-8,33E+00	8,62E-01	5,08	1,03E+01	5,96
7	4,46E-04	4,37E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	9,00E-06	3,04E-04	3,13E-04	1,57E-05	1,57E-05	5,16E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,95E+01	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,82E+01	-9,89E+00	-8,19E+00	8,70E-01	5,95	1,05E+01	7,00
8	4,37E-04	4,28E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	9,00E-06	3,13E-04	3,22E-04	1,66E-05	1,66E-05	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,08E+01	5,16E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,95E+01	-9,78E+00	-8,04E+00	8,80E-01	6,83	1,07E+01	8,05
9	4,28E-04	4,19E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	9,00E-06	3,22E-04	3,31E-04	1,76E-05	1,76E-05	5,45E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,21E+01	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,08E+01	-9,65E+00	-7,87E+00	8,92E-01	7,73	1,09E+01	9,12
10	4,19E-04	4,10E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	4,02E-02	1,03E+03	9,09E-01	3,00E+01	9,00E-06	3,31E-04	3,40E-04	1,85E-05	1,85E-05	5,60E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,35E+01	5,45E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,21E+01	-9,50E+00	-7,67E+00	9,06E-01	8,63	1,12E+01	10,22

Tabla 16. Corrientes, propiedades y secciones para Lw= 0,245 L/(m2\*h\*bar)

### 9.1.5 Lw= 0,75 L / (m2\*h\*bar)

Balance de m	q_fini (m3/s)	q_fout (m3/s)	q_sfini (m3/s)	q_sfout (m3/s)	S_fini (m3/s)	rho_fini (kg/m3)	phi_fini	tau_fini (bar)	S_fout (m3/s)	rho_fout (kg/m3)	phi_fout	tau_fout (bar)	q_wti (m3/s)	q_dini (m3/s)	q_dout (m3/s)	q_sdni (m3/s)	q_sdout (m3/s)	S_dini (m3/s)	rho_dini (kg/m3)	phi_dini	tau_dini (bar)	S_douti (m3/s)	rho_douti (kg/m3)	phi_douti	tau_douti (bar)	NDP_ini (bar)	NDP_out (bar)	lx_ini (m)	xi_ini (m)	lx_out (m)	xi_out (m)
1	5,00E-04	4,91E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,30E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,41E+01	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	9,00E-06	2,50E-04	2,59E-04	1,07E-05	1,07E-05	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	4,12E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,07E+01	-1,03E+01	-8,80E+00	2,74E-01	0,27	3,21E-01	0,32
2	4,91E-04	4,82E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	9,00E-06	2,59E-04	2,68E-04	1,14E-05	1,14E-05	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	-1,03E+01	-8,73E+00	2,75E-01	0,55	3,24E-01	0,64
3	4,82E-04	4,73E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	9,00E-06	2,68E-04	2,77E-04	1,22E-05	1,22E-05	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	-1,02E+01	-8,64E+00	2,77E-01	0,83	3,27E-01	0,97
4	4,73E-04	4,64E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	9,00E-06	2,77E-04	2,86E-04	1,30E-05	1,30E-05	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	-1,01E+01	-8,55E+00	2,78E-01	1,10	3,30E-01	1,29
5	4,64E-04	4,55E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	9,00E-06	2,86E-04	2,95E-04	1,39E-05	1,39E-05	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	-1,01E+01	-8,45E+00	2,80E-01	1,38	3,34E-01	1,62
6	4,55E-04	4,46E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	9,00E-06	2,95E-04	3,04E-04	1,48E-05	1,48E-05	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,82E+01	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	-9,99E+00	-8,33E+00	2,83E-01	1,67	3,39E-01	1,96
7	4,46E-04	4,37E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	9,00E-06	3,04E-04	3,13E-04	1,57E-05	1,57E-05	5,16E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,95E+01	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,82E+01	-9,89E+00	-8,19E+00	2,85E-01	1,95	3,45E-01	2,30
8	4,37E-04	4,28E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	9,00E-06	3,13E-04	3,22E-04	1,66E-05	1,66E-05	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,08E+01	5,16E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,95E+01	-9,78E+00	-8,04E+00	2,89E-01	2,24	3,51E-01	2,64
9	4,28E-04	4,19E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	9,00E-06	3,22E-04	3,31E-04	1,76E-05	1,76E-05	5,45E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,21E+01	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,08E+01	-9,65E+00	-7,87E+00	2,93E-01	2,53	3,59E-01	2,99
10	4,19E-04	4,10E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	4,02E-02	1,03E+03	9,09E-01	3,00E+01	9,00E-06	3,31E-04	3,40E-04	1,85E-05	1,85E-05	5,60E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,35E+01	5,45E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,21E+01	-9,50E+00	-7,67E+00	2,97E-01	2,83	3,68E-01	3,35

Tabla 17. Corrientes, propiedades y secciones para Lw=0,75 L/(m2\*h\*bar)

### 9.1.6 Lw=1,5 L / (m2\*h\*bar)

Balance de m	q_fini (m3/s)	q_fout (m3/s)	q_sfini (m3/s)	q_sfout (m3/s)	S_fini (m3/s)	rho_fini (kg/m3)	phi_fini	tau_fini (bar)	S_fout (m3/s)	rho_fout (kg/m3)	phi_fout	tau_fout (bar)	q_wti (m3/s)	q_dini (m3/s)	q_dout (m3/s)	q_sdni (m3/s)	q_sdout (m3/s)	S_dini (m3/s)	rho_dini (kg/m3)	phi_dini	tau_dini (bar)	S_douti (m3/s)	rho_douti (kg/m3)	phi_douti	tau_douti (bar)	NDP_ini (bar)	NDP_out (bar)	lx_ini (m)	xi_ini (m)	lx_out (m)	xi_out (m)
1	5,00E-04	4,91E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,30E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,41E+01	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	9,00E-06	2,50E-04	2,59E-04	1,07E-05	1,07E-05	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	4,12E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,07E+01	-1,03E+01	-8,80E+00	1,37E-01	0,1371	1,60E-01	0,1895
2	4,91E-04	4,82E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	9,00E-06	2,59E-04	2,68E-04	1,14E-05	1,14E-05	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	-1,03E+01	-8,73E+00	1,38E-01	0,2747	1,62E-01	0,3209
3	4,82E-04	4,73E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	9,00E-06	2,68E-04	2,77E-04	1,22E-05	1,22E-05	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	-1,02E+01	-8,64E+00	1,38E-01	0,4130	1,63E-01	0,4827
4	4,73E-04	4,64E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	9,00E-06	2,77E-04	2,86E-04	1,30E-05	1,30E-05	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	-1,01E+01	-8,55E+00	1,39E-01	0,5522	1,65E-01	0,6460
5	4,64E-04	4,55E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	9,00E-06	2,86E-04	2,95E-04	1,39E-05	1,39E-05	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	-1,01E+01	-8,45E+00	1,40E-01	0,6923	1,67E-01	0,8111
6	4,55E-04	4,46E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	9,00E-06	2,95E-04	3,04E-04	1,48E-05	1,48E-05	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,82E+01	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	-9,99E+00	-8,33E+00	1,41E-01	0,8336	1,70E-01	0,9783
7	4,46E-04	4,37E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01</																								

Resultados obtenidos en función de la variación de la salinidad

9.1.7 Sf=0,033/ Sd=0,035 kg/kg

Balance de m	q_fini [m³/s]	q_fout [m³/s]	q_sfini [m³/s]	q_sfout [m³/s]	S_fini [m³/s]	rho_fini [kg/m³]	phi_fini	pi_fini [bar]	S_fout [m³/s]	rho_fout [kg/m³]	phi_fout	pi_fout [bar]	q_wti [m³/s]	q_dini [m³/s]	q_douti [m³/s]	q_s dini [m³/s]	q_s douti [m³/s]	S_dini [m³/s]	rho_dini [kg/m³]	phi_dini	pi_dini [bar]	S_douti [m³/s]	rho_douti [kg/m³]	phi_dout	pi_dout [bar]	NDP_ini [bar]	NDP_out [bar]	dx_ini (m)	xi_ini (m)	dx_out (m)	xi_out (m)
1	5,00E-04	4,91E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,30E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,41E+01	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	9,00E-06	2,50E-04	2,59E-04	1,24E-05	1,24E-05	4,95E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,77E+01	4,78E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,63E+01	-1,61E+01	-1,43E+01	5,37E-01	0,54	6,03E-01	0,60
2	4,91E-04	4,82E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	9,00E-06	2,59E-04	2,68E-04	1,33E-05	1,33E-05	5,12E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,92E+01	4,95E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,77E+01	-1,63E+01	-1,45E+01	5,30E-01	1,07	5,95E-01	1,21
3	4,82E-04	4,73E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	9,00E-06	2,68E-04	2,77E-04	1,42E-05	1,42E-05	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,07E+01	5,12E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,92E+01	-1,65E+01	-1,47E+01	5,23E-01	1,58	5,88E-01	1,80
4	4,73E-04	4,64E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	9,00E-06	2,77E-04	2,86E-04	1,51E-05	1,51E-05	5,47E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,23E+01	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,07E+01	-1,67E+01	-1,49E+01	5,17E-01	2,11	5,81E-01	2,39
5	4,64E-04	4,55E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	9,00E-06	2,86E-04	2,95E-04	1,61E-05	1,61E-05	5,64E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,38E+01	5,47E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,23E+01	-1,69E+01	-1,50E+01	5,10E-01	2,62	5,75E-01	2,97
6	4,55E-04	4,46E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	9,00E-06	2,95E-04	3,04E-04	1,71E-05	1,71E-05	5,81E-02	1,04E+03	9,23E-01	4,54E+01	5,64E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,38E+01	-1,71E+01	-1,52E+01	5,05E-01	3,12	5,69E-01	3,54
7	4,46E-04	4,37E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	9,00E-06	3,04E-04	3,13E-04	1,82E-05	1,82E-05	5,98E-02	1,05E+03	9,25E-01	4,69E+01	5,81E-02	1,04E+03	9,23E-01	4,54E+01	-1,73E+01	-1,53E+01	4,96E-01	3,62	5,64E-01	4,11
8	4,37E-04	4,28E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	9,00E-06	3,13E-04	3,22E-04	1,93E-05	1,93E-05	6,16E-02	1,05E+03	9,26E-01	4,85E+01	5,98E-02	1,05E+03	9,25E-01	4,69E+01	-1,75E+01	-1,55E+01	4,94E-01	4,12	5,59E-01	4,68
9	4,28E-04	4,19E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	9,00E-06	3,22E-04	3,31E-04	2,04E-05	2,04E-05	6,33E-02	1,05E+03	9,28E-01	5,01E+01	6,16E-02	1,05E+03	9,26E-01	4,85E+01	-1,77E+01	-1,56E+01	4,90E-01	4,60	5,55E-01	5,24
10	4,19E-04	4,10E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	4,02E-02	1,03E+03	9,09E-01	3,00E+01	9,00E-06	3,31E-04	3,40E-04	2,15E-05	2,15E-05	6,50E-02	1,05E+03	9,30E-01	5,18E+01	6,33E-02	1,05E+03	9,28E-01	5,01E+01	-1,78E+01	-1,57E+01	4,85E-01	5,09	5,51E-01	5,79

Tabla 19. Corrientes, propiedades y secciones para Sf=0,033 kg/kg // Sd= 0,035 kg/kg

9.1.8 Sf=0,033/ Sd=0,065 kg/kg

Balance de m	q_fini [m³/s]	q_fout [m³/s]	q_sfini [m³/s]	q_sfout [m³/s]	S_fini [m³/s]	rho_fini [kg/m³]	phi_fini	pi_fini [bar]	S_fout [m³/s]	rho_fout [kg/m³]	phi_fout	pi_fout [bar]	q_wti [m³/s]	q_dini [m³/s]	q_douti [m³/s]	q_s dini [m³/s]	q_s douti [m³/s]	S_dini [m³/s]	rho_dini [kg/m³]	phi_dini	pi_dini [bar]	S_douti [m³/s]	rho_douti [kg/m³]	phi_dout	pi_dout [bar]	NDP_ini [bar]	NDP_out [bar]	dx_ini (m)	xi_ini (m)	dx_out (m)	xi_out (m)
1	5,00E-04	4,91E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,30E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,41E+01	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	9,00E-06	2,50E-04	2,59E-04	1,24E-05	1,24E-05	4,95E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,77E+01	4,78E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,63E+01	-1,61E+01	-1,43E+01	5,37E-01	0,54	6,03E-01	0,60
2	4,91E-04	4,82E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	9,00E-06	2,59E-04	2,68E-04	1,33E-05	1,33E-05	5,12E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,92E+01	4,95E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,77E+01	-1,63E+01	-1,45E+01	5,30E-01	1,07	5,95E-01	1,21
3	4,82E-04	4,73E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	9,00E-06	2,68E-04	2,77E-04	1,42E-05	1,42E-05	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,07E+01	5,12E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,92E+01	-1,65E+01	-1,47E+01	5,23E-01	1,58	5,88E-01	1,80
4	4,73E-04	4,64E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	9,00E-06	2,77E-04	2,86E-04	1,51E-05	1,51E-05	5,47E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,23E+01	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,07E+01	-1,67E+01	-1,49E+01	5,17E-01	2,11	5,81E-01	2,39
5	4,64E-04	4,55E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	9,00E-06	2,86E-04	2,95E-04	1,61E-05	1,61E-05	5,64E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,38E+01	5,47E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,23E+01	-1,69E+01	-1,50E+01	5,10E-01	2,62	5,75E-01	2,97
6	4,55E-04	4,46E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	9,00E-06	2,95E-04	3,04E-04	1,71E-05	1,71E-05	5,81E-02	1,04E+03	9,23E-01	4,54E+01	5,64E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,38E+01	-1,71E+01	-1,52E+01	5,05E-01	3,12	5,69E-01	3,54
7	4,46E-04	4,37E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	9,00E-06	3,04E-04	3,13E-04	1,82E-05	1,82E-05	5,98E-02	1,05E+03	9,25E-01	4,69E+01	5,81E-02	1,04E+03	9,23E-01	4,54E+01	-1,73E+01	-1,53E+01	4,96E-01	3,62	5,64E-01	4,11
8	4,37E-04	4,28E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	9,00E-06	3,13E-04	3,22E-04	1,93E-05	1,93E-05	6,16E-02	1,05E+03	9,26E-01	4,85E+01	5,98E-02	1,05E+03	9,25E-01	4,69E+01	-1,75E+01	-1,55E+01	4,94E-01	4,12	5,59E-01	4,68
9	4,28E-04	4,19E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	9,00E-06	3,22E-04	3,31E-04	2,04E-05	2,04E-05	6,33E-02	1,05E+03	9,28E-01	5,01E+01	6,16E-02	1,05E+03	9,26E-01	4,85E+01	-1,77E+01	-1,56E+01	4,90E-01	4,60	5,55E-01	5,24
10	4,19E-04	4,10E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	4,02E-02	1,03E+03	9,09E-01	3,00E+01	9,00E-06	3,31E-04	3,40E-04	2,15E-05	2,15E-05	6,50E-02	1,05E+03	9,30E-01	5,18E+01	6,33E-02	1,05E+03	9,28E-01	5,01E+01	-1,78E+01	-1,57E+01	4,85E-01	5,09	5,51E-01	5,79

Tabla 20. Corrientes, propiedades y secciones para Sf=0,033 kg/kg // Sd= 0,055 kg/kg

9.1.9 Sf=0,033/ Sd=0,085 kg/kg

Balance de m	q_fini [m³/s]	q_fout [m³/s]	q_sfini [m³/s]	q_sfout [m³/s]	S_fini [m³/s]	rho_fini [kg/m³]	phi_fini	pi_fini [bar]	S_fout [m³/s]	rho_fout [kg/m³]	phi_fout	pi_fout [bar]	q_wti [m³/s]	q_dini [m³/s]	q_douti [m³/s]	q_s dini [m³/s]	q_s douti [m³/s]	S_dini [m³/s]	rho_dini [kg/m³]	phi_dini	pi_dini [bar]	S_douti [m³/s]	rho_douti [kg/m³]	phi_dout	pi_dout [bar]	NDP_ini [bar]	NDP_out [bar]	dx_ini (m)	xi_ini (m)	dx_out (m)	xi_out (m)
1	5,00E-04	4,91E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,30E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,41E+01	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	9,00E-06	2,50E-04	2,59E-04	1,24E-05	1,24E-05	4,95E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,77E+01	4,78E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,63E+01	-1,61E+01	-1,43E+01	5,37E-01	0,2894	6,03E-01	0,3146
2	4,91E-04	4,82E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	9,00E-06	2,59E-04	2,68E-04	1,33E-05	1,33E-05	5,12E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,92E+01	4,95E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,77E+01	-1,63E+01	-1,45E+01	5,30E-01	0,7006	6,05E-01	0,6293
3	4,82E-04	4,73E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	9,00E-06	2,68E-04	2,77E-04	1,42E-05	1,42E-05	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,07E+01	5,12E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,92E+01	-1,65E+01	-1,47E+01	5,23E-01	0,8438	6,09E-01	0,9347
4	4,73E-04	4,64E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	9,00E-06	2,77E-04	2,86E-04	1,51E-05	1,51E-05	5,47E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,23E+01	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,07E+01	-1,67E+01	-1,49E+01	5,17E-01	1,1096	6,15E-01	1,2313
5	4,64E-04	4,55E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	9,00E-06	2,86E-04	2,95E-04	1,61E-05	1,61E-05	5,64E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,38E+01	5,47E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,23E+01	-1,69E+01	-1,50E+01	5,10E-01	1,3681	6,20E-01	1,5198
6	4,55E-04	4,46E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	9,00E-06	2,95E-04	3,04E-04	1,71E-05	1,71E-05	5,81E-02	1,04E+03	9,23E-01	4,54E+01	5,64E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,38E+01	-1,71E+01	-1,52E+01	5,05E-01	1,6196	6,25E-01	1,8002
7	4,46E-04	4,37E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,70E-02	1,03E+03																									

Resultados obtenidos con la variación del caudal de alimentación

9.1.10 Qf= 30 LPM

Balance de m	q <sub>ini</sub> (m³/s)	q <sub>fout</sub> (m³/s)	q <sub>sini</sub> (m³/s)	q <sub>sfout</sub> (m³/s)	S <sub>ini</sub> (m³/s)	rho <sub>ini</sub> (kg/m³)	phi <sub>ini</sub>	pi <sub>ini</sub> (bar)	S <sub>fout</sub> (m³/s)	rho <sub>fout</sub> (kg/m³)	phi <sub>fout</sub>	pi <sub>fout</sub> (bar)	q <sub>wi</sub> (m³/s)	q <sub>dini</sub> (m³/s)	q <sub>dout</sub> (m³/s)	q <sub>sdini</sub> (m³/s)	q <sub>sdout</sub> (m³/s)	S <sub>dini</sub> (m³/s)	rho <sub>dini</sub> (kg/m³)	phi <sub>dini</sub>	pi <sub>dini</sub> (bar)	S <sub>dout</sub> (m³/s)	rho <sub>dout</sub> (kg/m³)	phi <sub>dout</sub>	pi <sub>dout</sub> (bar)	NDP <sub>ini</sub> (bar)	NDP <sub>out</sub> (bar)	Δx <sub>ini</sub> (m)	Xi <sub>ini</sub> (m)	Δx <sub>out</sub> (m)	Xi <sub>out</sub> (m)
1	5,00E-04	4,91E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,30E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,41E+01	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	9,00E-06	2,50E-04	2,59E-04	1,07E-05	1,07E-05	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	4,12E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,07E+01	-1,03E+01	-8,80E+00	8,39E-01	0,84	9,82E-01	0,98
2	4,91E-04	4,82E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	9,00E-06	2,59E-04	2,68E-04	1,14E-05	1,14E-05	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	-1,03E+01	-8,73E+00	8,43E-01	1,68	9,90E-01	1,96
3	4,82E-04	4,73E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	9,00E-06	2,68E-04	2,77E-04	1,22E-05	1,22E-05	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	-1,02E+01	-8,64E+00	8,47E-01	2,53	1,00E+00	2,96
4	4,73E-04	4,64E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	9,00E-06	2,77E-04	2,86E-04	1,30E-05	1,30E-05	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	-1,01E+01	-8,55E+00	8,52E-01	3,38	1,01E+00	3,96
5	4,64E-04	4,55E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	9,00E-06	2,86E-04	2,95E-04	1,39E-05	1,39E-05	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	-1,01E+01	-8,45E+00	8,58E-01	4,24	1,02E+00	4,97
6	4,55E-04	4,46E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	9,00E-06	2,95E-04	3,04E-04	1,48E-05	1,48E-05	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,82E+01	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	-9,99E+00	-8,33E+00	8,65E-01	5,10	1,04E+00	5,99
7	4,46E-04	4,37E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	9,00E-06	3,04E-04	3,13E-04	1,57E-05	1,57E-05	5,16E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,95E+01	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,82E+01	-9,88E+00	-8,19E+00	8,74E-01	5,98	1,06E+00	7,03
8	4,37E-04	4,28E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	9,00E-06	3,13E-04	3,22E-04	1,66E-05	1,66E-05	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,08E+01	5,16E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,95E+01	-9,78E+00	-8,04E+00	8,84E-01	6,88	1,08E+00	8,08
9	4,28E-04	4,19E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	9,00E-06	3,22E-04	3,31E-04	1,76E-05	1,76E-05	5,45E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,21E+01	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,08E+01	-9,65E+00	-7,87E+00	8,96E-01	7,76	1,10E+00	9,16
10	4,19E-04	4,10E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	4,02E-02	1,03E+03	9,09E-01	3,00E+01	9,00E-06	3,31E-04	3,40E-04	1,85E-05	1,85E-05	5,60E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,35E+01	5,45E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,21E+01	-9,50E+00	-7,67E+00	9,10E-01	8,67	1,13E+00	10,26

Tabla 22. Corrientes, propiedades y secciones para qf=30 LPM

9.1.11 Qf= 35 LPM

Balance de m	q <sub>ini</sub> (m³/s)	q <sub>fout</sub> (m³/s)	q <sub>sini</sub> (m³/s)	q <sub>sfout</sub> (m³/s)	S <sub>ini</sub> (m³/s)	rho <sub>ini</sub> (kg/m³)	phi <sub>ini</sub>	pi <sub>ini</sub> (bar)	S <sub>fout</sub> (m³/s)	rho <sub>fout</sub> (kg/m³)	phi <sub>fout</sub>	pi <sub>fout</sub> (bar)	q <sub>wi</sub> (m³/s)	q <sub>dini</sub> (m³/s)	q <sub>dout</sub> (m³/s)	q <sub>sdini</sub> (m³/s)	q <sub>sdout</sub> (m³/s)	S <sub>dini</sub> (m³/s)	rho <sub>dini</sub> (kg/m³)	phi <sub>dini</sub>	pi <sub>dini</sub> (bar)	S <sub>dout</sub> (m³/s)	rho <sub>dout</sub> (kg/m³)	phi <sub>dout</sub>	pi <sub>dout</sub> (bar)	NDP <sub>ini</sub> (bar)	NDP <sub>out</sub> (bar)	Δx <sub>ini</sub> (m)	Xi <sub>ini</sub> (m)	Δx <sub>out</sub> (m)	Xi <sub>out</sub> (m)
1	5,83E-04	5,74E-04	1,93E-05	1,93E-05	3,30E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,41E+01	3,35E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	9,00E-06	2,50E-04	2,59E-04	1,07E-05	1,07E-05	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	4,12E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,07E+01	-1,03E+01	-8,87E+00	8,39E-01	0,84	9,75E-01	0,97
2	5,74E-04	5,65E-04	1,93E-05	1,93E-05	3,35E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	3,41E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,50E+01	9,00E-06	2,59E-04	2,68E-04	1,14E-05	1,14E-05	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	-1,03E+01	-8,87E+00	8,37E-01	1,68	9,74E-01	1,95
3	5,65E-04	5,56E-04	1,93E-05	1,93E-05	3,41E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,50E+01	3,46E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,54E+01	9,00E-06	2,68E-04	2,77E-04	1,22E-05	1,22E-05	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	-1,04E+01	-8,77E+00	8,35E-01	2,51	9,75E-01	2,92
4	5,56E-04	5,47E-04	1,93E-05	1,93E-05	3,46E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,54E+01	3,52E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,59E+01	9,00E-06	2,77E-04	2,86E-04	1,30E-05	1,30E-05	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	-1,04E+01	-8,66E+00	8,33E-01	3,34	9,75E-01	3,90
5	5,47E-04	5,38E-04	1,93E-05	1,93E-05	3,52E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,59E+01	3,58E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,63E+01	9,00E-06	2,86E-04	2,95E-04	1,39E-05	1,39E-05	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	-1,04E+01	-8,55E+00	8,32E-01	4,18	9,77E-01	4,87
6	5,38E-04	5,29E-04	1,93E-05	1,93E-05	3,58E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,63E+01	3,64E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,68E+01	9,00E-06	2,95E-04	3,04E-04	1,48E-05	1,48E-05	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,82E+01	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	-1,04E+01	-8,45E+00	8,32E-01	5,01	9,79E-01	5,85
7	5,29E-04	5,20E-04	1,93E-05	1,93E-05	3,64E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,68E+01	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	9,00E-06	3,04E-04	3,13E-04	1,57E-05	1,57E-05	5,16E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,95E+01	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,82E+01	-1,04E+01	-8,33E+00	8,31E-01	5,84	9,82E-01	6,83
8	5,20E-04	5,11E-04	1,93E-05	1,93E-05	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	3,76E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,78E+01	9,00E-06	3,13E-04	3,22E-04	1,66E-05	1,66E-05	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,08E+01	5,16E-02	1,04E+03	9,17E-01	3,95E+01	-1,04E+01	-8,17E+00	8,32E-01	6,67	9,86E-01	7,81
9	5,11E-04	5,02E-04	1,93E-05	1,93E-05	3,76E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,78E+01	3,83E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,84E+01	9,00E-06	3,22E-04	3,31E-04	1,76E-05	1,76E-05	5,45E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,21E+01	5,30E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,08E+01	-1,04E+01	-8,04E+00	8,32E-01	7,50	9,91E-01	8,80
10	5,02E-04	4,93E-04	1,93E-05	1,93E-05	3,83E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,84E+01	3,90E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,90E+01	9,00E-06	3,31E-04	3,40E-04	1,85E-05	1,85E-05	5,60E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,35E+01	5,45E-02	1,04E+03	9,20E-01	4,21E+01	-1,04E+01	-8,07E+00	8,34E-01	8,34	9,97E-01	9,79

Tabla 23. Corrientes, propiedades y secciones para qf=35 LPM

9.1.12 Qf= 40 LPM

Balance de m	q <sub>ini</sub> (m³/s)	q <sub>fout</sub> (m³/s)	q <sub>sini</sub> (m³/s)	q <sub>sfout</sub> (m³/s)	S <sub>ini</sub> (m³/s)	rho <sub>ini</sub> (kg/m³)	phi <sub>ini</sub>	pi <sub>ini</sub> (bar)	S <sub>fout</sub> (m³/s)	rho <sub>fout</sub> (kg/m³)	phi <sub>fout</sub>	pi <sub>fout</sub> (bar)	q <sub>wi</sub> (m³/s)	q <sub>dini</sub> (m³/s)	q <sub>dout</sub> (m³/s)	q <sub>sdini</sub> (m³/s)	q <sub>sdout</sub> (m³/s)	S <sub>dini</sub> (m³/s)	rho <sub>dini</sub> (kg/m³)	phi <sub>dini</sub>	pi <sub>dini</sub> (bar)	S <sub>dout</sub> (m³/s)	rho <sub>dout</sub> (kg/m³)	phi <sub>dout</sub>	pi <sub>dout</sub> (bar)	NDP <sub>ini</sub> (bar)	NDP <sub>out</sub> (bar)	Δx <sub>ini</sub> (m)	Xi <sub>ini</sub> (m)	Δx <sub>out</sub> (m)	Xi <sub>out</sub> (m)
1	6,67E-04	6,58E-04	2,20E-05	2,20E-05	3,30E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,41E+01	3,35E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,45E+01	9,00E-06	2,50E-04	2,59E-04	1,07E-05	1,07E-05	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	4,12E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,07E+01	-1,03E+01	-8,92E+00	8,39E-01	0,8392	9,69E-01	0,9691
2	6,58E-04	6,49E-04	2,20E-05	2,20E-05	3,35E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,45E+01	3,39E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,49E+01	9,00E-06	2,59E-04	2,68E-04	1,14E-05	1,14E-05	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	4,27E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,19E+01	-1,04E+01	-8,98E+00	8,33E-01	1,6720	9,63E-01	1,9382
3	6,49E-04	6,40E-04	2,20E-05	2,20E-05	3,39E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,49E+01	3,44E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,52E+01	9,00E-06	2,68E-04	2,77E-04	1,22E-05	1,22E-05	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	4,41E-02	1,03E+03	9,11E-01	3,32E+01	-1,05E+01	-9,03E+00	8,27E-01	2,4985	9,57E-01	2,9010
4	6,40E-04	6,31E-04	2,20E-05	2,20E-05	3,44E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,52E+01	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	9,00E-06	2,77E-04	2,86E-04	1,30E-05	1,30E-05	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	4,56E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,44E+01	-1,05E+01	-9,09E+00	8,20E-01	3,3189	9,51E-01	3,8577
5	6,31E-04	6,22E-04	2,20E-05	2,20E-05	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	3,54E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,60E+01	9,00E-06	2,86E-04	2,95E-04	1,39E-05	1,39E-05	4,86E-02	1,04E+03	9,15E-01	3,69E+01	4,71E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,57E+01	-1,06E+01	-9,15E+00	8,14E-01	4,1333	9,45E-01	4,8086
6	6,22E-04	6,13E-04	2,20E-05	2,20E-05	3,54E-02	1,03E+0																									

Resultados obtenidos con la variación del caudal de *draw solution*

9.1.13 Qd= 10 LPM

Balance de m	q_fini [m3/s]	q_fouti [m3/s]	q_sfini [m3/s]	q_sfouti [m3/s]	S_fini [m3/s]	rho_fini [kg/m3]	phi_fini	pi_fini [bar]	S_fouti [kg/kg]	rho_fouti [kg/m]	phi_fouti	pi_fouti [bar]	q_wti [m3/s]	q_dini [m3/s]	q_douti [m3/s]	q_s dini [m3/s]	q_s douti [m3/s]	S_dini [kg/kg]	rho_dini [kg/m]	phi_dini	pi_dini [bar]	S_douti [kg/kg]	rho_douti [kg/m]	phi_douti	pi_douti [bar]	NDP_ini [bar]	NDP_out [bar]	dx_ini (m)	xi_ini (m)	dx_out (m)	xi_out (m)
1	5,00E-04	4,91E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,30E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,41E+01	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	9,00E-06	1,67E-04	1,76E-04	6,39E-06	6,39E-06	3,83E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,84E+01	3,64E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,68E+01	-6,75E+00	-4,89E+00	1,28E+00	1,28	1,77E+00	1,77
2	4,91E-04	4,82E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	9,00E-06	1,76E-04	1,85E-04	7,08E-06	7,08E-06	4,03E-02	1,03E+03	9,09E-01	3,00E+01	3,83E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,84E+01	-7,07E+00	-5,18E+00	1,22E+00	2,50	1,67E+00	3,53
3	4,82E-04	4,73E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	9,00E-06	1,85E-04	1,94E-04	7,80E-06	7,80E-06	4,23E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,16E+01	4,03E-02	1,03E+03	9,09E-01	3,00E+01	-7,39E+00	-5,46E+00	1,17E+00	3,67	1,58E+00	5,20
4	4,73E-04	4,64E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	9,00E-06	1,94E-04	2,03E-04	8,56E-06	8,56E-06	4,42E-02	1,03E+03	9,12E-01	3,32E+01	4,23E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,16E+01	-7,71E+00	-5,74E+00	1,12E+00	4,79	1,51E+00	6,79
5	4,64E-04	4,55E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	9,00E-06	2,03E-04	2,12E-04	9,36E-06	9,36E-06	4,62E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,49E+01	4,42E-02	1,03E+03	9,12E-01	3,32E+01	-8,02E+00	-6,01E+00	1,08E+00	5,87	1,44E+00	8,29
6	4,55E-04	4,46E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	9,00E-06	2,12E-04	2,21E-04	1,02E-05	1,02E-05	4,81E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,66E+01	4,62E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,49E+01	-8,33E+00	-6,28E+00	1,04E+00	6,91	1,38E+00	9,73
7	4,46E-04	4,37E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	9,00E-06	2,21E-04	2,30E-04	1,11E-05	1,11E-05	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,83E+01	4,81E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,66E+01	-8,64E+00	-6,53E+00	1,00E+00	7,91	1,32E+00	11,11
8	4,37E-04	4,28E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	9,00E-06	2,30E-04	2,39E-04	1,20E-05	1,20E-05	5,21E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,00E+01	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,83E+01	-8,93E+00	-6,78E+00	9,67E-01	8,87	1,27E+00	12,43
9	4,28E-04	4,19E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	9,00E-06	2,39E-04	2,48E-04	1,29E-05	1,29E-05	5,40E-02	1,04E+03	9,19E-01	4,17E+01	5,21E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,00E+01	-9,22E+00	-7,02E+00	9,37E-01	9,81	1,23E+00	13,71
10	4,19E-04	4,10E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	4,02E-02	1,03E+03	9,09E-01	3,00E+01	9,00E-06	2,48E-04	2,57E-04	1,39E-05	1,39E-05	5,60E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,35E+01	5,40E-02	1,04E+03	9,19E-01	4,17E+01	-9,50E+00	-7,25E+00	9,10E-01	10,72	1,19E+00	14,94

Tabla 25. Corrientes, propiedades y secciones para qd= 10 LPM

9.1.14 Qd=15 LPM

q_fini [m3/s]	q_fouti [m3/s]	q_sfini [m3/s]	q_sfouti [m3/s]	S_fini [m3/s]	rho_fini [kg/m3]	phi_fini	pi_fini [bar]	S_fouti [kg/kg]	rho_fouti [kg/m]	phi_fouti	pi_fouti [bar]	q_wti [m3/s]	q_dini [m3/s]	q_douti [m3/s]	q_s dini [m3/s]	q_s douti [m3/s]	S_dini [kg/kg]	rho_dini [kg/m]	phi_dini	pi_dini [bar]	S_douti [kg/kg]	rho_douti [kg/m]	phi_douti	pi_douti [bar]	NDP_ini [bar]	NDP_out [bar]	dx_ini (m)	xi_ini (m)	dx_out (m)	xi_out (m)
5,00E-04	4,91E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,30E-02	1,02E+03	9,05E-01	2,41E+01	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	9,00E-06	1,67E-04	1,76E-04	6,39E-06	6,39E-06	3,83E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,84E+01	3,64E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,68E+01	-6,75E+00	-4,89E+00	1,28E+00	1,2804	1,77E+00	1,7670
4,91E-04	4,82E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,36E-02	1,03E+03	9,05E-01	2,46E+01	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	9,00E-06	1,76E-04	1,85E-04	7,08E-06	7,08E-06	4,03E-02	1,03E+03	9,09E-01	3,00E+01	3,83E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,84E+01	-7,07E+00	-5,18E+00	1,22E+00	2,5025	1,67E+00	3,5341
4,82E-04	4,73E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,42E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,51E+01	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	9,00E-06	1,85E-04	1,94E-04	7,80E-06	7,80E-06	4,23E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,16E+01	4,03E-02	1,03E+03	9,09E-01	3,00E+01	-7,39E+00	-5,46E+00	1,17E+00	3,6716	1,58E+00	5,2035
4,73E-04	4,64E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,49E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,56E+01	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	9,00E-06	1,94E-04	2,03E-04	8,56E-06	8,56E-06	4,42E-02	1,03E+03	9,12E-01	3,32E+01	4,23E-02	1,03E+03	9,10E-01	3,16E+01	-7,71E+00	-5,74E+00	1,12E+00	4,7925	1,51E+00	6,7865
4,64E-04	4,55E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,56E-02	1,03E+03	9,06E-01	2,62E+01	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	9,00E-06	2,03E-04	2,12E-04	9,36E-06	9,36E-06	4,62E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,49E+01	4,42E-02	1,03E+03	9,12E-01	3,32E+01	-8,02E+00	-6,01E+00	1,08E+00	5,8696	1,44E+00	8,2929
4,55E-04	4,46E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,63E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,67E+01	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	9,00E-06	2,12E-04	2,21E-04	1,02E-05	1,02E-05	4,81E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,66E+01	4,62E-02	1,03E+03	9,13E-01	3,49E+01	-8,33E+00	-6,28E+00	1,04E+00	6,9067	1,38E+00	9,7310
4,46E-04	4,37E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,70E-02	1,03E+03	9,07E-01	2,73E+01	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	9,00E-06	2,21E-04	2,30E-04	1,11E-05	1,11E-05	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,83E+01	4,81E-02	1,04E+03	9,14E-01	3,66E+01	-8,64E+00	-6,53E+00	1,00E+00	7,9074	1,32E+00	11,1082
4,37E-04	4,28E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,78E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,79E+01	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	9,00E-06	2,30E-04	2,39E-04	1,20E-05	1,20E-05	5,21E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,00E+01	5,01E-02	1,04E+03	9,16E-01	3,83E+01	-8,93E+00	-6,78E+00	9,67E-01	8,8747	1,27E+00	12,4311
4,28E-04	4,19E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,86E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,86E+01	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	9,00E-06	2,39E-04	2,48E-04	1,29E-05	1,29E-05	5,40E-02	1,04E+03	9,19E-01	4,17E+01	5,21E-02	1,04E+03	9,18E-01	4,00E+01	-9,22E+00	-7,02E+00	9,37E-01	9,8118	1,23E+00	13,7054
4,19E-04	4,10E-04	1,65E-05	1,65E-05	3,94E-02	1,03E+03	9,08E-01	2,92E+01	4,02E-02	1,03E+03	9,09E-01	3,00E+01	9,00E-06	2,48E-04	2,57E-04	1,39E-05	1,39E-05	5,60E-02	1,04E+03	9,21E-01	4,35E+01	5,40E-02	1,04E+03	9,19E-01	4,17E+01	-9,50E+00	-7,25E+00	9,10E-01	10,7214	1,19E+00	14,9366

Tabla 26. Corrientes, propiedades y secciones para qd=15 LPM