

Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Separación térmica en soluciones extractoras de ósmosis directa: Aplicación a desalación de agua de mar

Autor: Antonio Velasco Sánchez

Tutor: Lourdes García Rodríguez

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

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Separación térmica en soluciones extractoras de ósmosis directa: Aplicación a desalación de agua de mar

Autor:

Antonio Velasco Sánchez

Tutor:

Lourdes García Rodríguez

Abel Riaza Frutos (Abengoa Research)

Dpto. Termodinámica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2016

Proyecto Fin de Grado: Separación térmica en soluciones extractoras de ósmosis directa: Aplicación a desalación de agua de mar

Autor: Antonio Velasco Sánchez

Tutores: Dra. Lourdes García Rodríguez
Dr. Abel Rianza Frutos (Abengoa Research)

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Resumen

El trabajo tiene como objetivo una evaluación termodinámica de un conjunto de *draw solution*, que pueden ser candidatas a ser utilizadas en el proceso de desalación *Forward Osmosis*. Estas sustancias han sido desarrolladas por los científicos Jin-joo Kim, Hyo Kang, Yong-Seok Choi, Yun Ah. Yu, Jong-Chan Lee, pertenecientes a diferentes instituciones de renombre, y en su artículo “*Thermo-responsive oligomeric poly (tetrabutylphosphonium styrenesulfonate)*” se proponen a dichas sustancias como disoluciones prometedoras para el proceso de la *Forward Osmosis*. Este trabajo analiza de forma crítica y exhaustiva cada una de ellas, y de forma razonada intenta explicar cual es la mejor candidata, al mismo tiempo que trata de corroborar parte del estudio sobre el que se basa. Para ello se estudia el comportamiento de estas disoluciones en diferentes aguas de mar, con el objeto de recoger el mayor número de escenarios posibles dónde éstas tienen cabida. Por otro lado tomaremos como referencia otras tecnologías empleadas para la desalinización de aguas, de modo que nos permita comparar los resultados obtenidos con valores reales de las que podrían ser sus posibles competidoras, y poder crear así una opinión sobre la viabilidad y alcance de este proceso, FO, con estas sustancias.

Índice

Resumen	8
Índice	10
1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Recursos hídricos mundiales	3
1.2 Escasez de agua mundial	4
1.3 Desalación	4
1.3.1 ¿Qué es la desalación?	5
1.3.2 Métodos de desalación	5
1.4 FO	9
1.4.1 Descripción del proceso	10
1.5 Objetivo	10
1.6 Metodología	10
2 CARACTERÍSTICAS DE LA DRAW SOLUTION PARA FO	12
3 CARACTERIZACIÓN TERMODINÁMICA	21
3.1 Soluciones ideales	21
3.1.1 Coeficiente osmótico del disolvente	23
3.1.2 Coeficiente de actividad del soluto	24
3.2 Caracterización termodinámica draw solution. Coeficiente osmótico y coeficiente de actividad.	25
3.2.1 Cálculo de los coeficientes de osmótico del disolvente	
3.2.2 Cálculo de los coeficientes de actividades del soluto	35
3.3 Cálculo del límite termodinámico. $\Delta sepG$.	37
3.3.1 Trabajo mínimo de separación de la disolución SSP.	38
3.3.2 Trabajo mínimo de separación de la disolución PSSP11	41
4 ESTUDIO DE LA ESPONTANEIDAD DEL PROCESO FO	47
4.1 Balance de materia. Ecuaciones	48
4.2 Espontaneidad. Influencia de la salinidad	54
4.2.1 Espontaneidad. Influencia de la salinidad. SSP	54
4.2.2 Espontaneidad. Influencia de la salinidad. PSSP11	59
4.2.3 Influencia de la salinidad. Conclusiones	63
4.3 Espontaneidad. Influencia de la concentración.	64
4.3.1 Espontaneidad. Influencia de la concentración. SSP	64
4.3.2 Espontaneidad. Influencia de la concentración. PSSP11	67
4.3.3 Influencia de la concentración. Conclusiones	69
4.4 Espontaneidad. Acotación de valores	70
4.4.1 Acotación de valores. Conclusiones	77

5	CONSUMOS ENERGÉTICOS FO	79
5.1	<i>Límite termodinámico de un proceso de desalación</i>	80
5.2	<i>Límite termodinámico proceso desalación. Acotación</i>	82
5.2.1	Acotación límites termodinámicos FO. SSP	82
5.2.2	Acotación límites termodinámicos FO. PSSP11	89
5.2.3	Acotación. Conclusiones	94
5.3	<i>Consumo reales. FO</i>	95
5.3.1	Estimación preliminar de consumos reales. SSP	96
5.3.2	Rendimientos exergéticos de las estimaciones de los consumos reales. SSP	98
5.3.3	Consumos reales. PSSP11	99
5.3.4	Rendimientos exergéticos de los consumos reales. PSSP11	99
5.4	<i>Destilación convencional</i>	101
5.5	<i>Comparación de las estimaciones de los consumos reales de la FO y destilación convencional.</i>	102
5.6	<i>Conclusiones</i>	103
	Referencias	105

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Recursos hídricos mundiales

El agua en la Tierra la podemos encontrar naturalmente en varios estados y lugares: en la atmósfera, en la superficie, bajo tierra y en los océanos. A priori podemos pensar que es un recurso ilimitado, ya que casi tres cuartas partes de la superficie terrestre se encuentran cubiertas por los océanos. No obstante analizando éste, encontramos que el 97,5% tiene una salinidad superior al 3%, haciendo que no sirva para uso agrícola, industrial o humano, así que tan sólo el 2,5% del agua de la Tierra es agua dulce. Este pequeño porcentaje se localiza principalmente en los ríos, lagos, glaciares, mantos de hielo y acuíferos del planeta, de los cuales alrededor de 97% son inaccesibles para su uso, ya que se encuentran en la Antártica, el Ártico y Groenlandia. Todo ello hace que el agua sea un bien muy apreciado, y para nada inagotable. [1][2]

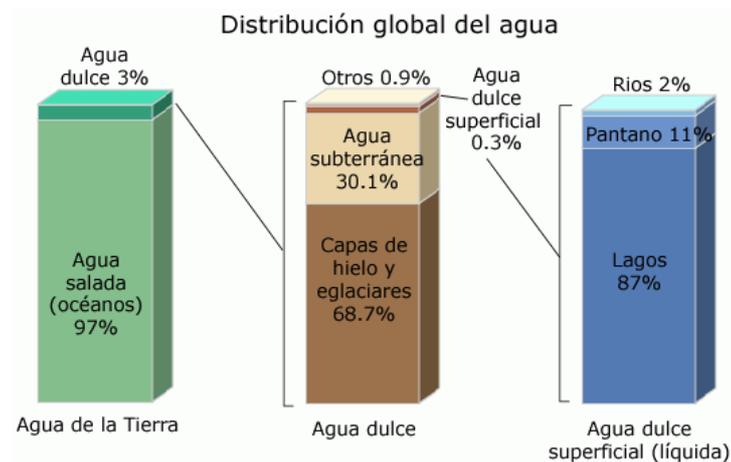


Figura 1-1. Distribución global del agua. [8]

1.2 Escasez de agua mundial

En pocas palabras, la escasez de agua tiene lugar cuando la demanda supera el suministro de agua dulce en un área determinada.

Escasez de agua = un exceso de demanda de agua para el suministro disponible

Esta situación aparece como consecuencia de una elevada demanda agregada por parte de todos los sectores que consumen agua respecto al suministro disponible, bajo las condiciones de infraestructuras y las disposiciones institucionales existentes. La escasez de agua se pone de manifiesto por la insatisfacción total o parcial de la demanda expresada, la competición económica por la calidad y la cantidad del agua, los conflictos entre usuarios, el agotamiento irreversible de las aguas subterráneas, y las consecuencias negativas para el medio ambiente.

Los tres aspectos principales que caracterizan la escasez de agua son: la falta física de agua disponible para satisfacer la demanda; el nivel de desarrollo de las infraestructuras que controlan el almacenamiento, distribución y acceso; y la capacidad institucional para aportar los servicios de agua necesarios [4]. Estos tres hechos han dado lugar a que actualmente 26 países del mundo sufran problemas de escasez (300 millones de personas), y la previsión para el año 2050 es que sean 66 países los afectados por esta escasez. Por lo tanto esta carencia de agua se ha convertido en un problema global debido al incremento de agua dulce como resultado del aumento de la población mundial, la contaminación de aguas, y el cambio climático.

Para todos los países, proporcionar un suministro de agua de calidad a la población se ha convertido en un aspecto clave, tanto desde un punto de vista económico como medioambiental. [1][6]

1.3 Desalación

En este contexto de escasez, la desalación se plantea como una solución eficaz para hacer frente al rápido crecimiento económico y demográfico, la escasez de agua y como forma de prevenir la sobreexplotación o la contaminación e intrusión salina de acuíferos. Como consecuencia de ello numerosos estudios se han centrado en este problema con el objeto de resolverlo.

El sistema físico de eliminación de las sales del se conoce desde la antigüedad, pero implicaba un consumo muy elevado de energía que lo hacía inviable económicamente. En fechas más recientes se han desarrollado nuevas tecnologías que permiten la obtención de agua dulce (contenido en sales inferior a 500 ppm) a partir de agua de mar (contenido en sales del orden de 35.000 ppm) a un coste aún elevado pero progresivamente decreciente, que puede ser asumido por ciertos usos. En la última década se ha conseguido rebajar el umbral de 60 céntimos de euro el m³. [6]

1.3.1 ¿Qué es la desalación?

La desalación es un proceso por el cual el agua de mar puede convertirse en un recurso hídrico perfectamente aprovechable tanto para el consumo humano, como para el riego y usos industriales. Para eso, se separan las sales que contiene el agua marina para llegar a los 0,5 gramos por litro del agua potable, aproximadamente [6].

Los recursos hídricos susceptibles de desalación pueden tener básicamente dos orígenes: agua de mar o agua subterránea salinizada; estas últimas pueden proceder de acuíferos costeros en contacto directo con el mar y de acuíferos aislados del mismo. [1]

1.3.2 Métodos de desalación

Los procesos de desalación pueden dividirse en:

- **Destilación térmica**

Encontramos dos métodos:

- *Destilación MSF* (Multi-stage Flash Distillation). El agua a desalar se calienta en un recipiente a baja presión lo que permite la evaporación súbita. Este proceso se repite a lo largo de una serie de etapas en las que la presión va disminuyendo según las distintas condiciones. Es el proceso de destilación más usado en el mundo, sobre todo en oriente Medio, y está especialmente indicado para aguas con alta salinidad, temperatura y contaminación. Tiene el inconveniente de tener el consumo específico de energía más elevado de todos los procesos. [9][11]

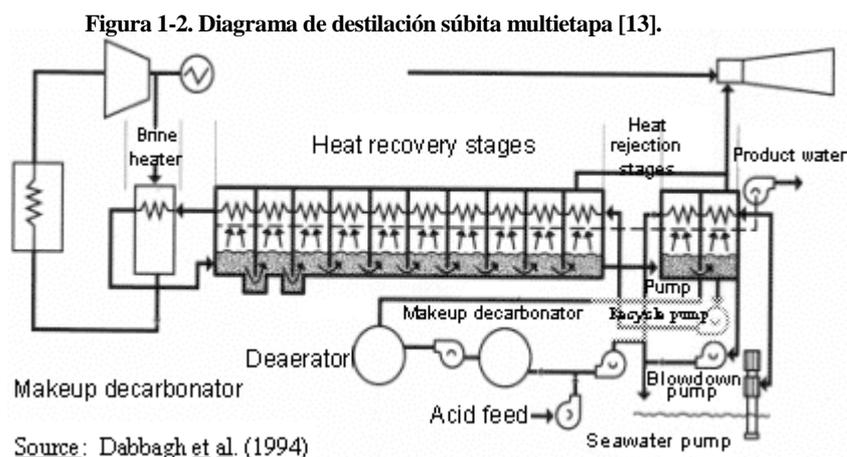


Figura 1-2. Diagrama de destilación súbita multietapa. [13]

- *Destilación MED* (Multi-effect Distillation) utiliza el mismo principio que el proceso MSF. La diferencia principal entre el proceso MED y el MSF radica en la forma en que se lleva a cabo la evaporación. En las plantas de MED se utilizan varios evaporadores del tipo de película delgada (la evaporación se produce de forma natural en una cara de los tubos de un intercambiador aprovechando el calor latente desprendido por la condensación del vapor en la otra cara del mismo), con los cuales se logran mejores coeficientes de transferencia de calor que los que se pueden obtener en las plantas de MSF donde se produce la evaporación súbita en forma directa. [9][10][12]

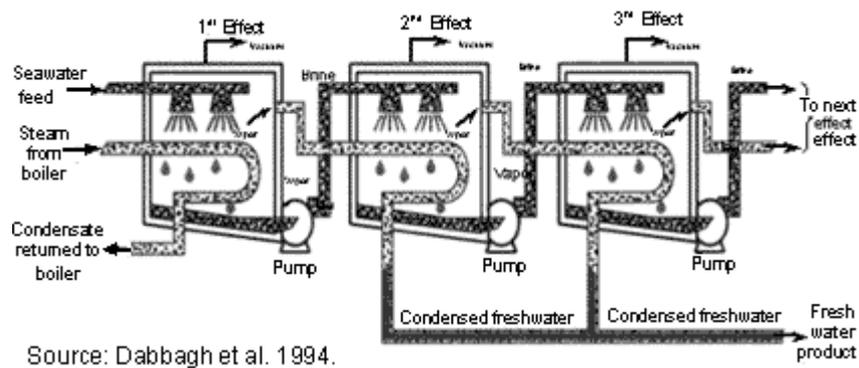


Figura 1-3. Diagrama de destilación por múltiple efecto. [14]

- **Por compresión de vapor**

La compresión térmica por compresión de vapor utiliza un compresor adiabático que consigue dos sectores de diferente presión, de tal manera que se genera un flujo de vapor desde el sector de mayor presión y temperatura de condensación hacia el inferior, lugar donde se produce la condensación. [1]

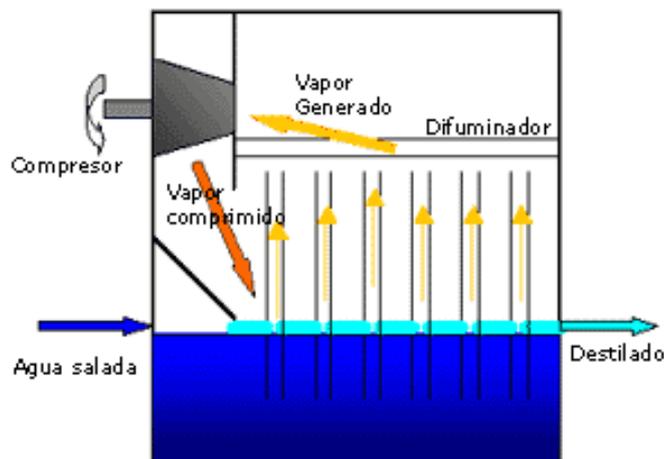


Figura 1-4. Diagrama de la compresión de vapor (CV) con evaporador de tubos verticales (VTE). [7]

- **Destilación solar**

La destilación solar es adecuada para pequeñas comunidades en regiones áridas o semiáridas. Tiene dos variantes según utilice la energía del sol directamente o por captura del sol por mediante células solares. [1]

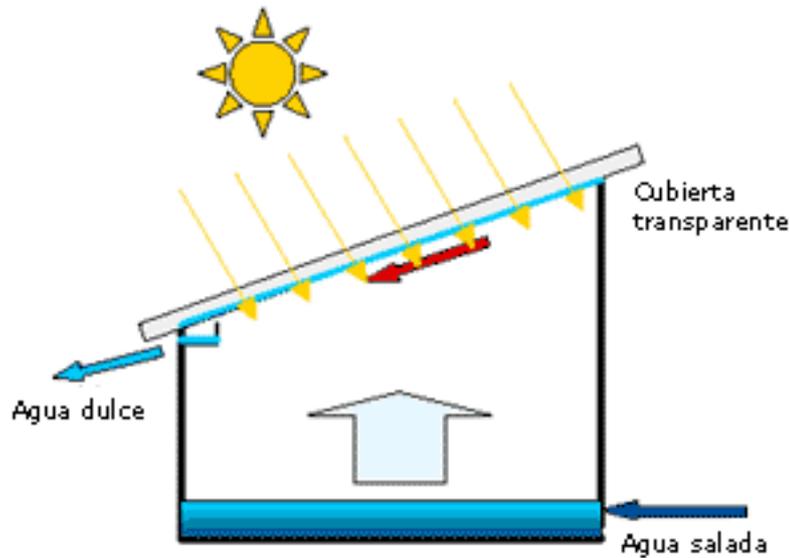


Figura 1-5. Esquema de un colector solar para destilación [15].

- **Congelación:**

En este tipo de procesos el agua salina se ve sometida a diversos sistemas de refrigeración para posteriormente evaporarse a baja presión en un cristizador al vacío. Así se obtienen cristales de hielo mezclados con cristales de salmuera que pueden ser separados mediante procesos mecánicos. [1]

Por último encontramos los procesos de desalación mediante membrana. Dentro de esta tecnología podemos diferenciar dos técnicas:

- **Electrodiálisis.**

Separación iónica a través de una serie de membranas situadas sucesivamente y separadas entre sí milímetros. La aplicación de campos eléctricos genera la migración de iones que pasan por estas membranas que actúan como tamices. [17]

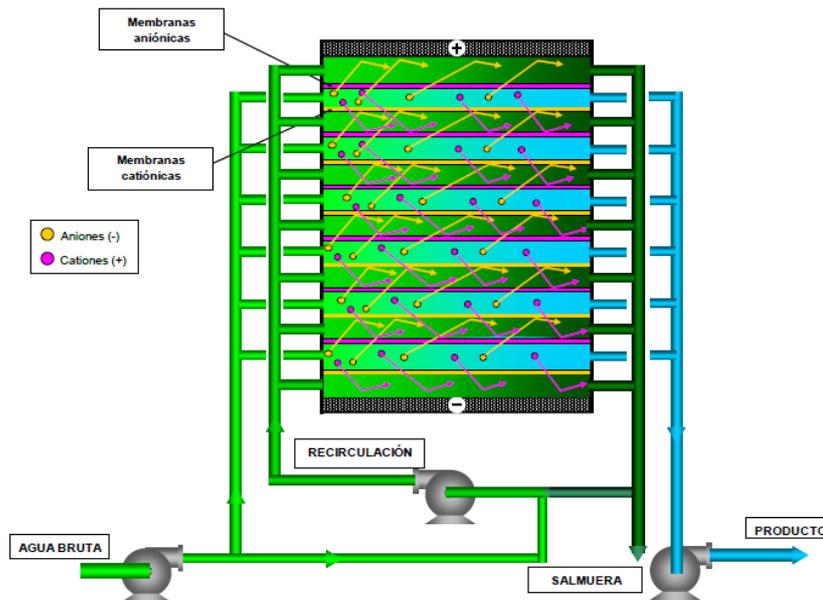


Figura 1-6. Diagrama de flujo del proceso de Electrodialisis. [18]

- **Ósmosis.**

Éste es un fenómeno natural por el cual dos soluciones con distinta concentración, separadas por una membrana semipermeable, tienden a igualar sus concentraciones desde la solución más diluida a la más concentrada hasta alcanzar el equilibrio. A la hora de atravesar las membranas, los fluidos requieren energía que se consigue mediante una fuerza impulsora. Típicamente estas fuerzas serán la presión hidrostática (ΔP), y gradiente de concentración o potencial químico ($\Delta\mu$).

Atendiendo a la presión aplicada al sistema, podemos diferenciar tres tipos principales de ósmosis:

- **Ósmosis inversa (RO):** Utiliza presión hidráulica excediendo a la presión osmótica ($\Delta P > \Delta\pi$). La fuerza impulsora es la diferencia entre la presión hidráulica aplicada y la presión osmótica entre disoluciones.
- **Pressure Retarded Osmosis (PRO):** Utiliza presión hidráulica sin exceder a la presión osmótica ($\Delta\pi > \Delta P$). La fuerza impulsora es la diferencia entre la presión osmótica entre disoluciones y la presión hidráulica aplicada. Utilizada para la producción de energía.
- **Ósmosis directa (FO):** No utiliza presión hidráulica ($\Delta P = 0$). La fuerza impulsora es el gradiente de concentración, que tiene como resultado un gradiente de presión osmótica entre disoluciones ($\Delta\pi \neq 0$). [21]

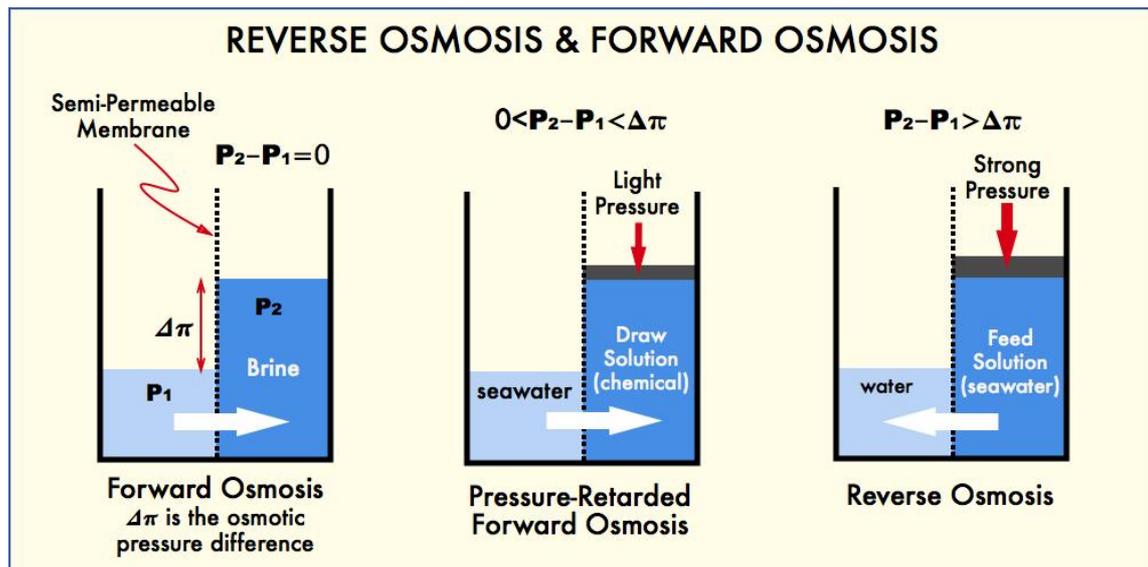


Figura 1-7. Esquema representativo de los diversos tipos de ósmosis: FO, PRO y RO. [22]

1.4 FO

Centrándonos en el proceso de FO, objetivo de este estudio, hay que decir que este método ha captado la atención de los investigadores debido a las diversas ventajas que presenta frente a sus adversarios, entre ellas destacan dos, las cuales marcan grandes diferencias:

- Opera a muy bajas presiones o incluso sin presión hidráulica, ya que la única resistencia al flujo es la membrana semipermeable.
- Utiliza calor a baja temperatura, 40°C. Alcanzable por ejemplo en condensadores de una planta de generación eléctrica convencional.

El consumo eléctrico en la FO es mucho más bajo que en las existentes tecnologías de desalación. En la mayoría de los casos, este proceso requiere menos de 0.25 kWh/m³ para la producción de agua dulce. Esto es aproximadamente un 21% menos de lo requerido por la MFE o la MED (multi-effect distillation), la más eficiente tecnología existente en desalación, y un 9% menos que en la RO. Esta combinación de bajas temperaturas y bajo consumo eléctrico hacen a la FO, el proceso de desalación en términos de costes energéticos. Aun así, existen ensayos y experimentos que han revelado que la FO está aún muy limitada por la oferta de unas adecuadas membranas semipermeables, así como de eficientes *draw solutions*. [23]

1.4.1 Descripción del proceso

El proceso de *forward osmosis* utiliza el gradiente de presión osmótica generado entre una solución altamente concentrada, denominada *draw solution*, y otra más diluida, solución de alimentación. Esta diferencia de presión osmótica provoca la difusión de la molécula de agua a través de la membrana semipermeable, hacia la *draw solution*. Como consecuencia de ello la solución de alimentación va aumentando su concentración, a la vez que la *draw solution* se va diluyendo, disminuyendo de este modo su presión osmótica hasta llegar a igualarse a la de alimentación, finalizando así el proceso de difusión. [23]

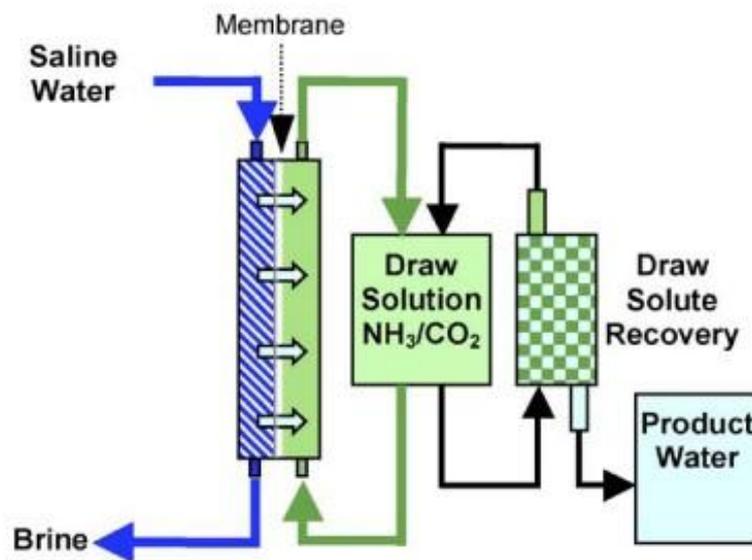


Figura 1-8. Representación del proceso de FO. [24]

1.5 Objetivo

El trabajo tiene como objetivo una evaluación termodinámica de un conjunto de *draw solution*, que pueden ser candidatas a ser utilizadas en el proceso de FO. Analizaremos de forma crítica y exhaustiva cada una de ellas, y razonaremos cual es la mejor opción para este tipo de tecnología.

1.6 Metodología

Se selecciona unas soluciones extractoras (*draw solution*) propuestas en la literatura por unos expertos en la materia, se caracterizan termodinámica mediante sus ecuaciones de estado, y finalmente se evalúan termodinámica para su potencial aplicación en el proceso de FO.

2 CARACTERÍSTICAS DE LA DRAW SOLUTION PARA FO

El trabajo tendrá como punto de partida los estudios realizados por unos expertos donde han preseleccionado una serie de buenos candidatos de *draw solutions*. A continuación se muestra con detalle los experimentos realizados con dichas sustancias y las conclusiones a las que se ha llegado.

Recientemente, el tratamiento térmico para el proceso de recuperación en la FO ha suscitado mucho interés, ya que este puede llegar a ser un método muy efectivo y económico para la obtención final de agua dulce. Esto es posible con materiales con un baja LCST (*lower critical solution temperature*), es decir con una baja temperatura a partir de la cual el soluto y el disolvente dejan de ser miscibles, posibilitando la recuperación del agua dulce con un simple procedimiento físico, como por ejemplo la extracción con una jeringa. Veremos ahora que esto es posible con la síntesis de nuevos polímeros.

El elemento base del experimento es el *tetrabutylphosphonium styrenesulfonate* (SSP), utilizado como monómero para la creación de diferentes oligómeros, que disueltos en agua forman las distintas draw solutions. La forma de obtener estos materiales fue la siguiente:

1. Síntesis del monómero *tetrabutylphosphonium styrenesulfonate* (SSP).

Sodiumstyrenesulfonate hidratado (1.68 g, 8 mmol) y *tetrabutylphosphonium bromide* (4.00 g, 12 mmol) fueron disueltos en agua desionizada (10 mL), mezclados con un agitador magnético. Después el producto fue extraído con *dichloromethane* y secado sobre *anhydrous magnesium sulfate*. Finalmente la solución fue concentrada usando un evaporador para obtener sólo el producto líquido, el *tetrabutylphosphonium styrenesulfonate*.

2. Síntesis del oligómero (PSSP).

Una vez obtenido el monómero en estado líquido, este fue mezclado con un “iniciador”, *Azobisisobutyronitrile* (AIBN), y seguidamente ambos disueltos en etanol. Finalmente tras un proceso físico-químico se obtuvieron diferentes oligómeros. El número de unidades de repetición, es decir la cantidad de monómeros de cada cadena del producto dependió de la cantidad de AIBN inicial. En este experimento se obtuvieron los siguientes *draw solutes*: PSSP5, PSSP6 y PSSP11.

Para caracterizar estas *draw solutions* se hace uso de una serie de parámetros que nos ayudarán a caracterizar y evaluar estas en el proceso de FO.

En el test se utilizó dos tubos de cristal con forma de L y separados entre sí por una membrana semipermeable. El primer tubo fue lleno por la por una disolución de NaCl disuelta en agua, con una concentración menor que la del siguiente tubo, y el segundo fue ocupado por las *draw solution*, obtenidos anteriormente. De forma natural se produce el fenómeno de difusión de flujo, de la disolución menos concentrada a la más concentrada, permitiendo la membrana semipermeable el paso sola y exclusivamente del disolvente, en este caso agua, de un tubo a otro. Este fenómeno se midió utilizando la siguiente fórmula:

$$J_v = \frac{\Delta V}{A\Delta t} \quad (2-1)$$

- $\Delta V [L] \equiv$ Cambio de volúmen en el tubo donde se encuentra la draw solution.
- $\Delta t [s] \equiv$ Tiempo en el que se produce el cambio de volúmen.
- $A [m^2] \equiv$ Área efectiva de la membrana que atraviesa el disolvente.

Este parámetro medió por tanto el flujo de agua, sin soluto, que atravesaba la membrana hacia la *draw solution*. Más adelante veremos que también existe un flujo de soluto inverso, J_s , en la dirección contraria a esta corriente primaria, debido a que la membrana no tiene un comportamiento ideal.

El siguiente paso, y el más importante del test, fue el proceso térmico que permitió separar el agua dulce de la solución final, hallada en el segundo tubo. Consistía en calentar la mezcla hasta la temperatura de 60°C, durante una hora aproximadamente, variando ésta en función del *draw solute*. Dado que es imposible distinguir el agua del resto de componentes a simple vista, se añadió naranja de metilo para que tiñera el oligómero y facilitara su posterior extracción. Para medir este proceso de purificación del agua se usó la ecuación:

$$R(\%) = \frac{C_b - C_a}{C_b} 100 \quad (2-2)$$

- $C_b [\frac{mg}{L}] \equiv$ Contenido de SSP o PSSP en el agua antes del proceso de extracción.
- $C_a [\frac{mg}{L}] \equiv$ Contenido de SSP o PSSP en el agua después del proceso extracción.

Otras propiedades como la viscosidad o el coeficiente osmótico fueron medidos obteniéndose los siguientes gráficos y tablas de resultados:

Tabla 2-1. Síntesis y propiedades del tetrabutylphosphonium styrenesulfonate (SSP) y oligomeric poly (tetrabutylphosphonium styrenesulfonate). [26]

	Initiator mol% ^a	Molecular weight (Da) ^b	Viscosity (cP) ^c
SSP	-	-	0.996
PSSP5 ^a	20	2100	2.602
PSSP6 ^a	5	2600	2.665
PSSP11 ^a	1	4700	12.615

^a Mol% of the initiator to the amount of the monomer, tetrabutylphosphonium styrenesulfonate (SSP).

^b Molecular weights were measured using MALDI-TOF mass spectrometry.

^c Viscosities were measured at 10 wt% concentration.

La figura 2-1 muestra el comportamiento de la viscosidad de SSP y PSSP para diferentes concentraciones. La viscosidad de las *draw solution* afecta a la eficiencia de la FO. Si esta es demasiado alta, el proceso de difusión se ve mermado por la reducción del potencial osmótico entre la solución de alimentación y la *draw solution*. Se observa que la viscosidad aumenta con la concentración, como era de esperar. Respecto al peso, se observan grandes diferencias entre los valores del PSSP11 y PSSP5, debido al número de monómeros de cada cadena, pero aun así vemos en la Tabla 2-2 que el PSSP11 obtuvo un considerable flujo de agua permeable (figura 2-3), a pesar de su alta viscosidad. Dándonos a entender que la viscosidad era un parámetro importante, pero no determinante.

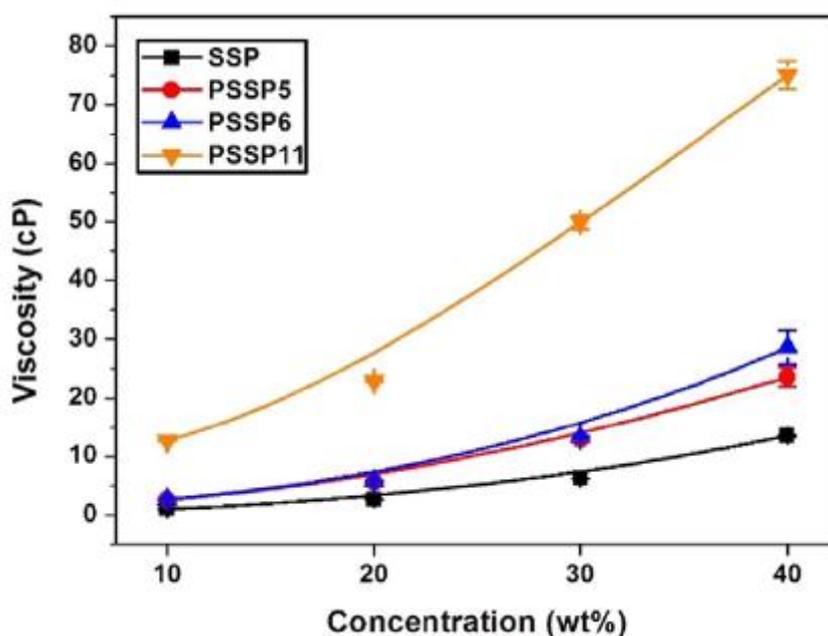


Figura 2-1. Comportamiento de la viscosidad del SSP, PSSP5, PSSP6 y PSSP11. [26]

En la Figura 2-2 se observa que la presión osmótica se incrementa con la concentración, teniendo un comportamiento casi lineal. Relacionándola con el peso molecular, dicha presión decrece desde SSP hasta PSSP, para todos los valores de las concentraciones. Y aunque la concentración en peso es la misma, la molalidad del SSP es mayor que la del PSSP11 debido a que el peso molecular del PSSP11 es mayor que el del SSP, explicando así la diferencia de valores de presiones osmóticas entre unos oligómeros y otros. Como resumen de la figura 2-2 se puede decir que el aumento de presión osmótica está motivado principalmente por el aumento de la concentración y no por la draw solution en sí, aunque cabe destacar que a medida que la concentración aumenta las diferencias entre ellas, respecto a presiones conseguidas son mayores.

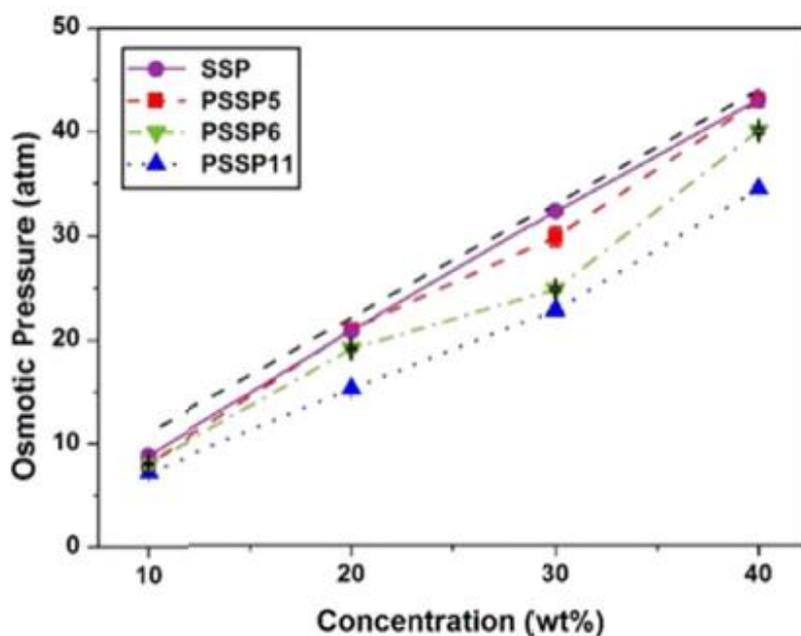


Figura 2-2. Comportamiento de la presión osmótica de SSP, PSSP5, PSSP6 y PSSP11. [26]

En la tabla 2-2 se pueden los valores, representados en la figura 2-2, de las presiones osmóticas de las distintas soluciones en función de la concentraciones. [26]

Tabla 2-2. Presión osmótica, flujo de agua permeable, y flujo inverso de soluto de SSP y PSSP en diferentes concentraciones. [26]

Conc. (wt.%)	Osmotic pressure (atm) ^a				Water permeation flux (LMH) ^b		Reverse solute flux (gMH) ^b	
	10	20	30	40	10	20	10	20
SSP	8.79	20.73	32.27	43.11	8.02	16.28	0.29	0.53
PSSP5	8.04	20.85	29.76	42.96	7.58	14.50	0.11	0.14
PSSP6	8.01	19.02	24.69	40.06	7.43	13.66	0.05	0.08
PSSP11	7.16	15.15	22.72	34.44	6.32	13.14	0.01	0.05

^a Osmotic pressures were obtained using the freezing point depression method.

^b Water permeation flux and reverse solute flux values were measured using a small-scale custom forward osmosis (FO) system.

La Figura 2-3, muestra que el valor del flujo de agua permeable (J_v) incrementa con la concentración del *draw solution*, debido al correspondiente aumento de presión osmótica que esto conlleva. Se observa también un flujo inverso de soluto (J_s), debido a que la membrana no es una barrera perfecta para la molécula de dicho soluto. Este flujo inverso aumenta con la concentración de la *draw solution* al igual que el flujo directo, como muestra la tabla 2-2 dónde se puede ver dicho incremento para todas las *draw solution* al pasar de una concentración del 10 al 20 (wt %). Más detalladamente se muestra el comportamiento de la *draw solution* PSSP5 en la figura 2-3(b), dónde se muestra el comportamiento de dicho flujo hasta una concentración del 40 (%wt).

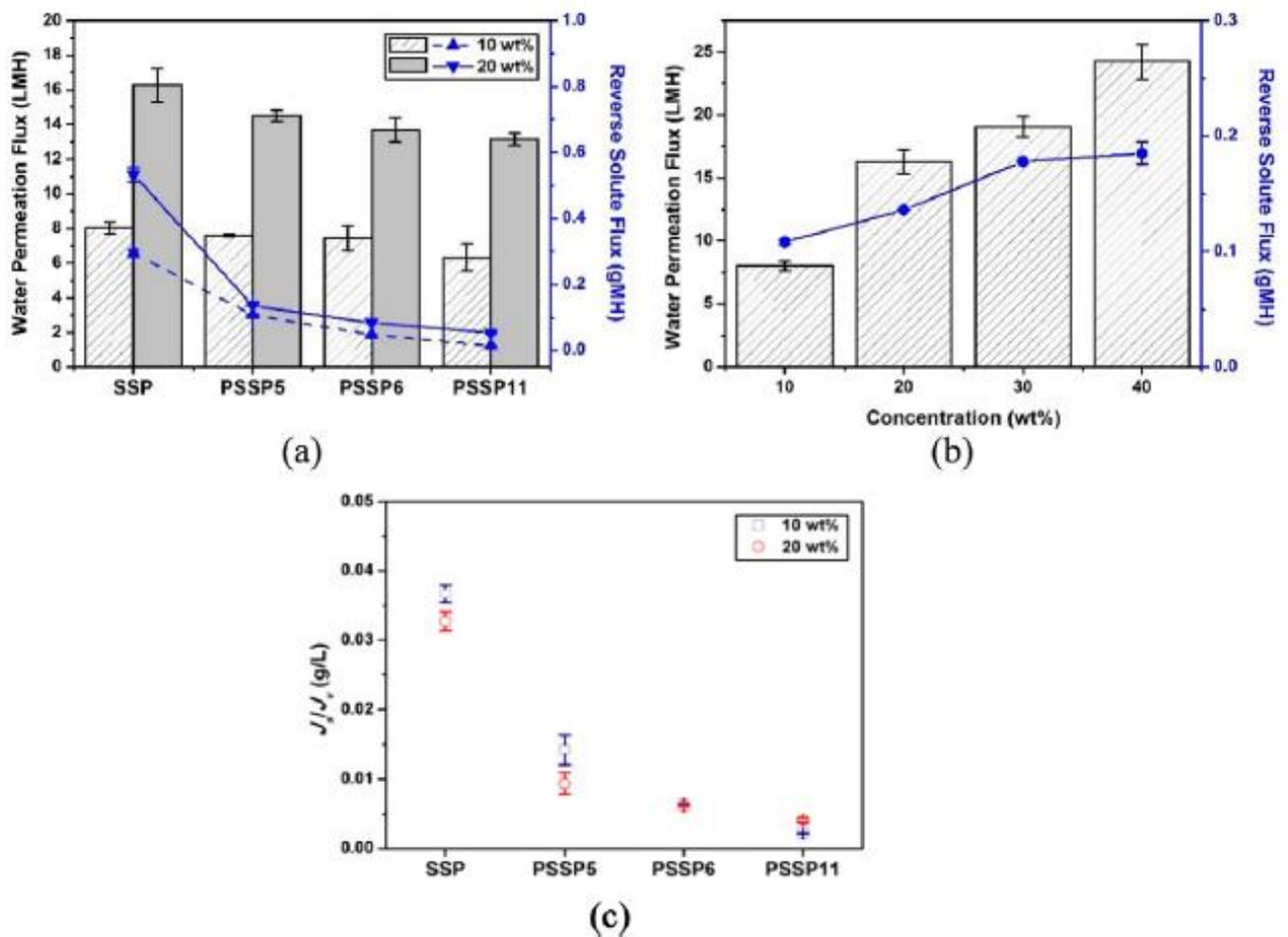


Figura 2-3. (a) Flujo de agua permeable y flujo inverso de soluto de SSP, PSSP5, PSSP6 y PSSP11 en concentraciones del 10 y 20% en peso. (b) Flujo de agua permeable y flujo inverso de soluto en función de la concentración para el PSSP5. [26]

También cabe destacar la relación J_s/J_v para las distintas disoluciones. La figura 2-3(c) muestra como a medida que el peso molecular de la *draw solution* aumenta, la relación J_s/J_v . Es decir con disoluciones de más peso molecular podemos conseguir flujos inversos menores en proporción al flujo directo. A continuación podemos ver el comportamiento descrito de ambos flujos para la concentración de 10% en peso para las distintas *draw solutions*, representada por la figura 2-4 en los dos primeros tercios:

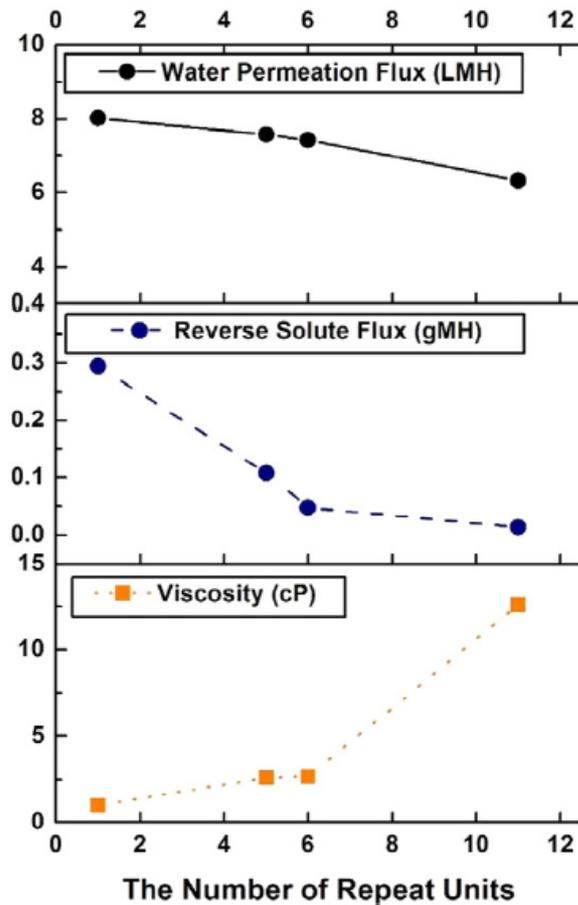


Figura 2-4. Flujo permeable de agua, flujo inverso de soluto y viscosidad de SSP, PSSP5, PSSP6 y PSSP11 en función del número de unidades de repetición al 10% de concentración en peso. [26]

Uno de los puntos más importantes del experimento fue la medida del LCST, que determinó la temperatura a partir de la cual los solutos de la disolución dejan de ser miscibles. Esta característica marca el consumo del proceso, ya que determina la temperatura a la que debemos calentar la mezcla, y mientras esta sea más alta, más costoso será el proceso de FO. Los resultados obtenidos fueron:

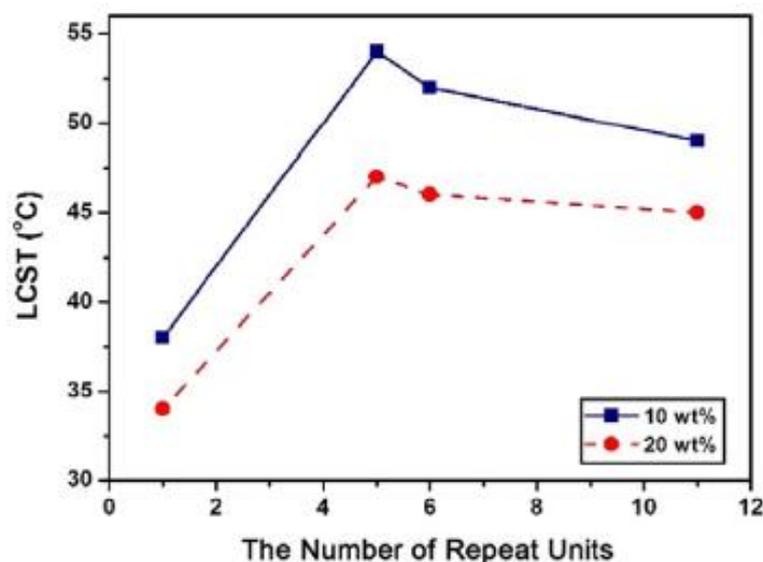


Figura 2-5. Relación entre el peso molecular y LCST de las distinta draw solution para cada concentración. [26]

Se puede observar en la tabla que el comportamiento no es proporcional al número de monómeros del soluto, alcanzándose un máximo para el PSSP5 (10 % wt) de 53 °C, aproximadamente. Seguidamente esta tendencia se invierte y baja a valores por debajo de los 50 °C para la disolución PSSP11 (10 % wt). Comentar aparte la influencia de la concentración en el valor de la LCST, la cual disminuye con el aumento de la concentración.

Una vez calentadas las distintas soluciones por encima de su LCST, y separado el soluto del agua por una jeringa, se midió la efectividad de la purificación del agua para las distintas *draw solutions*, obteniéndose la siguiente tabla:

Tabla 2-3. Efectividad del agua purificada en función del número de unidades de repetición para una concentración del 20% en peso.

	SSP	PSSP5	PSSP6	PSS11
R(%)	99.33	99.51	99.66	99.68

Los diferentes experimentos con las distintas *draw solutions* determinaron que, aunque el valor del J_v en los oligómeros (PSSP) es ligeramente inferior que en el monómero (SSP), el del J_s es significativamente menor, indicando que los oligómeros son *draw solutes* más eficientes. Siendo mérito que el 99.5% del soluto de los PSSPs en la disoluciones sea recuperado con tan sólo un proceso térmico que precisa de una baja temperatura e implica un mínimo flujo inverso de soluto, obteniéndose un agua dulce prácticamente pura, $R (\%)=99.88$ (PSSP11). Por ello se consideró a los oligómeros como unos prometedores candidatos como solutos en el proceso de FO.

3 CARACTERIZACIÓN TERMODINÁMICA

3.1 Soluciones ideales

Una disolución es una mezcla condensada, sólida o líquida, y homogénea a nivel molecular o iónico de dos o más sustancias puras que no reaccionan entre sí, cuyos componentes se encuentran en proporciones variables. Dónde el componente en exceso, *disolvente*, se caracteriza termodinámicamente de forma distinta del resto de sustancias, *solutos*, aunque siempre de forma compatible, en particular con la ecuación de Gibbs-Duhem.

La experiencia demuestra que si en una disolución, por el ejemplo el componente A (disolvente), está presente en gran proporción, su comportamiento tenderá a la idealidad.

$$\lim_{(X_B \rightarrow 0)} \frac{\lambda_A(T, p, X_B)}{\lambda_A^*(T, p)} = 1 - X_B \quad (3-1)$$

Del mismo modo, el comportamiento termodinámico del otro componente, B (solute), no puede ser cualquiera, sino que debe cumplir con la ecuación de Gibbs-Duhem.

$$T = \text{cte} ; p = \text{cte}$$

$$(1 - X_B) d \ln \lambda_A(T, p, X_B) + X_B d \ln \lambda_B(T, p, X_B) = 0 \quad (3-2)$$

En el supuesto caso de que la fracción molar de A sea muy superior a la de B, su comportamiento tenderá a la idealidad, según el párrafo anterior. Este comportamiento, sustituido en la ecuación de Gibbs-Duhem, mediante la oportuna diferenciación a temperatura y presión constantes, proporciona una ecuación diferencial que relaciona λ_B con X_B , la cual una vez integrada, indica que si en una mezcla binaria un componente está presente en gran proporción, el otro componente necesariamente debe comportarse termodinámicamente de la forma que se indica abajo, dónde el superíndice ∞ significa “en dilución infinita”, equivalente a que la fracción molar de A sea prácticamente la unidad.

$$T = \text{cte}; p = \text{cte}; X_B \rightarrow 0$$

$$d \ln \lambda_A(T, p, X_B) = \frac{-dx_B}{(1 - X_B)} \quad (3-3)$$

$$-dx_B + X_B d \ln \lambda_B(T, p, X_B) = 0 \quad (3-4)$$

$$\frac{\lambda_B(T, p, X_B)}{\lambda_B^\infty(T, p)} = \frac{x_B}{x_B^\infty} \quad (3-5)$$

En cuanto a la composición de una mezcla, ésta se expresa por lo general en función de las “molalidades” de los solutos, definidas como el cociente entre la cantidad de materia del soluto y la masa del disolvente. La relación entre molalidad y fracción molar en el caso de una solución binaria es inmediata, donde aparece como parámetro la masa molar del disolvente.

$$b_B = \frac{n_B}{m_A} \quad (3-6)$$

$$x_B = \frac{M_A b_B}{1 + M_A b_B} \quad (3-7)$$

$$1 - x_B = \frac{1}{1 + M_A b_B} \quad (3-8)$$

Si la solución es muy diluida, la fracción molar del soluto y su molalidad son proporcionales, mientras que la fracción molar del disolvente se puede expresar matemáticamente como la exponencial de la opuesta de la molalidad del soluto por la masa molar del disolvente.

$$X_B \rightarrow 0$$

$$X_B \rightarrow M_A b_B \Rightarrow x_B^\infty = M_A b_B^\infty \quad (3-9)$$

$$(1 - X_B) \rightarrow (1 - M_A b_B) \approx \exp(-M_A b_B) \quad (3-10)$$

El comportamiento termodinámico de disolvente y soluto en función de las respectivas actividades absolutas, para una solución binaria muy diluida, se formula a continuación y cuya deducción es inmediata mediante la sustitución de las expresiones del párrafo anterior:

$$b_B \rightarrow 0$$

$$\frac{\lambda_A(T, p, b_B)}{\lambda_A^*(T, p)} = \exp(-M_A b_B) \quad (3-11)$$

$$\frac{\lambda_B(T, p, b_B)}{\lambda_B^\infty(T, p)} = \frac{b_B}{b_B^\infty} \quad (3-12)$$

Todo lo anterior refleja el comportamiento de una solución binaria, cuando la solución es muy diluida, es decir describe el comportamiento de una solución ideal, pero, ¿qué ocurriría si $b_B \neq \rightarrow 0$? Entonces necesitaremos de dos coeficientes que midan la desviación del comportamiento de un disolvente y soluto respecto de su comportamiento en condiciones ideales.

3.1.1 Coeficiente osmótico del disolvente

Se define “coeficiente osmótico”, φ , de un disolvente en una solución, como el factor corrector del logaritmo natural del cociente de actividades absolutas de una solución muy diluida respecto al disolvente puro, para igual temperatura y presión.

$$b_B \neq \rightarrow 0$$

$$\ln \frac{\lambda_A(T, p, b_B)}{\lambda_A^*(T, p)} = -\varphi(T, p, b_B) M_A b_B \quad (3-13)$$

$$\varphi(T, p, b_B) = \frac{-1}{M_A b_B} \frac{\mu_A(T, p, b_B) - \mu_A^*(T, p)}{R T} \quad (3-14)$$

3.1.2 Coeficiente de actividad del soluto

El “*coeficiente de actividad*”, γ_B , de un soluto en una solución es el factor de corrección del coeficiente de actividades absolutas de una solución muy diluida referida a la dilución infinita a la misma temperatura y presión.

$$b_B \neq 0$$

$$\frac{\lambda_B(T, p, b_B)}{\lambda_B^*(T, p)} = \gamma_B(T, p, b_B) \frac{b_B}{b_B^\infty} \quad (3-15)$$

$$\ln \gamma_B = \frac{\mu_B(T, p, b_B) - \mu_B^\infty(T, p)}{R * T} - \ln \frac{b_B}{b_B^\infty} \quad (3-16)$$

Estos dos coeficientes vienen relacionados por la ecuación de Gibbs-Duhem que proporcionan una relación diferencial que permite el cálculo del coeficiente osmótico conocido el coeficiente de actividad y viceversa. Estas dos ecuaciones son:

$$\varphi(T, p, b_B) = 1 + \frac{1}{b_B} \int_0^{b_B} b_B d[\ln \gamma_B(T, p, b_B)] \quad (3-17)$$

$$\ln \gamma_B(T, p, b_B) = [\varphi(T, p, b_B) - 1] + \int_0^{b_B} [\varphi(T, p, b_B) - 1] \frac{db_B}{b_B} \quad (3-18)$$

3.2 Caracterización termodinámica draw solution. Coeficiente osmótico y coeficiente de actividad.

Para caracterizar termodinámicamente nuestras *draw solutions* deberemos conocer por tanto el *coeficiente osmótico* del disolventey el *coeficiente de actividad* del soluto. Estos coeficientes nos ayudaran a representar el comportamiento de nuestras *draw solutions* cuando éstas no tiendan a la idealidad, siendo del mismo modo necesarios para calcular variables de estado como la entalpía y entropía, imprescindibles para los posteriores balances de energía, que nos ayudarán a una mejor comprensión y entendimiento de estos tipos de sustancias. En nuestro caso deberemos conocer éstos dos parámetros correctores sólo para distintas molalidades, ya que trabajaremos a presión y temperaturas constantes, 25°C y 1 bar, respectivamente.

En nuestro caso deberemos conocer éstos dos parámetros correctores sólo para distintas molalidades, ya que trabajaremos a presión y temperaturas constantes, 25°C y 1 bar, respectivamente. Para ello partiremos de la siguiente figura:

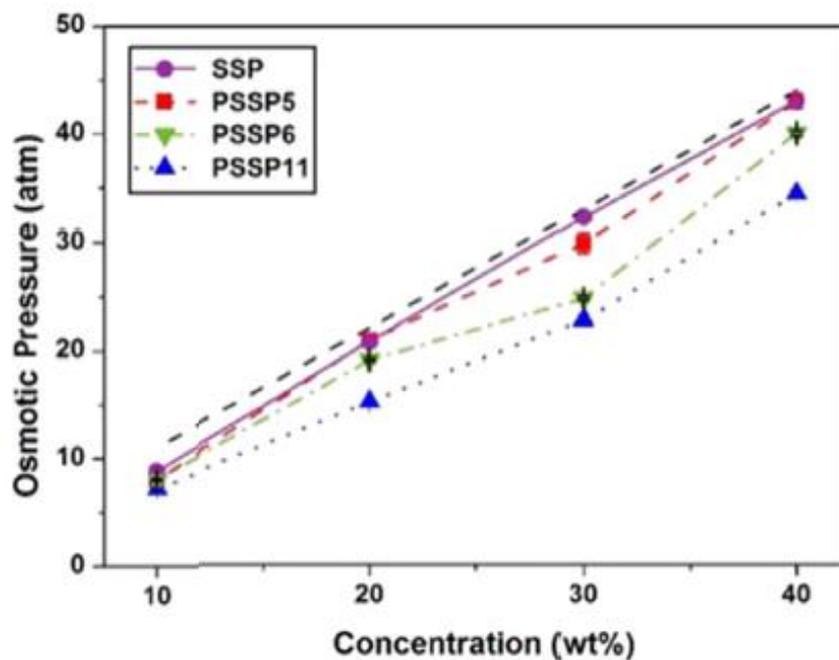


Figura 3-1. Comportamiento de la presión osmótica de SSP, PSSP5, PSSP6 y PSSP11. [26]

La gráfica superior describe el comportamiento de la presión osmótica frente a la concentración de la *draw solution*. Esta relación nos permitirá obtener, posteriormente a través de una serie de cálculos y simplificaciones, los distintos valores del coeficiente osmótico del disolvente.

A continuación, para que los resultados de la gráfica anterior, representados en la tabla de abajo, nos sean de utilidad, serán transformados mediante una serie de operaciones, obteniéndose los valores de la presión osmótica en función de la molalidad, ya que ésta será la forma de expresar la concentración a partir de ahora.

Tabla 3-1. Presión osmótica de SSP y PSSP para diferentes concentraciones. [26]

Conc. (wt.%)	Osmotic pressure (atm)			
	10	20	30	40
SSP	8.79	20.73	32.27	43.11
PSSP5	8.04	20.85	29.76	42.96
PSSP6	8.01	19.02	24.69	40.06
PSSP11	7.16	15.15	22.72	34.44

3.2.1 Cálculo de los coeficientes osmóticos de las draw solutions.

Se va a intentar calcular los diferentes coeficientes osmóticos para las distintas *draw solutions* con los datos de los que disponemos.

- **SSP**

Debido a que no disponemos de la masa molecular de este polímero, no será posible calcular el coeficiente osmótico del disolvente y el coeficiente de actividad del soluto. No obstante mediante otro procedimiento seremos capaces de calcular directamente el incremento de la función de Gibbs.

- **PSSP5**

El primer paso para calcular el coeficiente osmótico del disolvente será pasar de concentraciones de tanto por ciento en peso a molalidad, ya que las expresiones que se van a utilizar están expresadas en función de este último parámetro. Se va a empezar desde la concentración de 10 por ciento en peso hasta la de 40. A continuación se muestran los cálculos realizados para la concentración del 10 (% wt). Recordando el significado de una concentración en tanto por ciento en peso, tenemos:

$$wt. (10\%) = \frac{kg \text{ soluto}}{kg \text{ disolución}} 100 \quad (3-19)$$

$$wt. (10\%) = \frac{10 \text{ g soluto PSSP5}}{100 \text{ g disolución (10 g PSSP5+90 g H}_2\text{O)}} 100$$

Esto se traduce a una concentración expresada en molalidad (b_B) de:

$$b_B = \frac{\text{moles de soluto}}{\text{Kg de disolvente}} \quad (3-20)$$

$$b_B = \frac{\text{moles de soluto}}{\text{Kg de disolvente}} = \frac{\text{moles contenido en 10 g de PSSP5}}{0.09 \text{ kg de H}_2\text{O}}$$

Para saber el número de moles contenidos en 10 gramos de PSSP5, sólo necesitamos saber la masa molar de nuestro soluto, pudiéndola mirar en la siguiente tabla:

Tabla 3-2. Masa moleculares de los oligómeros poly(tetrabutylphosphonium styrenesulfonate) (PSSP#). [26]

	Molecular weight (Da)
SSP	-
PSSP5	2100
PSSP6	2600
PSSP11	4700

De modo que el número de moles de PSSP5 contenidos en 10 gramos son:

$$\text{Moles (10 g PSSP5)} = 10g \frac{1 \text{ mol}}{2100 \text{ g}} = 4,76190 \times 10^{-3}$$

Y por lo tanto, la molalidad será (b_B):

$$b_B = \frac{4,76193 \cdot 10^{-3}}{0,09} = 0,05291$$

Análogamente, se realizan las operaciones para las demás concentraciones, obteniéndose obtener las siguientes tablas, donde se representan las concentraciones expresadas tanto en porcentaje en peso como en molalidad:

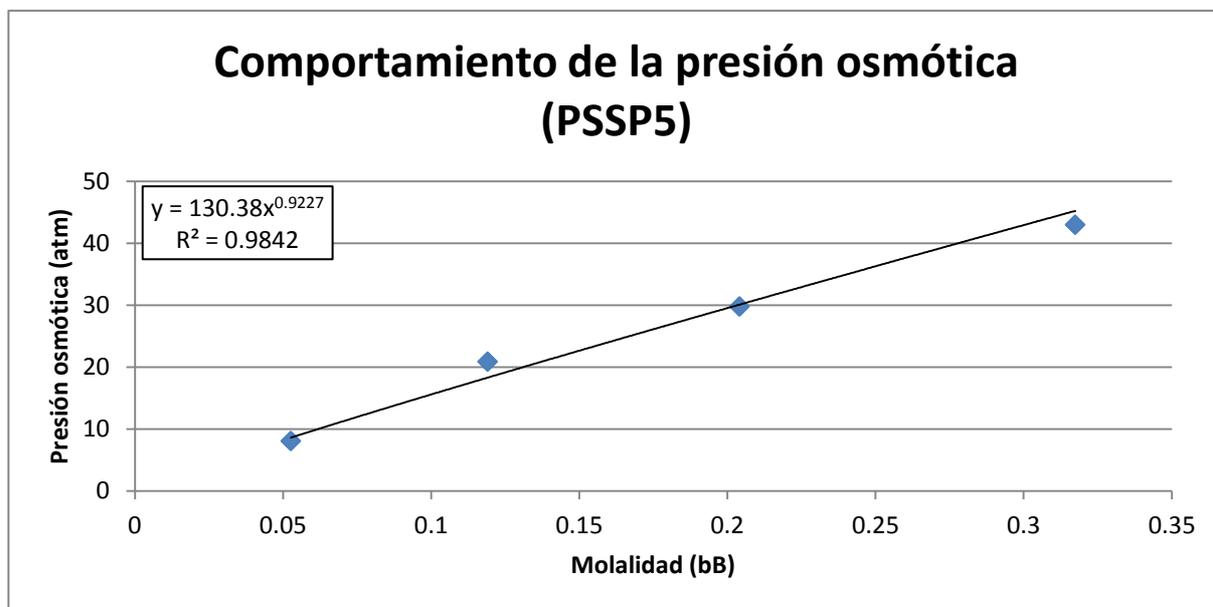
Tabla 3-3. Concentraciones de PSSP5, expresadas en tanto por ciento en peso (wt.%) y molalidad (b_B).

PSSP5				
Conc. (wt%)	10	20	30	40
Molalidad. (b_B)	0,05261	0,11905	0,20408	0,31746

Tabla 3-4. Comportamiento de la presión osmótica de PSSP5 en función de la molalidad (b_B).

PSSP5				
Molalidad. (b_B)	0,05261	0,11905	0,20408	0,31746
Osmotic pressure (atm)	8,04	20,85	29,76	42,96

En la siguiente tabla que se muestra, se han representados los valores de la tabla 3-4 para que de manera gráfica se vea la relación que guardan presión osmótica y molalidad. En el eje Y se ha representado la presión osmótica expresada en atmósferas y en el eje X la molalidad, calculada anteriormente:



Gráfica 3-1. Comportamiento de la presión osmótica de PSSP5 en función de la molalidad (b_B).

Del mismo modo, obtendremos las correspondientes tablas y gráficas para las *draw solutions* PSSP6 y PSSP11.

- PSSP6

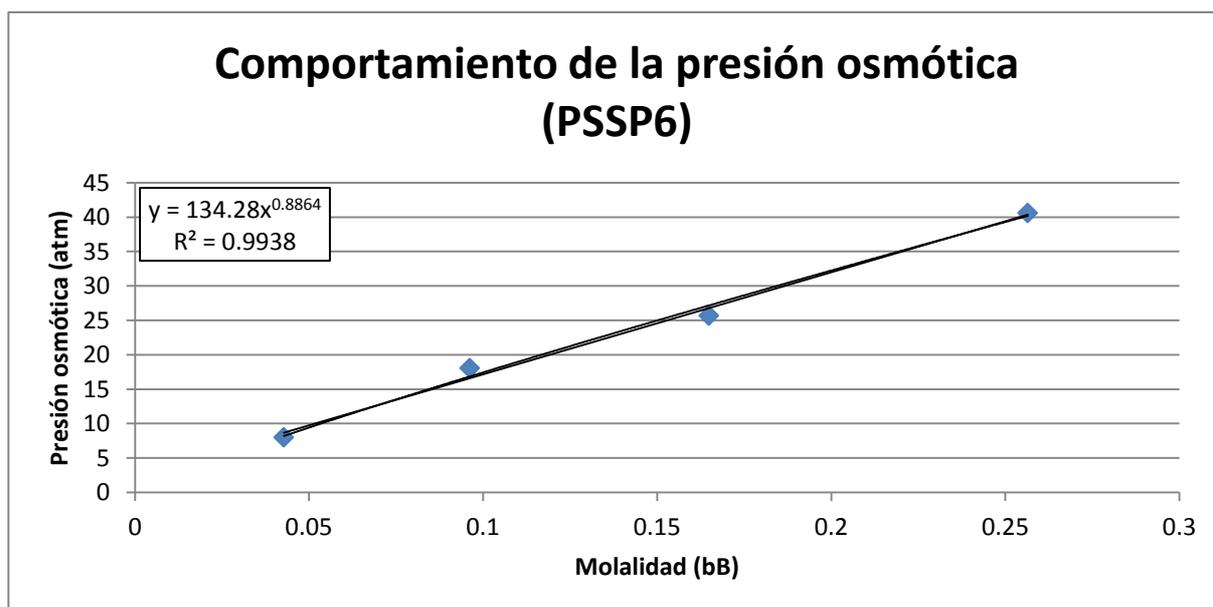
Tabla 3-5. Concentraciones de PSSP6, expresadas en tanto por ciento en peso (wt. %) y molalidad (b_B).

PSSP6				
Conc. (wt%)	10	20	30	40
Molalid. (b_B)	0,04274	0,09615	0,16484	0,25641

Tabla 3-6. Comportamiento de la presión osmótica de PSSP6 en función de la molalidad (b_B).

PSSP6				
Molalidad. (b_B)	0,04274	0,09615	0,16484	0,25641
Osmotic pressure (atm)	8,01	19,02	24,69	40,06

La tabla 3-6 se representa a continuación en la gráfica inferior. En el eje Y se ha representado la presión osmótica expresada en atmósferas y en el eje X la molalidad.



Gráfica 3-2. Comportamiento de la presión osmótica de PSSP6 en función de la molalidad (b_B).

- PSSP11

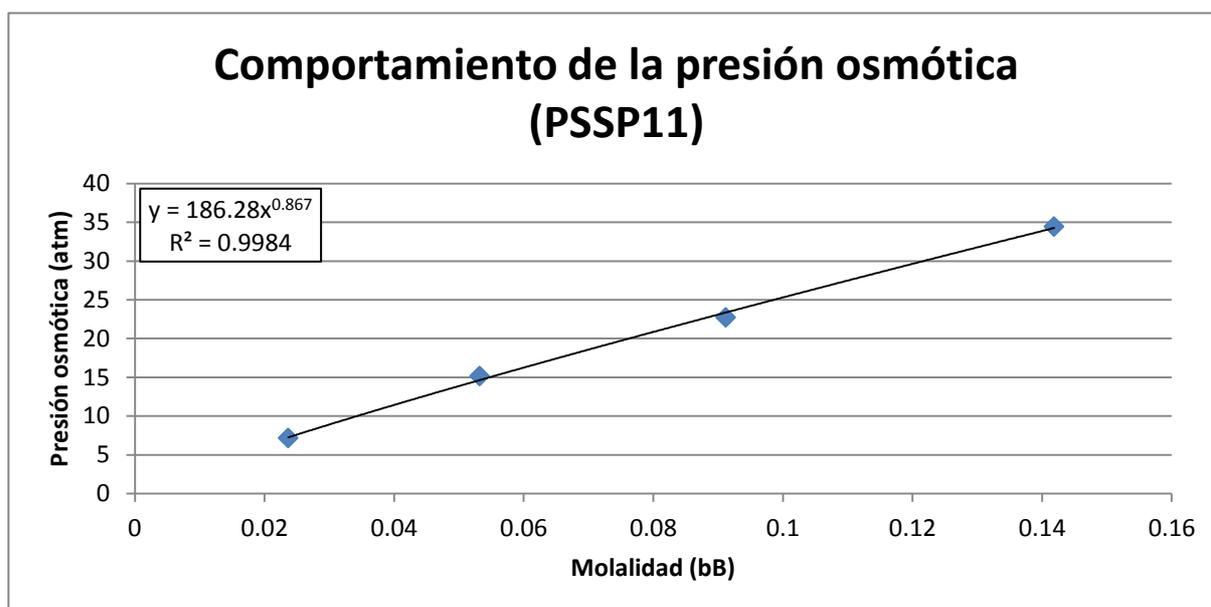
Tabla 3-7. Concentraciones de PSSP6, expresadas en tanto por ciento en peso (wt. %) y molalidad (b_B).

PSSP11				
Conc. (wt%)	10	20	30	40
Molalid. (b_B)	0,02364	0,05319	0,09118	0,14184

Tabla 3-8. Comportamiento de la presión osmótica de PSSP5 en función de la molalidad (b_B).

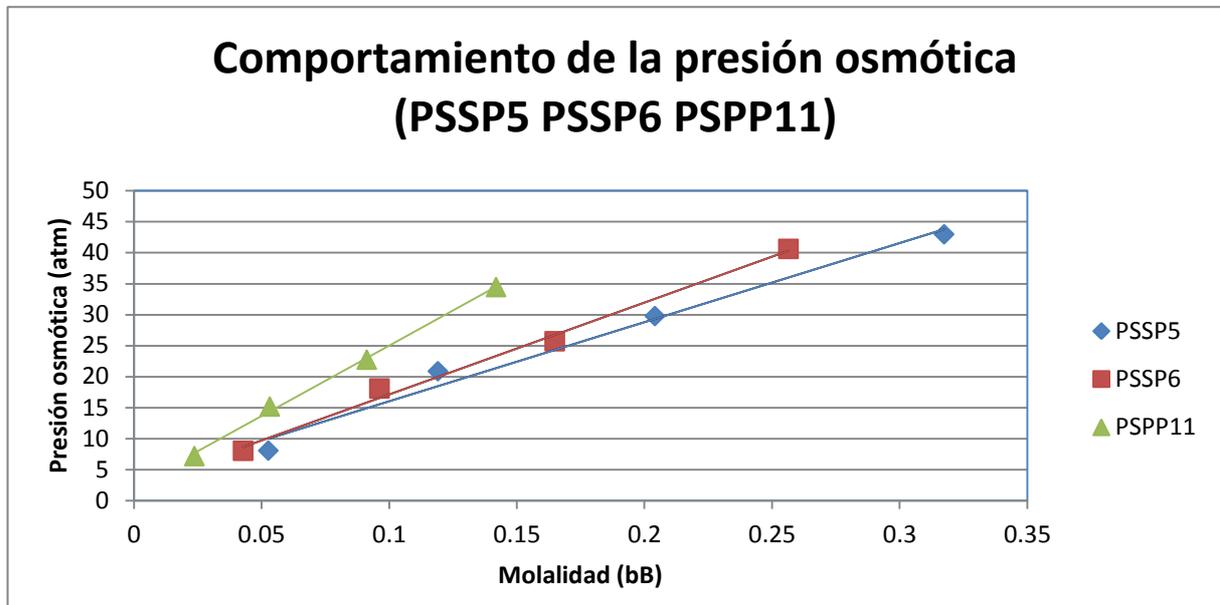
PSSP11				
Molalid. (b_B)	0,02364	0,05319	0,09118	0,14184
Osmotic pressure (atm)	7,16	15,15	22,72	34,44

La tabla 3-8 se representa a continuación en la gráfica inferior. En el eje Y se ha representado la presión osmótica expresada en atmósferas y en el eje X la molalidad.



Gráfica 3-3. Comportamiento de la presión osmótica de PSSP11 en función de la molalidad (b_B).

Para ver el comportamiento desigual entre ambas sustancias se ha representado en la siguiente gráfica las presiones osmóticas en el eje Y y la molalidad en el eje X de todas las draw solution menos de la SSP, ya que no se disponían de los datos suficientes para hacerlo:



Gráfica 3-4. Comportamiento de la presión osmótica de PSSP5, PSSP6 y PSSP11 en función de la molalidad (b_B).

Una vez que ya tenemos la presión osmótica en función de la molalidad, podemos calcular el coeficiente osmótico del soluto del disolvente mediante la siguiente ecuación:

$$\pi(T, p, b_B) \approx \varphi(T, p, b_B) \rho_A R T b_B \quad (3-21)$$

Se puede obtener el coeficiente osmótico del disolvente, ya que conocemos todos los coeficientes excepto éste último. Los coeficientes que aparecen en ella son:

- $R = 8,314472 \left[\frac{m^3 Pa}{mol K} \right]$
- $P = 101325 \quad [Pa]$
- $T = 298 \quad [K]$
- $\rho_A(T=298[K]) = 0,99738 \left[\frac{kg}{L} \right] \Rightarrow \rho_A(T=298[K]) = 0,99738 \frac{Kg}{L} \frac{1}{18 \times 10^{-3}} \frac{mol}{Kg} \frac{1000 L}{1 m^3}$
 $= 55410 \quad \left[\frac{mol}{m^3} \right]$

3.2.1.1 Coeficiente osmótico PSSP5

A continuación se va a calcular el coeficiente osmótico del disolvente para las diferentes molalidades calculadas en el apartado anterior. Se muestra el cálculo realizado para la molalidad de $b_B=0.05261$, y para las diferentes molalidades se expresan directamente en la tabla 3-9:

$$(T = 298[K], p = 101325 [Pa], b_B = 0,05261) \approx \frac{814653 [Pa]}{55410 \left[\frac{mol}{m^3}\right] 8.314472 \left[\frac{Pa m^3}{mol K}\right] 298[k] 0,05261} \approx 0,11279$$

Tabla 3-9. Coeficiente osmótico del disolvente y presión osmótica del PSSP5 para las distintas molalidades (b_B).

$\varphi(T, p, b_B)$	0,11279	0,12925	0,10762	0,09987
b_B	0,05261	0,11905	0,20408	0,31746
$\pi(T, p, b_B)[Pa]$	814653	2112626.25	3015432	4352922

3.2.1.2 Coeficiente osmótico PSSP6

Se muestra la tabla de resultados de la draw solutions PSSP6, obtenidos del mismo modo que para la disolución PSSP5:

Tabla 3-10. Coeficiente osmótico del disolvente y presión osmótica del PSSP6 para las distintas molalidades (b_B).

$\varphi(T, p, b_B)$	0,13831	0,14599	0,11054	0,11530
b_B	0,04274	0,09615	0,16484	0,25641
$\pi(T, p, b_B)[Pa]$	811613.25	1927201.5	2501714.25	4059079.5

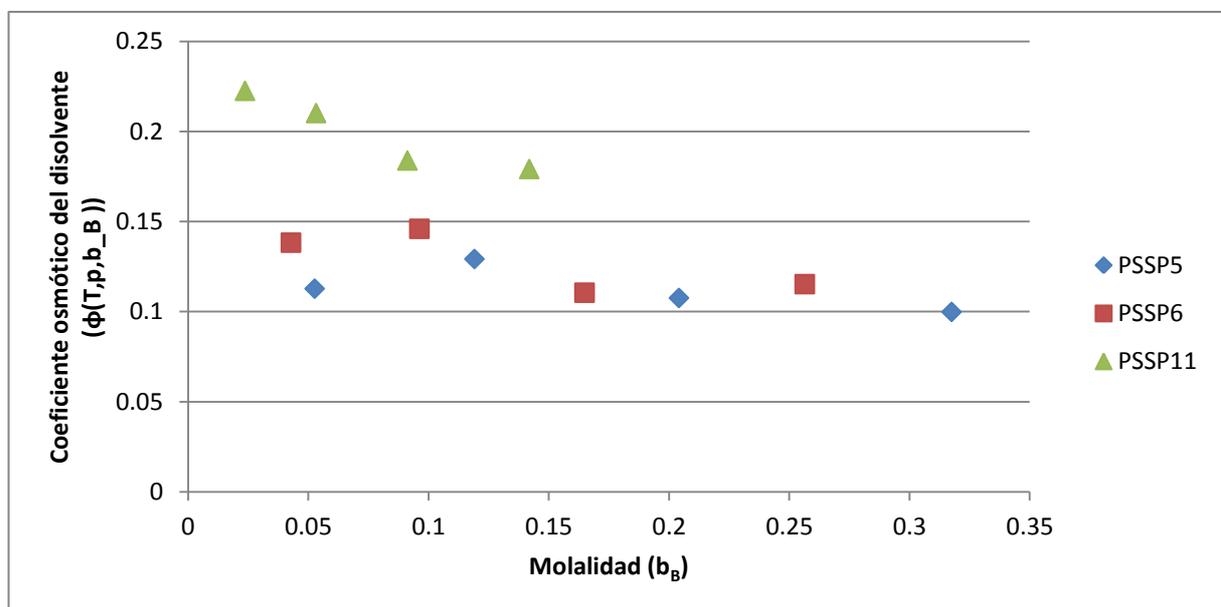
3.2.1.3 Coeficiente osmótico PSSP11

Se muestra la tabla de resultados de la draw solutions PSSP11, obtenidos del mismo modo que para la disolución PSSP5:

Tabla 3-11. Coeficiente osmótico del disolvente y presión osmótica del PSSP11 para las distintas molalidades (b_B).

$\phi(T, p, b_B)$	0,22353	0,21021	0,18389	0,17919
b_B	0,02364	0,05319	0,09118	0,14184
$\pi(T, p, b_B)$ [Pa]	725487	1535073.75	2302104	3489633

En la siguiente tabla que se muestra se representan los resultados anteriores. En el eje X se ha representado la molalidad frente al coeficiente osmótico en el eje Y:



Gráfica 3-5. Comportamiento del coeficiente osmótico del disolvente de PSSP5, PSSP6 y PSSP11 en función de la molalidad (b_B).

Tras dicha representación, observamos que la relación entre coeficiente osmótico del disolvente y molalidad no sigue ningún patrón fijo, excepto en el disolución PSSP11 que podemos decir que tiene una relación aproximadamente lineal y decreciente. Ello puede deberse en un error en las mediciones, comportamientos y fenómenos extraños a niveles microscópicos, etc. En cualquiera de los casos se escapa del alcance de este proyecto el análisis de dichas rarezas y singularidades.

Con el objeto de continuar con el proyecto, continuaremos en análisis con la disolución PSSP11, que como ya hemos comentado es el que tiene un comportamiento más parecido al esperado, lineal. Por lo tanto el siguiente paso será encontrar el coeficiente de actividad del soluto de dicha sustancia.

3.2.2 Cálculo de los coeficientes de actividades del soluto

Tras analizar la gráfica 3-5 en el apartado anterior se ha decidido de continuar el estudio con tan solo la disolución PSSP11, debido a los raros resultados obtenidos de los coeficientes osmóticos de las otras dos disoluciones.

3.2.2.1 Cálculo del coeficiente del disolvente de PSSP11

Para calcular dicho coeficiente utilizaremos la ecuación de Gibbs-Duhem:

$$\ln \gamma_B(T, p, b_B) = [\varphi(T, p, b_B) - 1] + \int_0^{b_B} [\varphi(T, p, b_B) - 1] \frac{db_B}{b_B} \quad (3-22)$$

El procedimiento para la obtención del coeficiente de actividad del soluto de la disolución PSSP11 es el siguiente:

1. Obtener una expresión del coeficiente osmótico del disolvente en función de la molalidad.

Para ello vamos a combinar las expresiones 3-23 y 3-24, esta última obtenida en el apartado 3.2.1 y escrita en la gráfica 3-3, para obtener así la expresión 3-24, la cual depende solamente de la molalidad:

$$\varphi(T, p, b_B) = \frac{\pi(T, p, b_B)}{\rho_A R T b_B} \quad (3-23)$$

$$\pi(T, p, b_B) = 186.28 b_B^{0,867} \quad (3-24)$$

$$\varphi(T, p, b_B) = \frac{186.28 b_B^{0,867}}{\rho_A R T b_B} \quad (3-25)$$

2. Integrar la expresión del coeficiente de actividad del soluto 3-22, para la obtención de dicho coeficiente.

$$\begin{aligned} \ln \gamma_B(T, p, b_B) &= \left[\frac{186.28 b_B^{0.867}}{\rho_A R T b_B} - 1 \right] + \int_0^{b_B} \left[\frac{186.28 b_B^{0.867}}{\rho_A R T b_B} - 1 \right] \frac{db_B}{b_B} \\ &= \frac{186.28 b_B^{0.867}}{55410.298 b_B} - 1 + \int_0^{b_B} \frac{186.28 b_B^{0.867}}{\rho_A R T} \frac{db_B}{b_B^2} - \int_0^{b_B} \frac{db_B}{b_B} \end{aligned}$$

Llegado a este paso de la operación, vemos que la integral $\int_0^{b_B} \frac{db_B}{b_B}$, no converge. La explicación al problema, es que estamos utilizando un modelo teórico en el que hemos introducido expresiones obtenidas experimentalmente, las cuales están acotadas y sólo tienen sentido para el rango de molalidades que se han elegido para hacer dichas disoluciones. Por lo tanto no se puede continuar por esta vía. No obstante se explica a continuación cual era el objetivo del cálculo de los coeficientes osmóticos y de actividad.

El propósito del cálculo de estos coeficientes era poder calcular el incremento de la función de Gibbs, ya que es el principal dato que se debe conocer a la hora de estudiar la viabilidad de un nuevo proceso. La expresión que se iba a utilizar se muestra a continuación, y obviamente requería del conocimiento de dichos coeficientes:

$$\begin{aligned} \Delta_{sep} G(T^E, p^E, m_A^D, b_B^M, r) &= \\ &= \frac{m_A^D}{M_A} \{ \mu_A^*(T^E, p^E) - \mu_A^M(T^E, p^E, b_B^M) \} + m_A^D \frac{(1-r)}{r M_A} \{ \mu_A^R(T^E, p^E, \frac{b_B^M}{1-r}) - \mu_A^M(T^E, p^E, b_B^M) \} \\ &\quad + m_A^D \frac{(1-r)}{r} \frac{b_B^M}{1-r} \{ \mu_B^R(T^E, p^E, \frac{b_B^M}{1-r}) - \mu_B^M(T^E, p^E, b_B^M) \} \end{aligned} \quad (3-26)$$

Las diferencias de potenciales químicos presentes en la expresión 3-26 pueden calcularse si problemas a través de las expresiones 3-27, 3-28, 3-29 haciendo uso de los coeficientes osmóticos y de actividad:

$$\mu_A^*(T^E, p^E) - \mu_A^M(T^E, p^E, b_B^M) = M_A R T \varphi(T^E, p^E, b_B^M) b_B^M \quad (3-27)$$

$$\mu_A^R\left(T^E, p^E, \frac{b_B^M}{1-r}\right) - \mu_A^M(T^E, p^E, b_B^M) = M_A R T \left[\varphi(T^E, p^E, b_B^M) b_B^M - \left[\varphi\left(T^E, p^E, \frac{b_B^M}{1-r}\right) \frac{b_B^M}{1-r} \right] \right] \quad (3-28)$$

$$\mu_B^R\left(T^E, p^E, \frac{b_B^M}{1-r}\right) - \mu_B^M(T^E, p^E, b_B^M) = R T \ln \left\{ \frac{\gamma_B\left(T^E, p^E, \frac{b_B^M}{1-r}\right) \frac{b_B^M}{1-r}}{\gamma_B(T^E, p^E, b_B^M) b_B^M} \right\} \quad (3-29)$$

No obstante no será un impedimento para continuar, y se podrá calcular el mínimo trabajo de separación mediante un camino paralelo.

3.3 Cálculo del límite termodinámico. $\Delta_{sep} G$.

Cómo se ha comprobado el camino anterior no ha permitido alcanzar el objetivo perseguido, el cálculo del límite termodinámico del proceso de separación en la FO. No obstante será posible calcularlo directamente haciendo uso de la siguiente expresión de la función de Gibbs particularizada para disoluciones no electrolíticas como la que estamos estudiando:

$$\Delta_{sep} G(T^E, p^E, b_B^{DSd}, r) = V^{A*} \frac{b_B^{DSd}}{r} \int_{b_B^{DSd}}^{b_B^{DSc}} \frac{\pi(T^E, p^E, b_B)}{b_B^2} db_B \quad (3-30)$$

Se observa que la ecuación 3-30 depende de la molalidad de la sustancia, y puesto que no conocemos el peso molecular del soluto SSP es imposible como se dijo anteriormente obtener las molalidades a partir de la concentración en peso. Por ello con el objeto de retomar el estudio de la disolución SSP y establecer diferencias con la PSSP11, se va poner la ecuación 3-30 en función de la fracción molar, w , mediante una serie de transformaciones mostradas a continuación.

Para ellos vamos a introducir las ecuaciones 3-31 y 3-32 para obtener así la ecuación deseada, 3-33:

$$b_B = \frac{w}{(1-w)M_B} \quad (3-31)$$

$$b_{BDSd} = \frac{b_{BDSd}}{1-r} \quad (3-32)$$

$$(3-33) \quad \frac{\Delta_{sep}G(T^E, p^E, w)}{V^{A*}} = \frac{1}{1 - \frac{w_{DSd}(1-w_{DSc})}{w_{DSc}(1-w_{DSd})}} \frac{w_{DSd}}{(1-w_{DSd})} \int_{w_{DSd}}^{w_{DSc}} \pi(T^E, p^E, w) \frac{dw}{w^2} \quad (3-33)$$

Una vez obtenida la expresión anterior, calcularemos el valor de $\frac{\Delta_{sep}G(T^E, p^E, b_B^{DSd}, r)}{V^{A*}} \left[\frac{J}{m^3} \right]$, para un rango de valores de fracción molar concentrada, w_{DSc} , y fracción molar diluida, w_{DSd} , donde las disoluciones están caracterizadas. De este modo se obtendrá los valores de los mínimos trabajos de separación para las dos disoluciones estudiadas, SSP y PSSP11.

3.3.1 Trabajo mínimo de separación de la disolución SSP.

La ecuación 3-33 requiere de la expresión de la presión osmótica en función de la fracción másica y de lo que se dispone es de dicha expresión en función de la molalidad. Por tanto habrá que calcularla previamente al límite termodinámico. Todos los datos necesarios vienen en la tabla 3-1. El único cambio realizado ha sido pasar las presiones expresadas en atmósferas la unidad del SI, pascuales. Con los cuatros puntos que vienen en la tabla y una aproximación polinómica de segundo grado se consigue una ecuación que representa el comportamiento real de la sustancia de manera fiables. La ecuación presión osmótica-fracción molar de la disolución SSP es:

$$\pi = -2,786,437.50w^2 + 12,994,931.25w - 382,501.875 \quad (3-34)$$

Ahora si se puede particularizar la ecuación 3-33 para disolución SSP:

$$\frac{\Delta_{sep}G(T^E, p^E, w)}{V^{A*}} = \frac{1}{1 - \frac{w_{DSd}(1 - w_{DSc})}{w_{DSc}(1 - w_{DSd})}} \frac{w_{DSd}}{(1 - w_{DSd})} \int_{w_{DSd}}^{w_{DSc}} (-2,786,437.50w^2 + 12,994,931.25w - 382,501.875) \frac{dw}{w^2}$$

En la siguiente tabla, 3-12, se muestran los resultados de los límites termodinámicos del proceso de separación de la disolución SSP, donde los valores de la columna horizontal son las fracciones másicas de la disolución disuelta, w_{DSd} , y los valores de la columna vertical representa la razón de conversión del proceso de FO, cuya ecuación, 3-36, se representa a continuación:

$$r_{FO} = \frac{m^{A*}}{m_{DSd}^A} \quad (3-35)$$

- m^{A*} = masa de agua dulce
- m_{DSd}^A = masa de agua en la disolución disuelta

La siguiente ecuación ha permitido obtener la razón de conversión en función de las concentraciones:

$$r_{FO} = 1 - \frac{w_{DSd}(1 - w_{DSc})}{w_{DSc}(1 - w_{DSd})} \quad (3-36)$$

Separación térmica en soluciones extractoras de ósmosis directa: Aplicación a desalación de agua de mar

Tabla 3-12. Mínimo trabajo de separación [KJ/m³] de la disolución SSP.

		W_DSD												
		0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375	0.4
t	0.1	948.6	1269.7	1586.1	1897.9	2205.2	2508.0	2806.2	3100.1	3389.5	3674.5	3955.2	4231.6	4503.7
	0.125	964.7	1288.9	1608.1	1922.5	2232.0	2536.7	2836.6	3131.8	3422.4	3708.3	3989.6	4266.4	4538.7
	0.15	981.3	1308.7	1630.8	1947.7	2259.5	2566.1	2867.7	3164.3	3456.0	3742.8	4024.8	4302.0	4574.5
	0.175	998.5	1329.2	1654.3	1973.8	2287.8	2596.4	2899.7	3197.7	3490.5	3778.1	4060.7	4338.3	4611.0
	0.2	1016.2	1350.3	1678.4	2000.6	2316.9	2627.5	2932.5	3231.9	3525.8	3814.2	4097.4	4375.4	4648.2
	0.225	1034.6	1372.2	1703.4	2028.3	2347.0	2659.6	2966.2	3266.9	3561.9	3851.2	4135.0	4413.2	4686.1
	0.25	1053.7	1394.9	1729.2	2056.9	2377.9	2692.5	3000.8	3303.0	3599.0	3889.1	4173.3	4451.9	4724.8
	0.275	1073.5	1418.3	1755.9	2086.3	2409.8	2726.5	3036.5	3339.9	3637.0	3927.9	4212.6	4491.4	4764.3
	0.3	1094.0	1442.7	1783.5	2116.8	2442.8	2761.5	3073.1	3377.9	3676.0	3967.6	4252.8	4531.7	4804.6
	0.325	1115.4	1467.9	1812.2	2148.4	2476.8	2797.5	3110.9	3417.0	3716.1	4008.4	4293.9	4573.0	4845.8
	0.35	1137.6	1494.1	1841.9	2181.0	2511.9	2834.7	3149.8	3457.2	3757.3	4050.2	4336.1	4615.2	4887.8
	0.375	1160.8	1521.4	1872.7	2214.8	2548.3	2873.2	3189.8	3498.5	3799.5	4093.0	4379.3	4658.4	4930.8
	0.4	1184.9	1549.8	1904.7	2249.9	2585.9	2912.9	3231.2	3541.1	3843.0	4137.0	4423.5	4702.7	4974.7
	0.425	1210.2	1579.4	1938.0	2286.3	2624.9	2953.9	3273.9	3585.0	3887.7	4182.2	4468.9	4747.9	5019.6
	0.45	1236.6	1610.3	1972.7	2324.2	2665.3	2996.4	3317.9	3630.3	3933.7	4228.7	4515.4	4794.3	5065.5
	0.475	1264.2	1642.6	2008.8	2363.5	2707.2	3040.4	3363.5	3676.9	3981.1	4276.4	4563.2	4841.8	5112.5
	0.5	1293.2	1676.3	2046.5	2404.5	2750.8	3086.0	3410.6	3725.1	4030.0	4325.5	4612.3	4890.5	5160.6
	0.525	1323.8	1711.7	2086.0	2447.2	2796.1	3133.3	3459.4	3774.9	4080.3	4376.1	4662.6	4940.4	5209.8
	0.55	1355.9	1748.9	2127.3	2491.8	2843.3	3182.5	3510.0	3826.4	4132.3	4428.1	4714.4	4991.6	5260.2
	0.575	1389.8	1788.0	2170.5	2538.4	2892.5	3233.6	3562.4	3879.7	4185.9	4481.7	4767.7	5044.2	5311.8
0.6	1425.6	1829.2	2216.0	2587.2	2943.9	3286.8	3616.9	3934.8	4241.3	4537.0	4822.5	5098.2	5364.7	
0.625	1463.6	1872.6	2263.8	2638.4	2997.5	3342.3	3673.5	3992.0	4298.6	4594.0	4878.9	5153.7	5419.0	
0.65	1504.0	1918.7	2314.2	2692.1	3053.7	3400.1	3732.3	4051.3	4357.9	4652.9	4936.9	5210.7	5474.7	
0.675	1547.0	1967.5	2367.4	2748.7	3112.6	3460.5	3793.6	4112.9	4419.3	4713.7	4996.8	5269.3	5531.8	
0.7	1593.0	2019.4	2423.8	2808.2	3174.4	3523.7	3857.5	4176.9	4483.0	4776.6	5058.5	5329.6	5590.4	
0.725	1642.4	2074.7	2483.6	2871.2	3239.4	3589.9	3924.2	4243.5	4549.0	4841.6	5122.2	5391.7	5650.7	
0.75	1695.5	2134.0	2547.2	2937.8	3307.9	3659.4	3993.9	4312.9	4617.5	4908.9	5187.9	5455.6	5712.5	
0.775	1753.0	2197.6	2615.1	3008.5	3380.2	3732.4	4066.9	4385.2	4688.8	4978.6	5255.9	5521.5	5776.2	
0.8	1815.5	2266.2	2687.8	3083.7	3456.7	3809.3	4143.4	4460.8	4762.9	5050.9	5326.1	5589.4	5841.6	
0.825	1883.8	2340.5	2765.9	3163.9	3537.9	3890.4	4223.7	4539.7	4840.0	5126.0	5398.8	5659.4	5908.9	
0.85	1958.9	2421.4	2850.1	3249.8	3624.2	3976.1	4308.2	4622.4	4920.5	5203.9	5474.0	5731.7	5978.2	
0.875	2042.1	2509.9	2941.4	3342.0	3716.1	4066.9	4397.2	4709.1	5004.5	5285.0	5551.9	5806.4	6049.5	
0.9	2135.2	2607.3	3040.7	3441.5	3814.5	4163.3	4491.1	4800.0	5092.2	5369.3	5632.7	5883.6	6123.1	
0.925	2240.2	2715.5	3149.4	3549.1	3919.9	4265.9	4590.3	4895.6	5184.0	5457.1	5716.5	5963.4	6198.9	
0.95	2360.2	2836.5	3269.1	3666.1	4033.4	4375.4	4695.5	4996.3	5280.1	5548.7	5803.6	6046.0	6277.1	
0.975	2499.4	2973.3	3401.9	3794.0	4156.0	4492.5	4807.1	5102.5	5381.0	5644.3	5894.1	6131.5	6357.7	
1	2663.5	3129.5	3550.1	3934.4	4288.8	4618.1	4925.8	5214.6	5486.8	5744.1	5988.1	6220.1	6441.0	

3.3.2 Trabajo mínimo de separación de la disolución PSSP11

Del mismo modo pero para disolución PSSP11, la ecuación que representa el límite termodinámico del proceso de separación es:

$$\frac{\Delta_{sep}G(T^E, p^E, w)}{VA^*}$$

$$= \frac{1}{1 - \frac{w_{DSd}(1 - w_{DSc})}{w_{DSc}(1 - w_{DSd})}} \frac{w_{DSd}}{(1 - w_{DSd})} \int_{w_{DSd}}^{w_{DSc}} (9448556.25w^2 + 4335190.125 + 220635.18) \frac{dw}{w^2}$$

La siguiente tabla, 3-13, al igual que la anterior muestra los resultados de los límites termodinámicos del proceso de separación de la disolución PSSP11, donde los valores de la columna horizontal son las fracciones másicas de la disolución disuelta, w_{DSd} , y los valores de la columna vertical representa la razón de conversión del proceso de FO.

Tabla 3-13. Mínimo trabajo de separación [KJ/m³] de la disolución PSSP11.

		W_DSd												
		0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375	0.4
t	0.1	778.7	949.5	1132.6	1327.8	1535.1	1754.4	1985.6	2228.6	2483.3	2749.6	3027.4	3316.6	3617.2
	0.125	787.0	960.3	1146.0	1344.0	1554.1	1776.2	2010.3	2256.1	2513.6	2782.6	3063.0	3354.7	3657.5
	0.15	795.6	971.5	1159.9	1360.7	1573.8	1798.8	2035.8	2284.5	2544.8	2816.5	3099.6	3393.8	3699.1
	0.175	804.5	983.1	1174.4	1378.2	1594.2	1822.2	2062.2	2313.9	2577.1	2851.7	3137.4	3434.2	3741.8
	0.2	813.8	995.3	1189.5	1396.3	1615.4	1846.6	2089.6	2344.4	2610.5	2888.0	3176.5	3475.8	3785.8
	0.225	823.5	1007.9	1205.2	1415.2	1637.5	1871.8	2118.1	2375.9	2645.2	2925.5	3216.8	3518.8	3831.2
	0.25	833.7	1021.1	1221.6	1434.8	1660.4	1898.1	2147.7	2408.7	2681.0	2964.4	3258.5	3563.1	3878.0
	0.275	844.3	1034.9	1238.8	1455.4	1684.4	1925.5	2178.4	2442.8	2718.3	3004.7	3301.6	3608.9	3926.3
	0.3	855.4	1049.4	1256.7	1476.8	1709.4	1954.0	2210.4	2478.1	2756.9	3046.4	3346.3	3656.3	3976.1
	0.325	867.0	1064.5	1275.4	1499.2	1735.5	1983.8	2243.7	2515.0	2797.1	3089.7	3392.5	3705.3	4027.6
	0.35	879.3	1080.4	1295.1	1522.7	1762.8	2014.9	2278.5	2553.3	2838.8	3134.7	3440.5	3756.0	4080.7
	0.375	892.1	1097.1	1315.7	1547.3	1791.4	2047.4	2314.8	2593.3	2882.3	3181.4	3490.3	3808.5	4135.8
	0.4	905.7	1114.7	1337.5	1573.2	1821.4	2081.4	2352.8	2635.0	2927.6	3230.0	3542.0	3863.0	4192.7
	0.425	920.0	1133.3	1360.3	1600.4	1852.9	2117.1	2392.5	2678.6	2974.8	3280.6	3595.7	3919.5	4251.7
	0.45	935.2	1152.9	1384.5	1629.1	1886.0	2154.6	2434.2	2724.2	3024.1	3333.4	3651.5	3978.1	4312.8
	0.475	951.3	1173.7	1410.0	1659.4	1920.9	2194.0	2477.9	2772.0	3075.7	3388.4	3709.7	4039.1	4376.2
	0.5	968.4	1195.8	1437.1	1691.4	1957.8	2235.5	2523.9	2822.1	3129.6	3445.9	3770.4	4102.5	4442.0
	0.525	986.6	1219.2	1465.8	1725.3	1996.8	2279.3	2572.2	2874.7	3186.2	3506.0	3833.6	4168.6	4510.3
	0.55	1006.1	1244.3	1496.4	1761.4	2038.1	2325.7	2623.3	2930.1	3245.5	3568.9	3899.7	4237.4	4581.4
	0.575	1027.0	1271.1	1529.1	1799.7	2082.0	2374.7	2677.1	2988.5	3307.9	3634.9	3968.8	4309.2	4655.4
	0.6	1049.4	1299.8	1564.1	1840.7	2128.7	2426.8	2734.2	3050.0	3373.6	3704.2	4041.2	4384.1	4732.5
	0.625	1073.7	1330.8	1601.6	1884.6	2178.5	2482.2	2794.7	3115.1	3442.8	3777.0	4117.0	4462.5	4812.9
	0.65	1100.1	1364.3	1642.1	1931.7	2231.8	2541.3	2859.0	3184.1	3515.9	3853.6	4196.7	4544.5	4896.8
	0.675	1128.7	1400.7	1685.9	1982.5	2289.1	2604.4	2927.5	3257.4	3593.2	3934.4	4280.4	4630.5	4984.4
	0.7	1160.2	1440.4	1733.4	2037.3	2350.7	2672.2	3000.7	3335.3	3675.2	4019.8	4368.5	4720.8	5076.2
0.725	1194.8	1483.9	1785.3	2097.0	2417.3	2745.0	3079.0	3418.4	3762.3	4110.2	4461.4	4815.6	5172.3	
0.75	1233.2	1531.9	1842.2	2162.0	2489.6	2823.7	3163.2	3507.3	3855.1	4206.0	4559.6	4915.4	5273.1	
0.775	1276.1	1585.2	1904.9	2233.2	2568.3	2908.9	3254.0	3602.6	3954.0	4307.8	4663.5	5020.6	5378.9	
0.8	1324.5	1644.8	1974.6	2311.8	2654.6	3001.7	3352.1	3705.1	4060.0	4416.3	4773.6	5131.7	5490.3	
0.825	1379.7	1712.1	2052.6	2398.9	2749.5	3103.0	3458.6	3815.7	4173.6	4532.1	4890.7	5249.3	5607.6	
0.85	1443.4	1788.8	2140.5	2496.3	2854.5	3214.3	3574.8	3935.5	4296.0	4656.0	5015.3	5373.8	5731.4	
0.875	1517.9	1877.4	2240.7	2605.9	2971.7	3337.3	3702.1	4065.8	4428.2	4789.1	5148.4	5506.1	5862.2	
0.9	1606.8	1981.2	2356.3	2730.6	3103.4	3474.0	3842.3	4208.1	4571.4	4932.3	5290.8	5646.9	6000.7	
0.925	1715.2	2104.8	2491.3	2874.0	3252.6	3627.1	3997.6	4364.3	4727.4	5087.1	5443.6	5797.1	6147.7	
0.95	1851.4	2255.5	2651.9	3041.0	3423.5	3799.9	4170.8	4536.6	4897.9	5254.9	5608.1	5957.7	6303.9	
0.975	2029.3	2444.2	2846.7	3238.6	3621.6	3996.9	4365.4	4728.0	5085.2	5437.6	5785.7	6129.9	6470.4	
1	2274.6	2689.5	3089.3	3476.9	3854.7	4224.0	4586.1	4941.9	5292.1	5637.4	5978.3	6315.1	6648.3	

Para la obtención de las dos tablas anteriores, 3-12 y 3-13, hemos utilizado el programa Microsoft Excel y hemos calculado las expresiones del mínimo trabajo de separación, tanto del SSP como del PSSP11, para un rango de valores de las fracciones molares, concentradas y diluidas. Este rango está acotado por el experimento sobre el cual estamos trabajando, ya que disponemos de las propiedades de nuestras *draw solutions* para las concentraciones $0.1 < w_{DS} < 0.4$. Por lo tanto todos los valores de los límites termodinámicos mostrados en las anteriores no son válidos ya que hay valores asociados a concentraciones de la disolución concentrada mayores de 0.4.

Con la expresión que se muestra a continuación, 3-38, y con los valores de la razón de conversión r_{FO} y concentración de la disolución diluida, w_{DSd} , podemos acotar los valores de los límites termodinámicos y seleccionar aquellos para los cuales la sustancia está caracterizada y sobre los cuales vamos a trabajar.

$$W_{DSc} = \frac{W_{DSd}}{1 - r_{recovery} + W_{DSd} r_{recovery}} \quad (3-37)$$

A continuación se muestra una tabla, dónde al igual que en la 3-12 y 3-13 la columna horizontal re presenta los valores de la concentración de la disolución diluida, w_{DSd} , y la vertical los valores de la razón de conversión, r_{FO} , pero los valores de las celdas centrales no son los límites termodinámicos sino los valores de las concentraciones de la disoluciones concentradas, w_{DSc} .

Tabla 3-14. Valores de la fracción másica de la disolución concentrada, w_{DS} .

■ Valores de la concentración de la disolución concentrada ≤ 0.4 .

■ Valores de la concentración de la disolución concentrada > 0.4 .

		W_DSd												
		0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375	0.4
T	0.1	0.11	0.14	0.16	0.19	0.22	0.24	0.27	0.30	0.32	0.35	0.37	0.40	0.43
	0.125	0.11	0.14	0.17	0.20	0.22	0.25	0.28	0.30	0.33	0.35	0.38	0.41	0.43
	0.15	0.12	0.14	0.17	0.20	0.23	0.25	0.28	0.31	0.34	0.36	0.39	0.41	0.44
	0.175	0.12	0.15	0.18	0.20	0.23	0.26	0.29	0.31	0.34	0.37	0.39	0.42	0.45
	0.2	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.29	0.32	0.35	0.38	0.40	0.43	0.45
	0.225	0.13	0.16	0.19	0.21	0.24	0.27	0.30	0.33	0.36	0.38	0.41	0.44	0.46
	0.25	0.13	0.16	0.19	0.22	0.25	0.28	0.31	0.34	0.36	0.39	0.42	0.44	0.47
	0.275	0.13	0.16	0.20	0.23	0.26	0.29	0.31	0.34	0.37	0.40	0.43	0.45	0.48
	0.3	0.14	0.17	0.20	0.23	0.26	0.29	0.32	0.35	0.38	0.41	0.43	0.46	0.49
	0.325	0.14	0.17	0.21	0.24	0.27	0.30	0.33	0.36	0.39	0.42	0.44	0.47	0.50
	0.35	0.15	0.18	0.21	0.25	0.28	0.31	0.34	0.37	0.40	0.43	0.45	0.48	0.51
	0.375	0.15	0.19	0.22	0.25	0.29	0.32	0.35	0.38	0.41	0.44	0.46	0.49	0.52
	0.4	0.16	0.19	0.23	0.26	0.29	0.33	0.36	0.39	0.42	0.45	0.47	0.50	0.53
	0.425	0.16	0.20	0.23	0.27	0.30	0.34	0.37	0.40	0.43	0.46	0.48	0.51	0.54
	0.45	0.17	0.21	0.24	0.28	0.31	0.35	0.38	0.41	0.44	0.47	0.49	0.52	0.55
	0.475	0.17	0.21	0.25	0.29	0.32	0.36	0.39	0.42	0.45	0.48	0.51	0.53	0.56
	0.5	0.18	0.22	0.26	0.30	0.33	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.52	0.55	0.57
	0.525	0.19	0.23	0.27	0.31	0.34	0.38	0.41	0.44	0.47	0.50	0.53	0.56	0.58
	0.55	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.39	0.43	0.46	0.49	0.52	0.54	0.57	0.60
	0.575	0.21	0.25	0.29	0.33	0.37	0.41	0.44	0.47	0.50	0.53	0.56	0.59	0.61
0.6	0.22	0.26	0.31	0.35	0.38	0.42	0.45	0.49	0.52	0.55	0.57	0.60	0.63	
0.625	0.23	0.28	0.32	0.36	0.40	0.44	0.47	0.50	0.53	0.56	0.59	0.62	0.64	
0.65	0.24	0.29	0.34	0.38	0.42	0.45	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.63	0.66	
0.675	0.25	0.31	0.35	0.39	0.43	0.47	0.51	0.54	0.57	0.60	0.62	0.65	0.67	
0.7	0.27	0.32	0.37	0.41	0.45	0.49	0.53	0.56	0.59	0.62	0.64	0.67	0.69	
0.725	0.29	0.34	0.39	0.44	0.48	0.51	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	
0.75	0.31	0.36	0.41	0.46	0.50	0.54	0.57	0.60	0.63	0.66	0.68	0.71	0.73	
0.775	0.33	0.39	0.44	0.49	0.53	0.56	0.60	0.63	0.66	0.68	0.71	0.73	0.75	
0.8	0.36	0.42	0.47	0.51	0.56	0.59	0.63	0.65	0.68	0.71	0.73	0.75	0.77	
0.825	0.39	0.45	0.50	0.55	0.59	0.62	0.66	0.68	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	
0.85	0.43	0.49	0.54	0.59	0.63	0.66	0.69	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82	
0.875	0.47	0.53	0.59	0.63	0.67	0.70	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.83	0.84	
0.9	0.53	0.59	0.64	0.68	0.71	0.74	0.77	0.79	0.81	0.83	0.84	0.86	0.87	
0.925	0.60	0.66	0.70	0.74	0.77	0.79	0.82	0.83	0.85	0.87	0.88	0.89	0.90	
0.95	0.69	0.74	0.78	0.81	0.83	0.85	0.87	0.88	0.90	0.91	0.92	0.92	0.93	
0.975	0.82	0.85	0.88	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94	0.94	0.95	0.96	0.96	0.96	
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	

La gráfica muestra que realmente disponemos para el estudio de menos del 50% de los valores de los límites termodinámicos, por el simple hecho de que la sustancia no esta definida para valores de concentración superiores a 0.4. Podrían extrapolarse curvas pero es probable que se obtengan resultados erróneos, que no representarían el comportamiento real de la sustancia. Por ello a partir de ahora, para la continuación del presente análisis contaremos con estos valores acotados de la disolución que tendrán como máximo una concentración de $w_{DS}=0.4$.

4 ESTUDIO DE LA ESPONTANEIDAD DEL PROCESO FO

Los resultados mostrados en la tabla anterior, 3-14, muestran un rango de valores para los cuales tenemos perfectamente definida nuestras disoluciones. A continuación, de lo que se trata es de hacer un análisis de estos valores acotados de las concentraciones y seleccionar aquellos que sean válidos para el proceso de la FO.

Un valor de la concentración de la disolución diluida, w_{DSd} , será válido cuando de forma natural sea capaz de establecer un flujo de agua entre ambas caras de la membrana semipermeable de forma ininterrumpida, del tanque de agua de mar hacia el de la draw solution. Pero para ello se tiene que dar unas condiciones en cuanto a presión:

- La presión osmótica de la disolución diluida tiene que ser mayor que la del agua de mar. Es decir, $\pi_{DSd} > \pi_{sw}$.
- La presión osmótica de la disolución concentrada tiene que ser mayor que la de la salmuera, $\pi_{WDC} > \pi_{Br}$. Ya que si no fuera así y sólo se cumpliera la primera condición, el proceso se iniciaría pero al final se tendría el flujo en el momento que en el que la presión osmótica de la salmuera igualase a la de la concentrada.

La siguiente figura, 4-1, muestra de manera gráfica la explicación anterior, dónde se exponen las condiciones para que se produzca el proceso de FO.

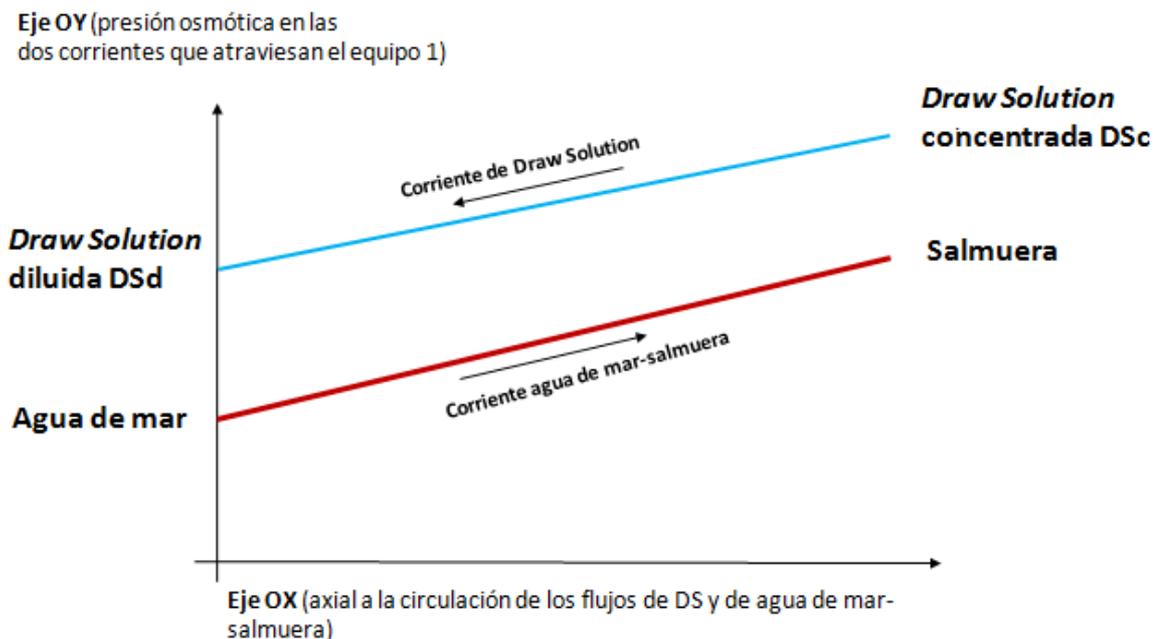


Figura 4-1. Corrientes en el proceso de ósmosis directa producidas en el equipo 1.

Cómo se puede observar y se ha dicho anteriormente, es necesario que la presión de la corriente *draw solution* siempre sea superior al de la corriente agua de mar-salmuera para obtener así un flujo ininterrumpido y de forma espontánea.

4.1 Balance de materia. Ecuaciones

Para poder seleccionar las disoluciones que cumplan este criterio debemos de plantear y resolver un balance de materia que nos permita cerrar el problema, de modo que tengamos totalmente definido los cuatros puntos mostrados en la gráfica anterior, caracterizados por su concentración y flujo másico. Este balance de materia se plantea en el equipo 1, dónde encontramos dos entradas, agua de mar y disolución diluida, y dos salidas, salmuera y disolución concentrada, respectivamente. La siguiente figura, 4-2, muestra con detalle el proceso de FO y el volumen de control dónde se va a realizar el balance de materia:

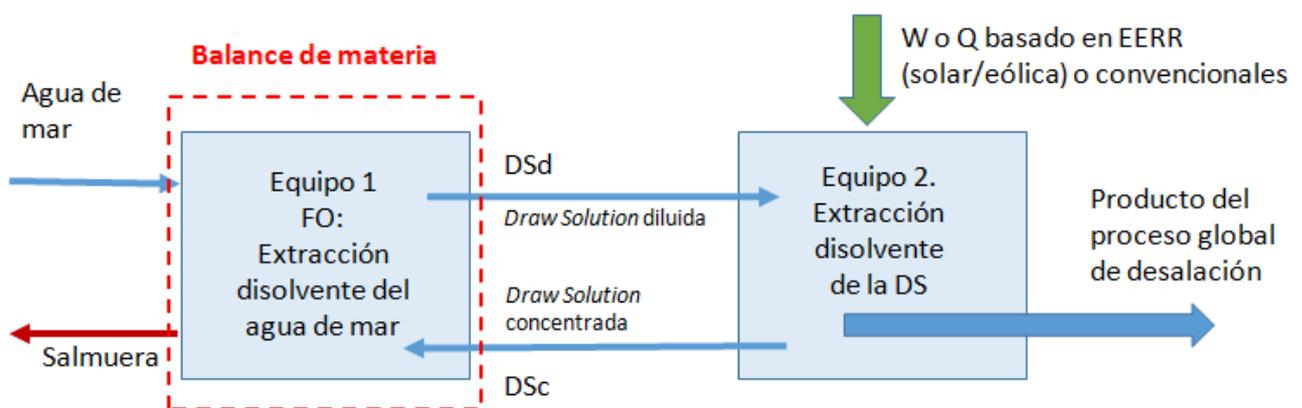


Figura 4-2. Volumen de control para el análisis del equipo 1.

Los datos de partida y necesarios para poder resolver el sistema de ecuaciones que se plantea son:

- S_{sw} : Salinidad del agua de mar. Dependiendo de la situación geográfica del agua de mar podemos encontrar tres salinidades: 0.024 [kg/kg]^1, 0.035 [kg/kg] y 0.040 [kg/kg] . Por lo tanto se resolverá para estos tres casos.

¹ Proyecto "Microbial Desalination for Low Energy Drinking Water (MIDES)".

- q_{A+B}^{SW} : Caudal del agua de mar de entrada al equipo 1. Se tomará para el análisis un caudal de 1kg/h.
- r_{global} : Razón de conversión del proceso global de desalación. Un valor razonable de la tecnología actual sitúa a este parámetro en 0.45. Este nos viene a indicar el porcentaje de agua dulce obtenida a partir del agua de mar. La siguiente ecuación define el parámetro r_{global} :

$$r_{global} = \frac{q_{A^*}^{FW}}{q_{A+B}^{SW}} \quad (4-1)$$

- $q_{A^*}^{FW}$ = caudal de agua dulce extraída en el equipo 2.
- q_{A+B}^{SW} = caudal de agua de mar.

Otro dato necesario y que se variará en el análisis es la relación de conversión del proceso de recuperación de la *draw solution*, r_{FO} . Este proceso se da en el equipo 2, pero es necesario para poder cerrar el balance de materia en el equipo 1. La siguiente ecuación define el parámetro r_{FO} :

$$r_{FO} = \frac{q_{A^*}^{FW}}{q_A^{DSd}} \quad (4-2)$$

Este parámetro mide la cantidad de agua que en el equipo 2 se extrae de la *draw solution* diluida, permitiendo así saber la concentración de la *draw solution* concentrada.

Estos datos serán suficientes para poder resolver el balance de materia y conocer de este modo los caudales de las cuatro corrientes con sus correspondientes concentraciones.

A modo resumen se detallan las cuatro corrientes que intervienen en el equipo 1. Los subíndices A y B corresponden con disolvente (agua) y soluto, respectivamente.

- Corriente agua de mar, q_{A+B}^{SW}
- Corriente salmuera, q_{A+B}^{Br}
- Corriente disolución diluida, q_{A+B}^{DSd}
- Corriente disolución concentrada, q_{A+B}^{DSc}

La siguiente figura situa las corrientes en sus correspondientes lugares en el equipo 1:

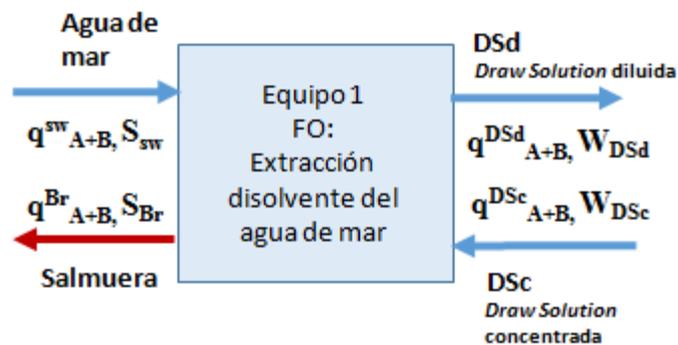


Figura 4-3. Corrientes en el equipo 1.

A continuación se muestran las ecuaciones que han sido utilizadas para la resolución del balance de materia.

Datos conocidos

1. $d_w = 997,13$ [kg/m³]
2. $M_b = 0,06283$ [kg/mol]
3. $R = 8,131472$ [m³ Pa/Kg mol]
4. $T = 298$ [K]
5. $S_{sw} = \{0,024; 0.035; 0.04\}$ [kg/Kg]
6. $q_{sw_{AB}} = 1$ [kg/h]
7. $w_{DSd} = \{0,1 - 0.0375\}$ [kg/Kg]
8. $r_{FO} = \{0,1 - 0.825\}$
9. $r_{global} = 0,45$

La numeración de los parámetros de corresponden con los siguientes parámetros:

1. Densidad del agua. 2. Masa molar aparente de las sales. 3. Constante de los gases. 4. Temperatura del agua de mar y disolución. 5. Salinidades de las diferentes aguas de mar. 6. Caudal del agua de mar. 7. Concentración disolución disluida. 8. Razón de conversión del proceso FO. 9. Razón de conversión del proceso global de desalación.

Comentar que los valores que se encuentran entre corchete son aquellos que irán variando en los diferentes balances de materia, el resto serán fijos.

Ecs. Agua de mar

$$10. q_{swB} = q_{swAB} S_{sw} \quad [\text{kg/h}]$$

$$11. q_{swA} = q_{swAB} - q_{swB} \quad [\text{kg/h}]$$

$$12. p_{i_{sw}} = coef_{osmot_{sw}} d_w R T \frac{S_{sw}}{1-S_{sw}} \quad [\text{Pa}]$$

$$13. coef_{osmot_{sw}} = 8,9453 \cdot 10^{-1} + 4,1561 \cdot 10^{-4} T - 4,6262 \cdot 10^{-6} T^2 + 2,2211 \cdot 10^{-11} T^4 - 1,1445 \cdot 10^{-1} S_{sw} - 1,4783 \cdot 10^{-3} S_{sw} T - 1,3526 \cdot 10^{-8} S_{sw} T^3 + 7,0132 S_{sw}^2 + 5,696 \cdot 10^{-2} S_{sw}^2 T - 2,8624 \cdot 10^{-4} S_{sw}^2 T^2$$

La numeración de los parámetros de corresponden con los siguientes parámetros:

10. Caudal del soluto de agua de mar. 11. Caudal del disolvente del agua de mar. 12. Presión osmótica del agua de mar. 13. Coeficiente osmótico del agua de mar.

Ecs. Salmuera

$$14. q_{BrB} = q_{swB} \quad [\text{kg/h}]$$

$$15. q_{BrA} = q_{swA} - q_{Fw} \quad [\text{kg/h}]$$

$$16. S_{Br} = q_{BrB} / (q_{BrB} + q_{BrA}) \quad [\text{kg/Kg}]$$

$$17. p_{iBr} = coef_{osmotBr} d_w R T \frac{2 \frac{S_{Br}}{1-S_{sw}}}{Mb} \quad [\text{Pa}]$$

$$18. r_{global} = \frac{q_{Fw}}{q_{swA}}$$

$$19. coef_{osmotBr} = 8,9453 \cdot 10^{-1} + 4,1561 \cdot 10^{-4} T - 4,6262 \cdot 10^{-6} T^2 + 2,2211 \cdot 10^{-11} T^4 - 1,1445$$

$$\cdot 10^{-1} S_{Br} - 1,4783 \cdot 10^{-3} S_{Br} T - 1,3526 \cdot 10^{-8} S_{Br} T^3 + 7,0132 S_{Br}^2 + 5,696 \cdot 10^{-2} S_{Br}^2 T - 2,8624$$

$$\cdot 10^{-4} S_{Br}^2 T^2$$

La numeración de los parámetros de corresponden con los siguientes parámetros:

14. Caudal del soluto de la salmuera. 15. Caudal del disolvente de la salmuera. 16. Salinidad de la salmuera. 17. Presión osmótica de la salmuera. 18. Razón de conversión del proceso global de desalación. 19. Coeficiente osmótico de la salmuera.

Ecs. Disolución diluida

$$20. w_{Dsd} = \frac{q_{DsdB}}{q_{DsdB} + q_{DsdA}} \quad [\text{kg/Kg}]$$

$$21. p_{iDsd} = -2786437,5 W_{Dsd}^2 + 12994931,25 W_{Dsd} - 382501,875 \quad [\text{Pa}]$$

$$22. r_{FO} = \frac{q_{Fw}}{q_{DsdA}}$$

Ecs. Disolución concentrada

$$23. q_{DSCB} = q_{DsdB} \quad [\text{kg/h}]$$

$$24. w_{DSc} = \frac{W_{Dsd}}{1-r_{FO}+W_{Dsd}*r_{FO}} \quad [\text{kg/Kg}]$$

$$25. p_{iDSc} = -2786437,5 W_{DSc}^2 + 12994931,25 W_{DSc} - 382501,875 \quad [\text{Pa}]$$

La numeración de los parámetros de corresponden con los siguientes parámetros:

20. Concentración de la disolución diluida. 21. Presión osmótica de la disolución diluida. 22. Razón de conversión del proceso FO. 23. Caudal del soluto de la disolución concentrada. 24. Concentración de la disolución concentrada. 25. Presión osmótica de la disolución concentrada.

Este balance ha sido resuelto para ambas disoluciones, SSP y PSSP11, teniendo en cuenta la casuística:

- $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg]

$$W_{Dsd} = (0.1; 0.125; 0.15; 0.175; 0.2; 0.225; 0.25; 0.275; 0.3; 0.325; 0.35; 0.375) \text{ [kg/kg]}$$

$r_{FO} = (0.1-0.825)$. Para cada concentración W_{Dsd} , el rango de r_{FO} ha sido variado de manera que se obtuvieran resultados dentro de los valores acotados.

- $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg]

$$W_{Dsd} = (0.1; 0.125; 0.15; 0.175; 0.2; 0.225; 0.25; 0.275; 0.3; 0.325; 0.35; 0.375) \text{ [kg/kg]}$$

$$r_{FO} = (0.1-0.825).$$

- $S_{sw} = 0.04$ [kg/kg]

$$W_{Dsd} = (0.1; 0.125; 0.15; 0.175; 0.2; 0.225; 0.25; 0.275; 0.3; 0.325; 0.35; 0.375) \text{ [kg/kg]}$$

$$r_{FO} = (0.1-0.825).$$

Obteniéndose de este modo un total de 36 tablas para cada disolución, en las cuales viene perfectamente definidas las cuatro corrientes principales del proceso, Agua de mar, Salmuera, Disolución diluida y Disolución concentrada. Una vez obtenido los resultados que permiten caracterizar dichos flujos, se procede a la selección de aquellos puntos que generan la corriente de agua de forma continuada a través de la membrana provocado por el fenómeno de la FO. De tal forma que puedan ser estudiados más a fondo y llegar a la conclusión de si son o no buenos candidatos para dicho proceso.

4.2 Espontaneidad. Influencia de la salinidad

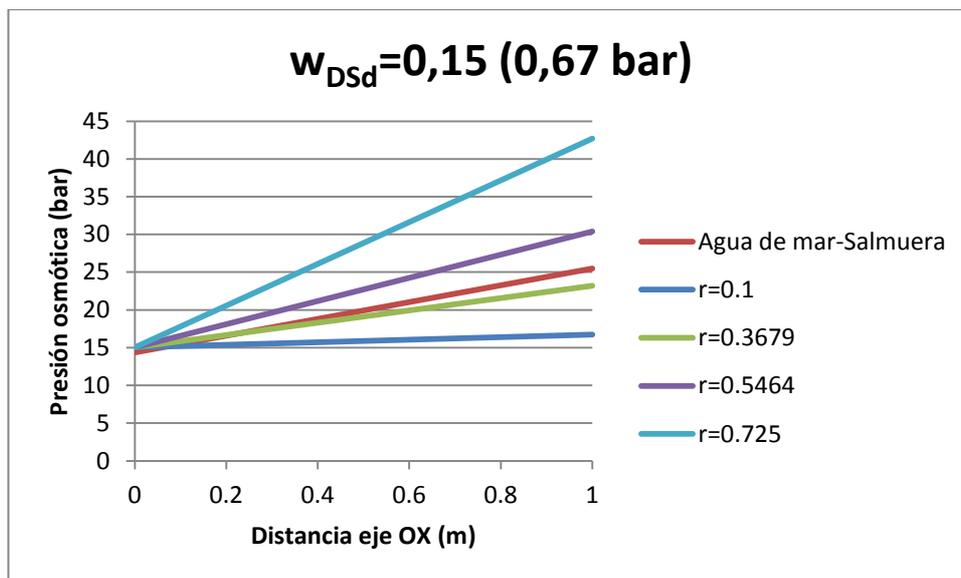
A continuación, vamos analizar y comparar el proceso de la *Forward Osmosis* para ambas sustancias. Se va a realizar un análisis viendo la influencia de la salinidad del mar y de la concentración de las disoluciones en la espontaneidad. Se va a comenzar a analizar la disolución SSP y seguidamente continuaremos y terminaremos con la PSSP11.

4.2.1 Espontaneidad. Influencia de la salinidad. SSP

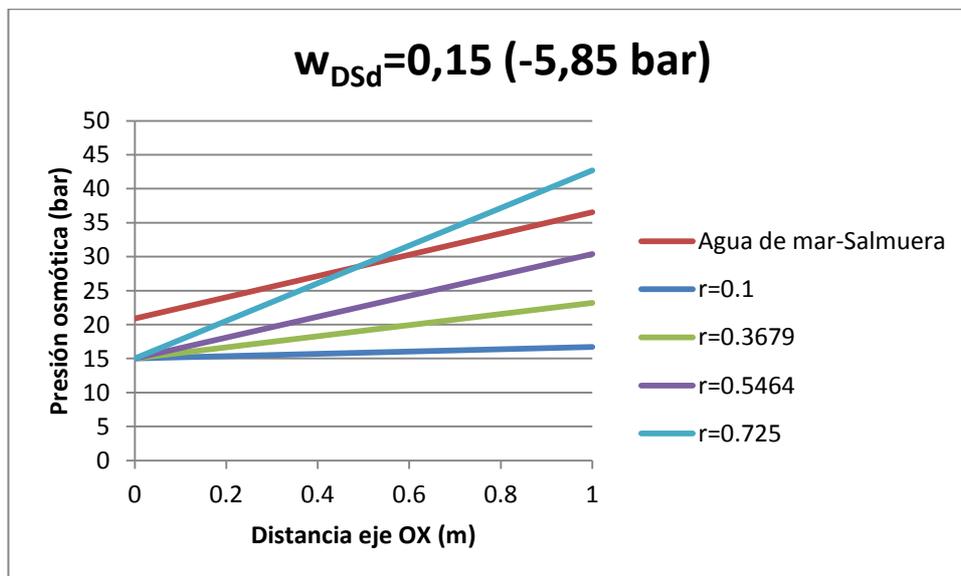
Para llevar a cabo el estudio de la influencia de la salinidad en el proceso de FO de la disolución SSP, se han representado tres gráficas dónde la concentración de la disolución de entrada w_{DSd} es la misma, de tal modo que los cambios que se vean entre las tres gráficas viene dado por las diferentes salinidades.

En las gráficas se ha representado en el eje Y la presión osmótica, expresada en bares, y en el eje X la distancia recorrida por las corrientes en la etapa 1 del proceso de FO, de manera que el 0 representa la entrada y el 1 la salida. Continuando con la explicación de la gráfica, cada una de ellas contiene representado en rojo la corriente de agua de mar-salmuera, y la corriente disolución diluida-concentrada vienen representadas en varios colores. Cada uno de esos colores se corresponde con un valor de la razón de conversión del proceso de recuperación de la *draw solution*, definida anteriormente r_{FO} . Dichos valores de r_{FO} , han sido seleccionando de manera que se represente de la mejor manera posible el proceso de espontaneidad, correspondiéndose el primer y último valor de la r_{FO} con el mínimo y máximo valor que puede tomar para la concentración de la disolución de entrada (diluida) y la salinidad de agua de mar elegida.

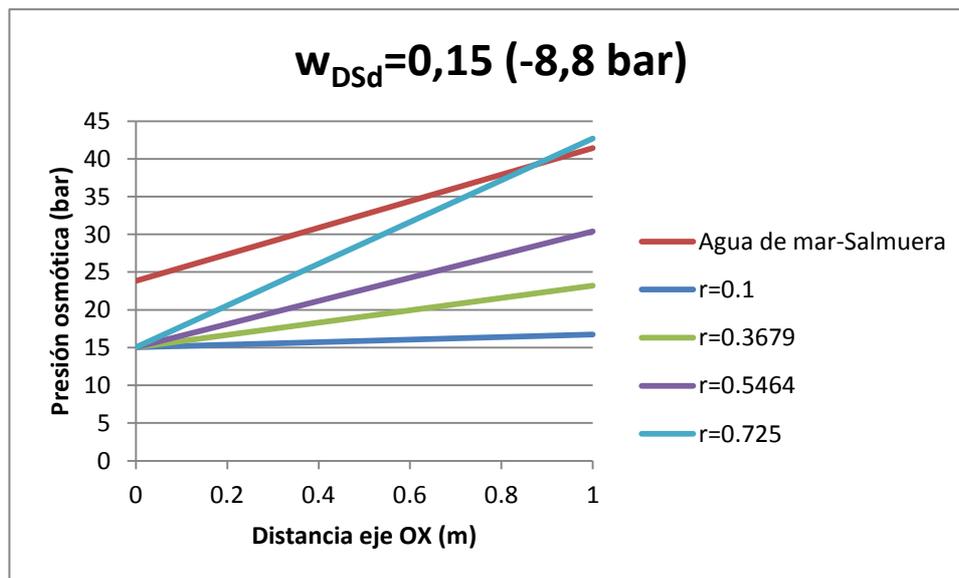
A continuación se muestran las 3 gráficas asociadas a las 3 salinidades estudiadas para una concentración de disolución diluida de $w_{DSd} = 0.15$. Esta concentración equivale al mismo tiempo a una diferencia de presiones osmóticas entre la disolución diluida de entrada y el agua de mar, representada entre paréntesis al lado la concentración.



Gráfica 4-1. Corrientes en el proceso de FO de la disolución SSP para $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg] y $w_{DSd} = 0.15$.



Gráfica 4-2. Corrientes en el proceso de FO de la disolución SSP para $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg] y $w_{DSd} = 0.15$.



Gráfica 4-3. Corrientes en el proceso de FO de la disolución SSP para $S_{sw} = 0.04$ [kg/kg] y $w_{Dsd} = 0.15$.

Se puede observar que un aumento en la salinidad del mar reduce el incremento de presión osmótica, responsable del proceso Forwards Osmosis, hasta tal punto que dicho fenómeno no llegue a darse, por lo tanto será un factor a tener muy en cuenta a la hora de estudiar la viabilidad de la sustancia. Esto se ve reflejado en las presiones alcanzadas para las distintas salinidades:

$$- S_{sw} = 0.024[\text{kg/kg}] \rightarrow p_{i_{w_{Dsd}}} - p_{i_{sw}} = 0.67 \text{ [bar]}$$

$$- S_{sw} = 0.035[\text{kg/kg}] \rightarrow p_{i_{w_{Dsd}}} - p_{i_{sw}} = -5.85 \text{ [bar]}$$

$$- S_{sw} = 0.04 \text{ [kg/kg]} \rightarrow p_{i_{w_{Dsd}}} - p_{i_{sw}} = -8.8 \text{ [bar]}$$

Si se analiza cada una de las gráficas por separado por separado, se puede decir lo siguiente:

-Gráfica 4-1. El proceso de espontaneidad se consigue y mantiene para una $r_{FO} = 0.5464$. Aunque el valor exacto de la razón de conversión que cumple ambos criterios de la espontaneidad y continuidad, $\pi_{Dsd} > \pi_{sw}$ y $\pi_{Wdc} > \pi_{Br}$, es $r_{FO} = 0.4571$.

La siguiente tabla resume los valores de las concentraciones a partir de la cual empieza a darse el proceso de espontaneidad. Para una concentración $w_{DSd}=0.15$ la espontaneidad comienza a partir de una r_{FO} mínima de 0.457, hasta la concentración $w_{DSd}=0.225$ a partir de la cual, cualquier r_{FO} es válido, es decir que para las concentraciones desde 0.225 hasta 0.375 el proceso es posible con una $r_{FO} \geq 0.1$, que es el valor mínimo estudiado. Se habla de valores mayores o iguales, ya que en esta tabla no se muestra la cota superior del r_{FO} , sí mostradas en la tabla 3-14.

Tabla 4-1. Valores de la concentración de la disolución diluida, w_{DSd} , y razón de conversión r_{FO} necesarios mínimos para que se produzca la espontaneidad del proceso, para $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg].

Concentración disolución diluida W_{DSd}	Razón de conversión r_{FO}
0.15	≥ 0.4571
0.175	≥ 0.3464
0.2	≥ 0.2125
0.225	≥ 0.1

-Gráfica 4-2. Debido al aumento de salinidad del agua de mar, se puede comprobar la incompatibilidad de esta sustancia para el proceso de FO, al menos para la concentración de la disolución diluida, $W_{DSd} = 0.15$. Para trabajar con esta salinidad, tendríamos que irnos a valores de $W_{DSd} \geq 0.2$ y $r_{FO} \geq 0.5125$.

A continuación se muestra la misma tabla pero para la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg], con los valores mínimos de r_{FO} para cada concentración necesarios para el proceso de FO:

Tabla 4-2. Valores de la concentración de la disolución diluida, w_{DSd} , y razón de conversión r_{FO} necesarios para la espontaneidad del proceso, para $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg].

Concentración disolución diluida W_{DSd}	Razón de conversión r_{FO}
0.2	≥ 0.5125
0.225	≥ 0.4536
0.25	≥ 0.3667
0.275	≥ 0.2806
0.3	≥ 0.1556
0.325	≥ 0.1

-Gráfica 4-3. El mal comportamiento de la disolución SSP se acentúa aún más con el aumento de la salinidad hasta $S_{sw} = 0.040$ [kg/kg], ya que se consiguen presiones aún más bajas que para la salinidad anterior imposibilitando el fenómeno de FO. Se tiene que llegar a valores de $W_{DSd} \geq 0.225$ y $r_{FO} \geq 0.55$ para que se produzca la espontaneidad del proceso. Se muestra a continuación una tabla, que al igual que en los otros dos casos anteriores resume para cada concentración el valor mínimo de r_{FO} para que tenga lugar la espontaneidad:

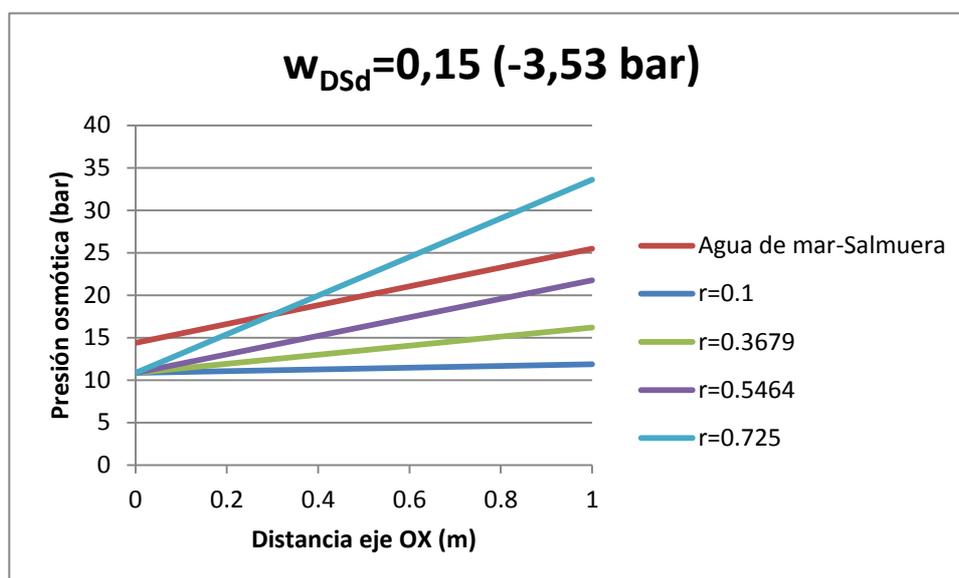
Tabla 4-3. Valores de la concentración de la disolución diluida, w_{DSd} , y razón de conversión r_{FO} necesarios para la espontaneidad del proceso para $S_{sw} = 0.040$ [kg/kg].

Concentración disolución diluida W_{DSd}	Razón de conversión r_{FO}
0.225	≥ 0.55
0.25	≥ 0.4556
0.275	≥ 0.3889
0.3	≥ 0.3222
0.325	≥ 0.2167
0.35	≥ 0.1188
0.375	≥ 0.1

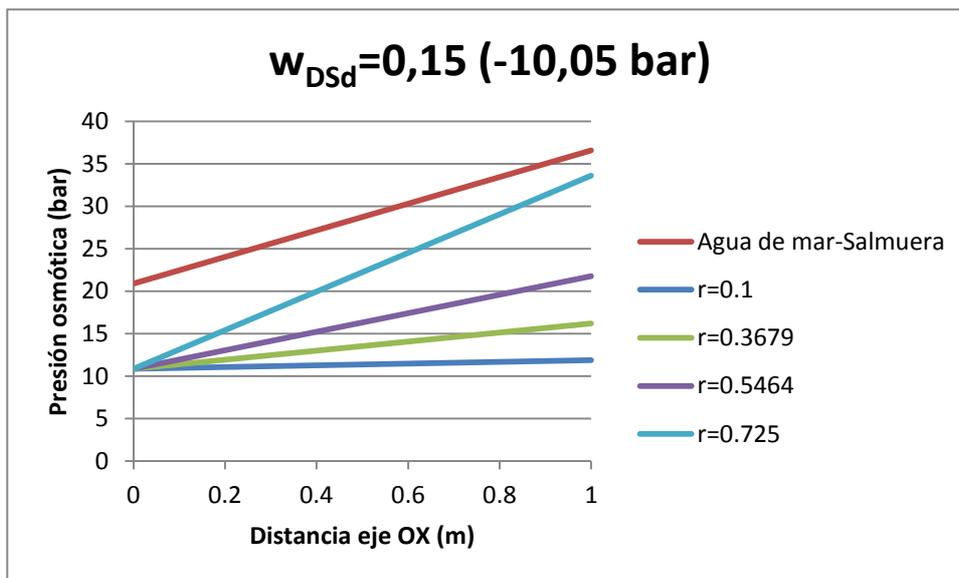
Tras analizar las las tablas y gráficas anteriores, se puede concluir que el aumento de la salinidad provoca que la razón de conversión aumente si queremos mantener la concentración de la disolución diluida, o que simplemente se aumente la concentración de la disolución diluida para que se mantenga la espontaneidad del proceso.

4.2.2 Espontaneidad. Influencia de la salinidad. PSSP11

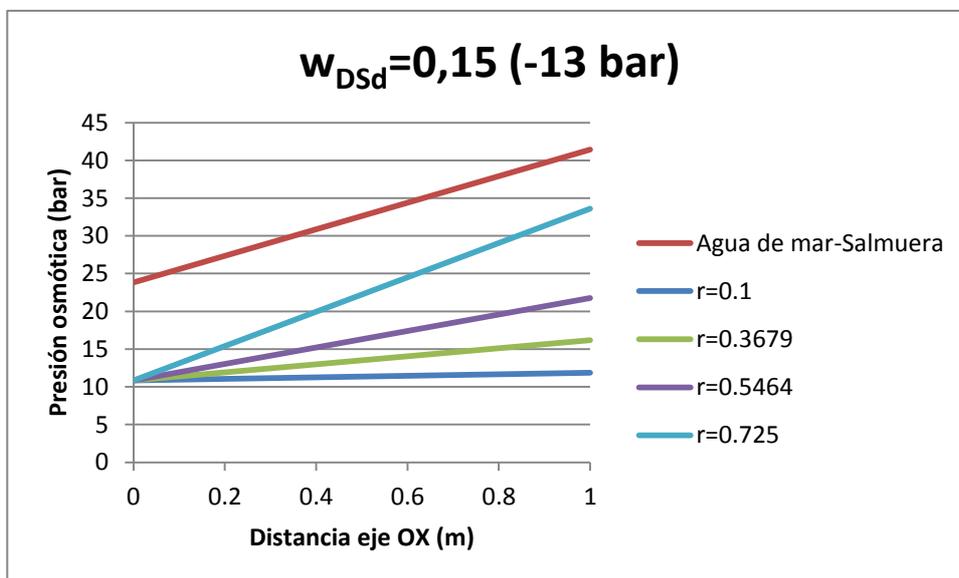
En este apartado se va a repetir el mismo análisis que el apartado anterior pero con la disolución PSSP11. De modo que a continuación se muestran tres gráficas en las cuales se ha representado en el eje Y la presión osmótica, expresada en bares, y en el eje X la distancia recorrida por las corrientes en la etapa 1 del proceso de FO, de manera que el 0 representa la entrada y el 1 la salida. Cada una de ellas contiene representado en rojo la corriente de agua de mar-salmuera, y la corriente disolución diluida-concentrada vienen representadas en varios colores. Cada uno de esos colores se corresponde con un valor de la razón de conversión del proceso de recuperación de la *draw solution*, definida anteriormente r_{FO} .



Gráfica 4-4. Corrientes en el proceso de Forward Osmosis de la disolución PSSP11 para $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg] y $w_{DSD} = 0.15$



Gráfica 4-5. Corrientes en el proceso de Forward Osmosis de la disolución PSSP11 para $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg] y $w_{DSd} = 0.15$.



Gráfica 4-6. Corrientes en el proceso de Forward Osmosis de la disolución PSSP11 para $S_{sw} = 0.04$ [kg/kg] y $w_{DSd} = 0.15$.

La disolución PSSP11 sigue la misma tendencia que la SSP, pero de manera más acentuada en el sentido de que las presiones conseguidas son menores, lo que dificulta aún más el proceso de FO, especialmente para las salinidades $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg] y $S_{sw} = 0.040$ [kg/kg].

Para las gráficas mostradas anteriormente, tomando $W_{DSd} = 0.15$, las presiones que se ha conseguido para las distintas salinidades son:

$$- S_{sw} = 0.024 \text{ [kg/kg]} \rightarrow p_{i_{w_{DSd}}} - p_{i_{SW}} = -3.53 \text{ [bar]}$$

$$- S_{sw} = 0.035 \text{ [kg/kg]} \rightarrow p_{i_{w_{DSd}}} - p_{i_{SW}} = -10.05 \text{ [bar]}$$

$$- S_{sw} = 0.04 \text{ [kg/kg]} \rightarrow p_{i_{w_{DSd}}} - p_{i_{SW}} = -13 \text{ [bar]}$$

Si se analiza cada una de las gráficas por separado por separado, se puede decir lo siguiente:

-Gráfica 4-4. El proceso de espontaneidad no se consigue para el valor de concentración $W_{DSd} = 0.15$. Tendríamos que ir a valores de $W_{DSd} \geq 0.2$ y $r_{FO} \geq 0.4775$. Se muestra a continuación una tabla, que al igual que en los casos de los apartados anteriores resume para cada concentración el valor mínimo de r_{FO} para que tenga lugar la espontaneidad:

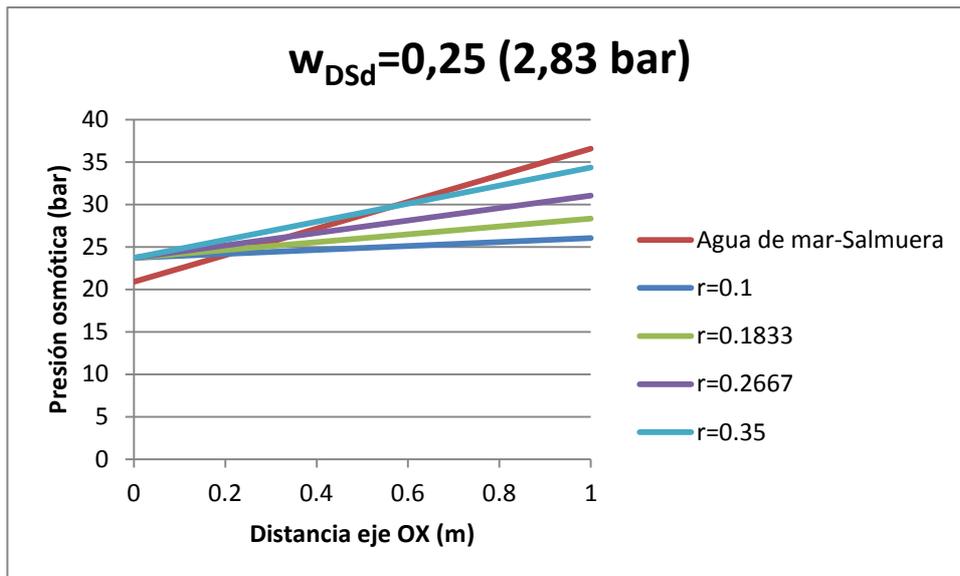
Tabla 4-4. Valores de la concentración de la disolución diluida, w_{DSd} , y razón de conversión r_{FO} necesarios para la espontaneidad del proceso, para $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg].

Concentración disolución diluida W_{DSd}	Razón de conversión r_{FO}
0.2	≥ 0.475
0.225	≥ 0.3893
0.25	≥ 0.3222
0.275	≥ 0.2083
0.3	≥ 0.1

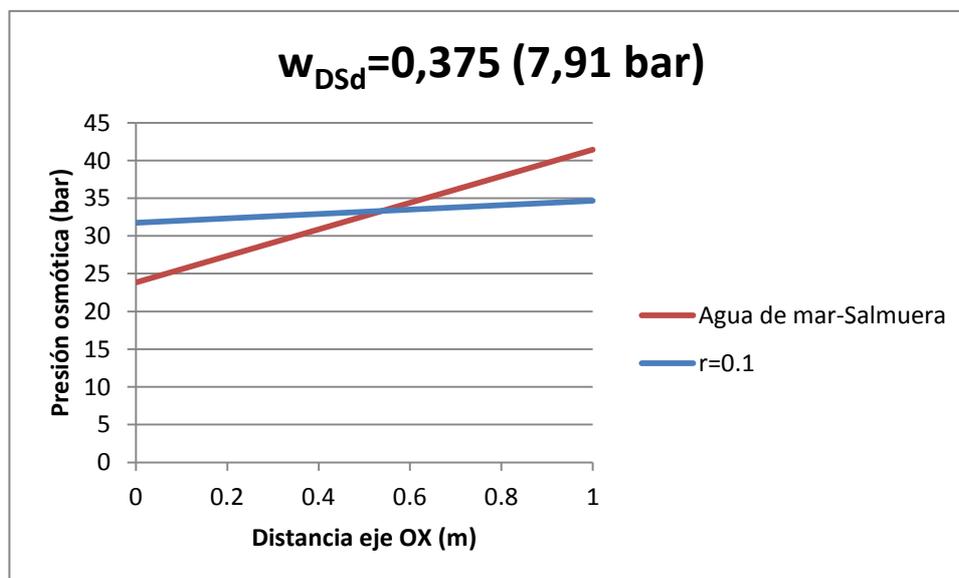
-Gráfica 4-5. Aunque los valores que se reflejan en la gráfica son para una concentración de disolución diluida $w_{Dsd} = 0.15$ es de interés comentar que para la salinidad de $S_{sw} = 0.035$ [Kg/Kg] el proceso de FO es imposible. Es posible con concentraciones mayores alcanzar valores que cumplan $\pi_{wDsd} > \pi_{sw}$, pero no que $\pi_{wDsc} > \pi_{Br}$. Esto se significa que el proceso comenzaría de manera espontanea pero finalmente, cuando $\pi_{Br} \geq \pi_{wDc}$ el proceso se frenaría.

-Gráfica 4-6. Para la salinidad de $S_{sw} = 0.04$ [Kg/Kg] ocurriría exactamente lo mismo descrito en el caso anterior.

Ejemplo de lo explicado anteriormente se refleja en la gráfica 4-7 y 4-8, dónde se encuentran valores de presiones osmóticas de la disolución diluida por encima de la del agua de mar, pero sin embargo los valores de las presiones de la salmuera están por encima de los de la disolución concentrada.



Gráfica 4-7. Corrientes en el proceso de Forward Osmosis de la disolución PSSP11 para $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg] y $w_{Dsd} = 0.25$, dónde se cumple que $\pi_{Dsd} > \pi_{sw}$ pero $\pi_{Br} > \pi_{wDc}$.



Gráfica 4-8. Corrientes en el proceso de Forward Osmosis de la disolución PSSP11 para $S_{sw} = 0.040$ [kg/kg] y $w_{DSd} = 0.375$, donde se cumple que $\pi_{DSd} > \pi_{sw}$ pero $\pi_{Br} > \pi_{WDe}$.

4.2.3 Influencia de la salinidad. Conclusiones

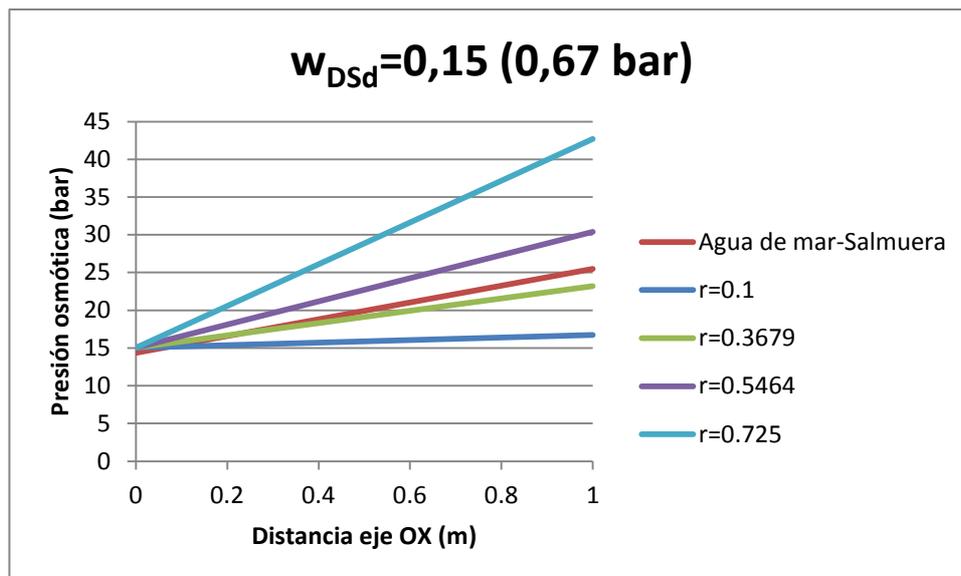
Tras analizar las las tablas y gráficas anteriores, se puede concluir que el aumento de la salinidad provoca que la razón de conversión aumente si queremos mantener la concentración de la disolución diluida, o que simplemente se aumente la concentración de la disolución diluida para que se mantenga la espontaneidad del proceso.

4.3 Espontaneidad. Influencia de la concentración.

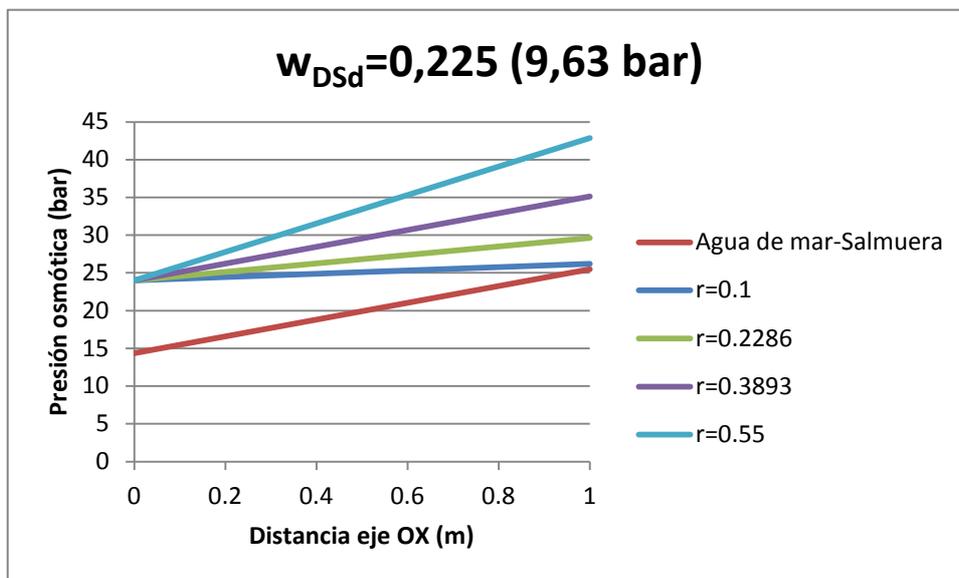
En este apartado se va analizar los cambios en el proceso de FO introducidos por un cambio en la concentración de la disolución. Con el objeto de establecer diferencias entre las disoluciones SSP y PSSP11 se ha elegido como referencia la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg], ya que para las otras dos salinidades veíamos en el apartado anterior que la disolución PSSP11 no era válida.

4.3.1 Espontaneidad. Influencia de la concentración. SSP

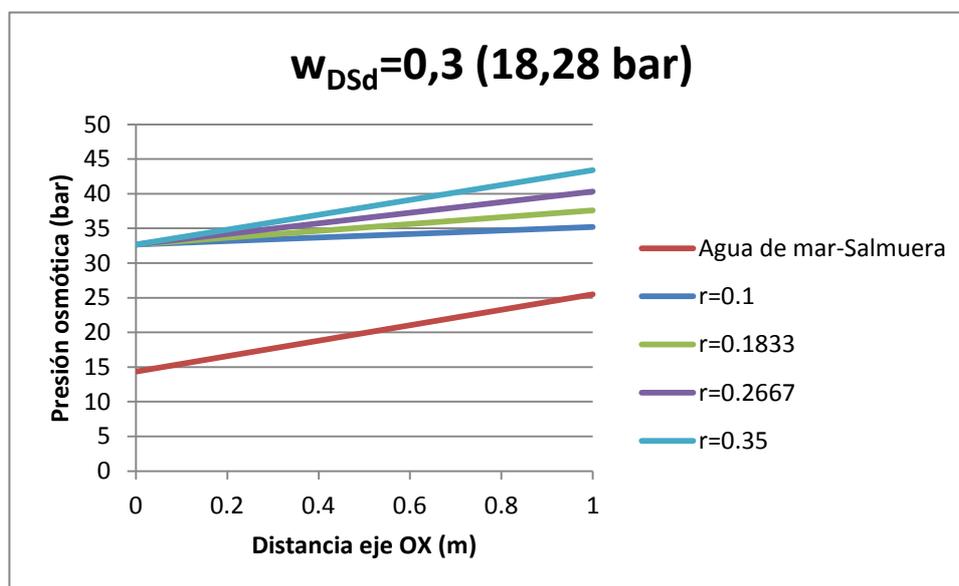
A continuación se muestran cuatro gráficas en las cuales se ha representado en el eje Y la presión osmótica, expresada en bares, y en el eje X la distancia recorrida por las corrientes en la etapa 1 del proceso de FO, de manera que el 0 representa la entrada y el 1 la salida. Cada una de ellas contiene representado en rojo la corriente de agua de mar-salmuera, y la corriente disolución diluida-concentrada vienen representadas en varios colores. Cada uno de esos colores se corresponde con un valor de la razón de conversión del proceso de recuperación de la *draw solution*, definida anteriormente r_{FO} . Para el caso de la disolución SSP se han seleccionado cuatro concentraciones de modo que se vea de la mejor manera posible el efecto de ir aumento la concentración. Dichas concentraciones son $w_{Dsd} = 0.15, 0.225, 0.3$ y 0.375 .



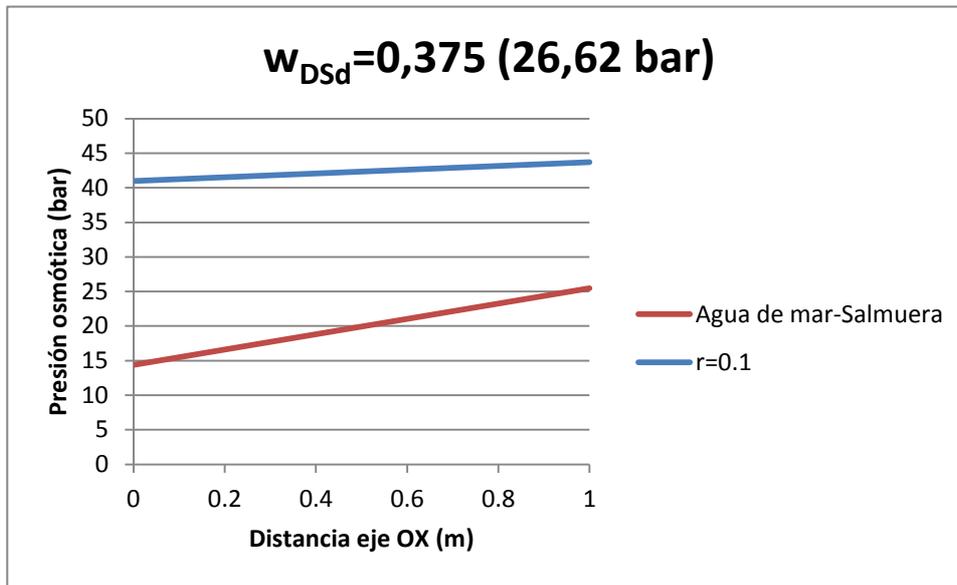
Gráfica 4-9. Corrientes en el proceso de Forward Osmosis de la disolución SSP para $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg] y $w_{Dsd} = 0.15$.



Gráfica 4-10. Corrientes en el proceso de Forward Osmosis de la disolución SSP para $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg] y $w_{Dsd} = 0.225$.



Gráfica 4-11. Corrientes en el proceso de Forward Osmosis de la disolución SSP para $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg] y $w_{Dsd} = 0.3$.



Gráfica 4-12. Corrientes en el proceso de Forward Osmosis de la disolución SSP para $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg] y $w_{Dsd} = 0.375$.

El efecto más inmediato del incremento de la concentración de la disolución es el aumento de la presión conseguida, lo que se traduce a un incremento del flujo de agua. Aunque no es objeto de este proyecto se explica brevemente el razonamiento anterior.

La ecuación de transporte que caracteriza el proceso de la ósmosis tiene en cuenta el mecanismo de solución-difusión y, de acuerdo a la ley de Fick, se puede expresar como:

$$J_w = A (\Delta\pi - \Delta p) \quad (4-1)$$

En la que:

- J_w , el flujo de agua.
- A , constante de permeabilidad al agua de la membrana.
- $\Delta\pi$, diferencia de presión osmótica a través de la membrana.
- ΔP la presión hidráulica aplicada.

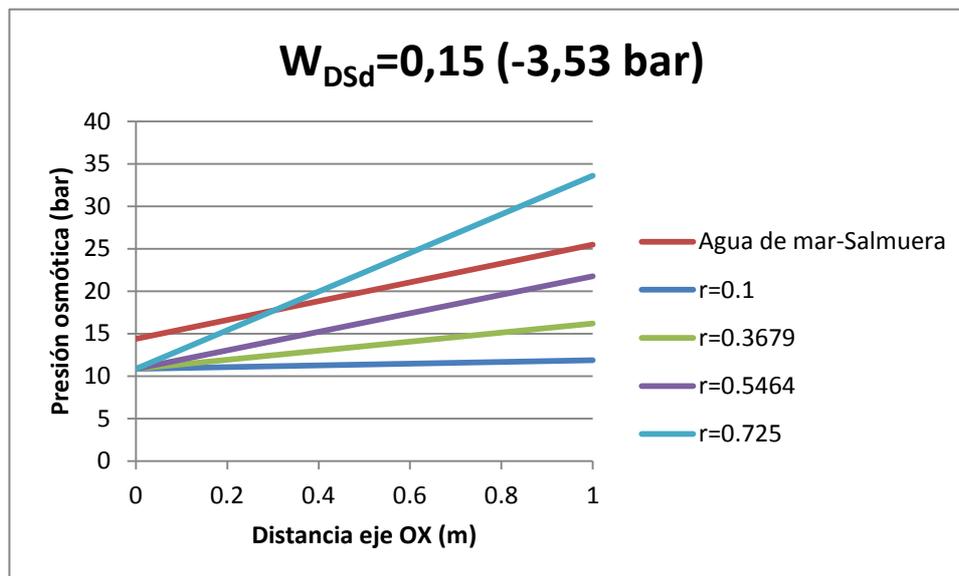
En la ósmosis directa, la presión aplicada es cero y la fuerza impulsora proviene de la diferencia de presión osmótica entre la *draw solution* y la disolución de alimentación. Por tanto, el flujo de agua se puede expresar como:

$$J_w = A (\pi_{draw\ solution} - \pi_{agua\ alimentación}) \quad (4-2)$$

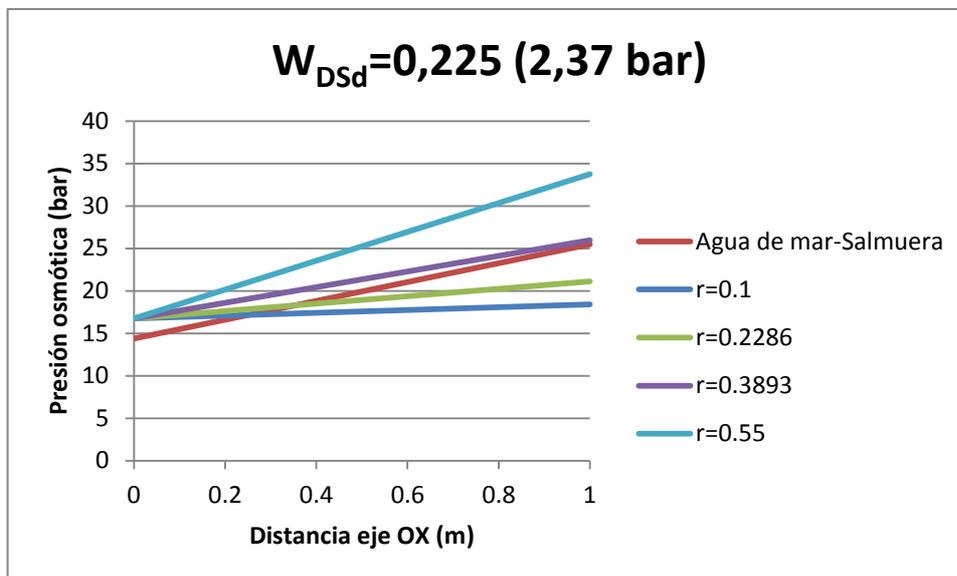
Como contrapartida a medida que dicha concentración aumenta la razón de conversión, r_{FO} , se muestra más acotada con valores menores, por el hecho de que se van obteniendo cada vez valores mayores de W_{DSc} . Un ejemplo de ello se muestra en la gráfica 4-12, dónde se consiguen altos gradientes de presión pero a costa de bajas razones de conversión.

4.3.2 Espontaneidad. Influencia de la concentración. PSSP11

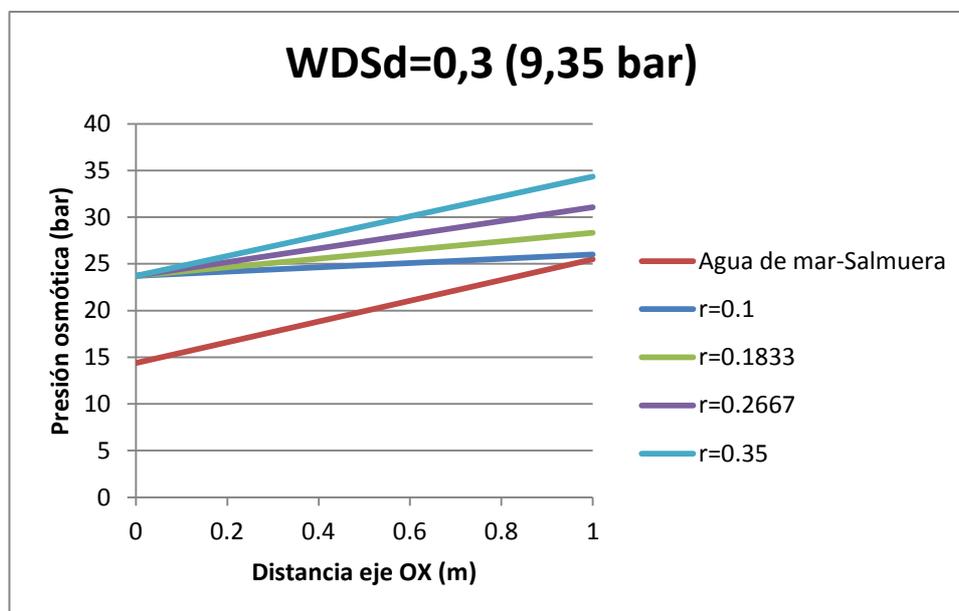
Para el caso de la disolución PSSP11 las condiciones elegidas son las mismas. Se ha elegido los mismos valores de concentración de disolución diluida, $w_{Dsd} = 0.15, 0.225, 0.3$ y 0.375 y salinidad, $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg].



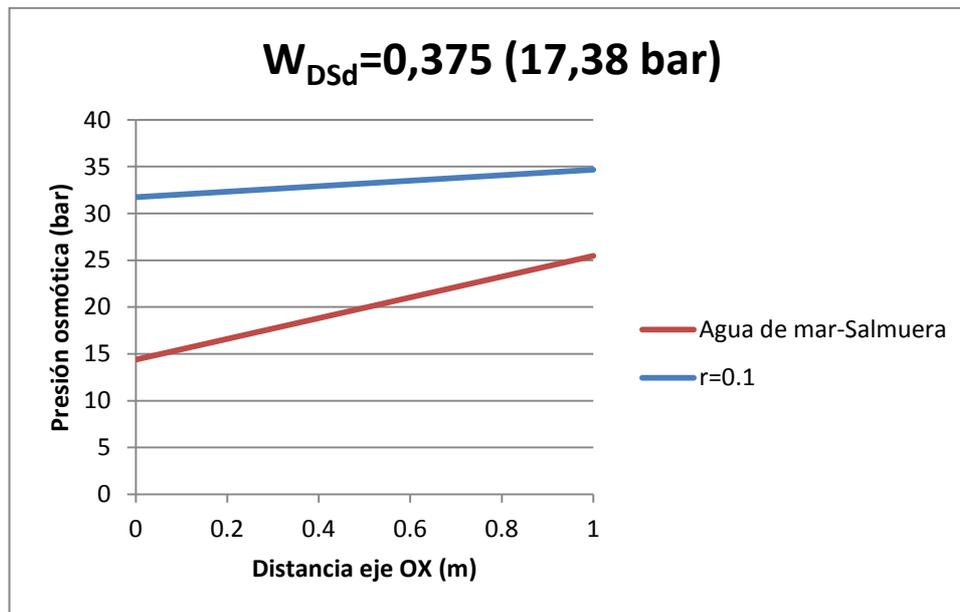
Gráfica 4-14. Corrientes en el proceso de Forward Osmosis de la disolución PSSP11 para $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg] y $w_{Dsd} = 0.15$.



Gráfica 4-15. Corrientes en el proceso de Forward Osmosis de la disolución PSSP11 para $S_{sw}=0.024$ [kg/kg] y $w_{DSD}=0.225$.



Gráfica 4-16. Corrientes en el proceso de Forward Osmosis de la disolución PSSP11 para $S_{sw}=0.024$ [kg/kg] y $w_{DSD}=0.3$.



Gráfica 4-18. Corrientes en el proceso de Forward Osmosis de la disolución PSSP11 para $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg] y $w_{Dsd} = 0.375$.

La influencia del aumento de concentración en la disolución PSSP11 sigue la misma línea que la disolución SSP, con la diferencia de que se consiguen menores diferencias de presión entre la disolución diluida y el agua de mar.

4.3.3 Influencia de la concentración. Conclusiones

El efecto más inmediato del aumento de la concentración de la disolución diluida se traduce a un aumento de la diferencia de presiones, produciéndose un aumento del flujo de agua a través de la membrana como se comentó en el apartado 4.3.1. Con el efecto de que medida que aumenta la concentración el rango de validez de la r_{FO} va disminuyendo en cuanto a número y valores, es decir se va acotando cada vez para valores más pequeños.

4.4 Espontaneidad. Acotación de valores

En el capítulo 3 se acotaron los valores de los límites termodinámicos por el simple hecho de que las disoluciones no estaban definidas para todo el rango de concentraciones posibles, y se descartaron aquellos valores pertenecientes a concentraciones de la disolución mayores a 0.4. Con el mismo objetivo, el estudio de la espontaneidad ha reducido aún más ese rango de valores, eliminando del estudio aquellos valores que aun estándos definidos físicamente, no cumplen el criterio de espontaneidad. A continuación se muestra para las disoluciones SSP y PSSP11 la misma tabla mostrada en el capítulo 3 pero con la nueva selección de los valores de los límites termodinámicos. Se recuerda que en la columna vertical se encuentran los valores de la razón de conversión del proceso FO, en la horizontal las concentraciones de la disolución diluida y en las celdas centrales los valores de los límites termodinámicos.

El color de las celdas de las tablas que se muestran a continuación hacen referencia a:

- Valores para los cuales la disolución está caracterizada pero no son válidos para la FO.
- Valores para los cuales la disolución está caracterizada y son válidas para la FO.
- Valores para los cuales la disolución no está caracterizada.

Tabla 4-4. Valores de ΔG [kJ/m³] válidos para el proceso de FO de la disolución SSP para $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg].

		W DSd												
		0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375	0.4
t	0.1	948.6	1269.7	1586.1	1897.9	2205.2	2508.0	2806.2	3100.1	3389.5	3674.5	3955.2	4231.6	4503.7
	0.125	964.7	1288.9	1608.1	1922.5	2232.0	2536.7	2836.6	3131.8	3422.4	3708.3	3989.6	4266.4	4538.7
	0.15	981.3	1308.7	1630.8	1947.7	2259.5	2566.1	2867.7	3164.3	3456.0	3742.8	4024.8	4302.0	4574.5
	0.175	998.5	1329.2	1654.3	1973.8	2287.8	2596.4	2899.7	3197.7	3490.5	3778.1	4060.7	4338.3	4611.0
	0.2	1016.2	1350.3	1678.4	2000.6	2316.9	2627.5	2932.5	3231.9	3525.8	3814.2	4097.4	4375.4	4648.2
	0.225	1034.6	1372.2	1703.4	2028.3	2347.0	2659.6	2966.2	3266.9	3561.9	3851.2	4135.0	4413.2	4686.1
	0.25	1053.7	1394.9	1729.2	2056.9	2377.9	2692.5	3000.8	3303.0	3599.0	3889.1	4173.3	4451.9	4724.8
	0.275	1073.5	1418.3	1755.9	2086.3	2409.8	2726.5	3036.5	3339.9	3637.0	3927.9	4212.6	4491.4	4764.3
	0.3	1094.0	1442.7	1783.5	2116.8	2442.8	2761.5	3073.1	3377.9	3676.0	3967.6	4252.8	4531.7	4804.6
	0.325	1115.4	1467.9	1812.2	2148.4	2476.8	2797.5	3110.9	3417.0	3716.1	4008.4	4293.9	4573.0	4845.8
	0.35	1137.6	1494.1	1841.9	2181.0	2511.9	2834.7	3149.8	3457.2	3757.3	4050.2	4336.1	4615.2	4887.8
	0.375	1160.8	1521.4	1872.7	2214.8	2548.3	2873.2	3189.8	3498.5	3799.5	4093.0	4379.3	4658.4	4930.8
	0.4	1184.9	1549.8	1904.7	2249.9	2585.9	2912.9	3231.2	3541.1	3843.0	4137.0	4423.5	4702.7	4974.7
	0.425	1210.2	1579.4	1938.0	2286.3	2624.9	2953.9	3273.9	3585.0	3887.7	4182.2	4468.9	4747.9	5019.6
	0.45	1236.6	1610.3	1972.7	2324.2	2665.3	2996.4	3317.9	3630.3	3933.7	4228.7	4515.4	4794.3	5065.5
	0.475	1264.2	1642.6	2008.8	2363.5	2707.2	3040.4	3363.5	3676.9	3981.1	4276.4	4563.2	4841.8	5112.5
	0.5	1293.2	1676.3	2046.5	2404.5	2750.8	3086.0	3410.6	3725.1	4030.0	4325.5	4612.3	4890.5	5160.6
	0.525	1323.8	1711.7	2086.0	2447.2	2796.1	3133.3	3459.4	3774.9	4080.3	4376.1	4662.6	4940.4	5209.8
	0.55	1355.9	1748.9	2127.3	2491.8	2843.3	3182.5	3510.0	3826.4	4132.3	4428.1	4714.4	4991.6	5260.2
	0.575	1389.8	1788.0	2170.5	2538.4	2892.5	3233.6	3562.4	3879.7	4185.9	4481.7	4767.7	5044.2	5311.8
0.6	1425.6	1829.2	2216.0	2587.2	2943.9	3286.8	3616.9	3934.8	4241.3	4537.0	4822.5	5098.2	5364.7	
0.625	1463.6	1872.6	2263.8	2638.4	2997.5	3342.3	3673.5	3992.0	4298.6	4594.0	4878.9	5153.7	5419.0	
0.65	1504.0	1918.7	2314.2	2692.1	3053.7	3400.1	3732.3	4051.3	4357.9	4652.9	4936.9	5210.7	5474.7	
0.675	1547.0	1967.5	2367.4	2748.7	3112.6	3460.5	3793.6	4112.9	4419.3	4713.7	4996.8	5269.3	5531.8	
0.7	1593.0	2019.4	2423.8	2808.2	3174.4	3523.7	3857.5	4176.9	4483.0	4776.6	5058.5	5329.6	5590.4	
0.725	1642.4	2074.7	2483.6	2871.2	3239.4	3589.9	3924.2	4243.5	4549.0	4841.6	5122.2	5391.7	5650.7	
0.75	1695.5	2134.0	2547.2	2937.8	3307.9	3659.4	3993.9	4312.9	4617.5	4908.9	5187.9	5455.6	5712.5	
0.775	1753.0	2197.6	2615.1	3008.5	3380.2	3732.4	4066.9	4385.2	4688.8	4978.6	5255.9	5521.5	5776.2	
0.8	1815.5	2266.2	2687.8	3083.7	3456.7	3809.3	4143.4	4460.8	4762.9	5050.9	5326.1	5589.4	5841.6	
0.825	1883.8	2340.5	2765.9	3163.9	3537.9	3890.4	4223.7	4539.7	4840.0	5126.0	5398.8	5659.4	5908.9	
0.85	1958.9	2421.4	2850.1	3249.8	3624.2	3976.1	4308.2	4622.4	4920.5	5203.9	5474.0	5731.7	5978.2	
0.875	2042.1	2509.9	2941.4	3342.0	3716.1	4066.9	4397.2	4709.1	5004.5	5285.0	5551.9	5806.4	6049.5	
0.9	2135.2	2607.3	3040.7	3441.5	3814.5	4163.3	4491.1	4800.0	5092.2	5369.3	5632.7	5883.6	6123.1	
0.925	2240.2	2715.5	3149.4	3549.1	3919.9	4265.9	4590.3	4895.6	5184.0	5457.1	5716.5	5963.4	6198.9	
0.95	2360.2	2836.5	3269.1	3666.1	4033.4	4375.4	4695.5	4996.3	5280.1	5548.7	5803.6	6046.0	6277.1	
0.975	2499.4	2973.3	3401.9	3794.0	4156.0	4492.5	4807.1	5102.5	5381.0	5644.3	5894.1	6131.5	6357.7	
1	2663.5	3129.5	3550.1	3934.4	4288.8	4618.1	4925.8	5214.6	5486.8	5744.1	5988.1	6220.1	6441.0	

Tabla 4-5. Valores de ΔG [kJ/m³] válidos para el proceso de FO de la disolución SSP para $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg].

		W_DSd												
		0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375	0.4
L	0.1	948.6	1269.7	1586.1	1897.9	2205.2	2508.0	2806.2	3100.1	3389.5	3674.5	3955.2	4231.6	4503.7
	0.125	964.7	1288.9	1608.1	1922.5	2232.0	2536.7	2836.6	3131.8	3422.4	3708.3	3989.6	4266.4	4538.7
	0.15	981.3	1308.7	1630.8	1947.7	2259.5	2566.1	2867.7	3164.3	3456.0	3742.8	4024.8	4302.0	4574.5
	0.175	998.5	1329.2	1654.3	1973.8	2287.8	2596.4	2899.7	3197.7	3490.5	3778.1	4060.7	4338.3	4611.0
	0.2	1016.2	1350.3	1678.4	2000.6	2316.9	2627.5	2932.5	3231.9	3525.8	3814.2	4097.4	4375.4	4648.2
	0.225	1034.6	1372.2	1703.4	2028.3	2347.0	2659.6	2966.2	3266.9	3561.9	3851.2	4135.0	4413.2	4686.1
	0.25	1053.7	1394.9	1729.2	2056.9	2377.9	2692.5	3000.8	3303.0	3599.0	3889.1	4173.3	4451.9	4724.8
	0.275	1073.5	1418.3	1755.9	2086.3	2409.8	2726.5	3036.5	3339.9	3637.0	3927.9	4212.6	4491.4	4764.3
	0.3	1094.0	1442.7	1783.5	2116.8	2442.8	2761.5	3073.1	3377.9	3676.0	3967.6	4252.8	4531.7	4804.6
	0.325	1115.4	1467.9	1812.2	2148.4	2476.8	2797.5	3110.9	3417.0	3716.1	4008.4	4293.9	4573.0	4845.8
	0.35	1137.6	1494.1	1841.9	2181.0	2511.9	2834.7	3149.8	3457.2	3757.3	4050.2	4336.1	4615.2	4887.8
	0.375	1160.8	1521.4	1872.7	2214.8	2548.3	2873.2	3189.8	3498.5	3799.5	4093.0	4379.3	4658.4	4930.8
	0.4	1184.9	1549.8	1904.7	2249.9	2585.9	2912.9	3231.2	3541.1	3843.0	4137.0	4423.5	4702.7	4974.7
	0.425	1210.2	1579.4	1938.0	2286.3	2624.9	2953.9	3273.9	3585.0	3887.7	4182.2	4468.9	4747.9	5019.6
	0.45	1236.6	1610.3	1972.7	2324.2	2665.3	2996.4	3317.9	3630.3	3933.7	4228.7	4515.4	4794.3	5065.5
	0.475	1264.2	1642.6	2008.8	2363.5	2707.2	3040.4	3363.5	3676.9	3981.1	4276.4	4563.2	4841.8	5112.5
	0.5	1293.2	1676.3	2046.5	2404.5	2750.8	3086.0	3410.6	3725.1	4030.0	4325.5	4612.3	4890.5	5160.6
	0.525	1323.8	1711.7	2086.0	2447.2	2796.1	3133.3	3459.4	3774.9	4080.3	4376.1	4662.6	4940.4	5209.8
	0.55	1355.9	1748.9	2127.3	2491.8	2843.3	3182.5	3510.0	3826.4	4132.3	4428.1	4714.4	4991.6	5260.2
	0.575	1389.8	1788.0	2170.5	2538.4	2892.5	3233.6	3562.4	3879.7	4185.9	4481.7	4767.7	5044.2	5311.8
0.6	1425.6	1829.2	2216.0	2587.2	2943.9	3286.8	3616.9	3934.8	4241.3	4537.0	4822.5	5098.2	5364.7	
0.625	1463.6	1872.6	2263.8	2638.4	2997.5	3342.3	3673.5	3992.0	4298.6	4594.0	4878.9	5153.7	5419.0	
0.65	1504.0	1918.7	2314.2	2692.1	3053.7	3400.1	3732.3	4051.3	4357.9	4652.9	4936.9	5210.7	5474.7	
0.675	1547.0	1967.5	2367.4	2748.7	3112.6	3460.5	3793.6	4112.9	4419.3	4713.7	4996.8	5269.3	5531.8	
0.7	1593.0	2019.4	2423.8	2808.2	3174.4	3523.7	3857.5	4176.9	4483.0	4776.6	5058.5	5329.6	5590.4	
0.725	1642.4	2074.7	2483.6	2871.2	3239.4	3589.9	3924.2	4243.5	4549.0	4841.6	5122.2	5391.7	5650.7	
0.75	1695.5	2134.0	2547.2	2937.8	3307.9	3659.4	3993.9	4312.9	4617.5	4908.9	5187.9	5455.6	5712.5	
0.775	1753.0	2197.6	2615.1	3008.5	3380.2	3732.4	4066.9	4385.2	4688.8	4978.6	5255.9	5521.5	5776.2	
0.8	1815.5	2266.2	2687.8	3083.7	3456.7	3809.3	4143.4	4460.8	4762.9	5050.9	5326.1	5589.4	5841.6	
0.825	1883.8	2340.5	2765.9	3163.9	3537.9	3890.4	4223.7	4539.7	4840.0	5126.0	5398.8	5659.4	5908.9	
0.85	1958.9	2421.4	2850.1	3249.8	3624.2	3976.1	4308.2	4622.4	4920.5	5203.9	5474.0	5731.7	5978.2	
0.875	2042.1	2509.9	2941.4	3342.0	3716.1	4066.9	4397.2	4709.1	5004.5	5285.0	5551.9	5806.4	6049.5	
0.9	2135.2	2607.3	3040.7	3441.5	3814.5	4163.3	4491.1	4800.0	5092.2	5369.3	5632.7	5883.6	6123.1	
0.925	2240.2	2715.5	3149.4	3549.1	3919.9	4265.9	4590.3	4895.6	5184.0	5457.1	5716.5	5963.4	6198.9	
0.95	2360.2	2836.5	3269.1	3666.1	4033.4	4375.4	4695.5	4996.3	5280.1	5548.7	5803.6	6046.0	6277.1	
0.975	2499.4	2973.3	3401.9	3794.0	4156.0	4492.5	4807.1	5102.5	5381.0	5644.3	5894.1	6131.5	6357.7	
1	2663.5	3129.5	3550.1	3934.4	4288.8	4618.1	4925.8	5214.6	5486.8	5744.1	5988.1	6220.1	6441.0	

Tabla 4-6. Valores de ΔG [kJ/m³] válidos para el proceso de FO de la disolución SSP para $S_{sw}=0.04$ [kg/kg].

		W_DSd												
		0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375	0.4
L	0.1	948.6	1269.7	1586.1	1897.9	2205.2	2508.0	2806.2	3100.1	3389.5	3674.5	3955.2	4231.6	4503.7
	0.125	964.7	1288.9	1608.1	1922.5	2232.0	2536.7	2836.6	3131.8	3422.4	3708.3	3989.6	4266.4	4538.7
	0.15	981.3	1308.7	1630.8	1947.7	2259.5	2566.1	2867.7	3164.3	3456.0	3742.8	4024.8	4302.0	4574.5
	0.175	998.5	1329.2	1654.3	1973.8	2287.8	2596.4	2899.7	3197.7	3490.5	3778.1	4060.7	4338.3	4611.0
	0.2	1016.2	1350.3	1678.4	2000.6	2316.9	2627.5	2932.5	3231.9	3525.8	3814.2	4097.4	4375.4	4648.2
	0.225	1034.6	1372.2	1703.4	2028.3	2347.0	2659.6	2966.2	3266.9	3561.9	3851.2	4135.0	4413.2	4686.1
	0.25	1053.7	1394.9	1729.2	2056.9	2377.9	2692.5	3000.8	3303.0	3599.0	3889.1	4173.3	4451.9	4724.8
	0.275	1073.5	1418.3	1755.9	2086.3	2409.8	2726.5	3036.5	3339.9	3637.0	3927.9	4212.6	4491.4	4764.3
	0.3	1094.0	1442.7	1783.5	2116.8	2442.8	2761.5	3073.1	3377.9	3676.0	3967.6	4252.8	4531.7	4804.6
	0.325	1115.4	1467.9	1812.2	2148.4	2476.8	2797.5	3110.9	3417.0	3716.1	4008.4	4293.9	4573.0	4845.8
	0.35	1137.6	1494.1	1841.9	2181.0	2511.9	2834.7	3149.8	3457.2	3757.3	4050.2	4336.1	4615.2	4887.8
	0.375	1160.8	1521.4	1872.7	2214.8	2548.3	2873.2	3189.8	3498.5	3799.5	4093.0	4379.3	4658.4	4930.8
	0.4	1184.9	1549.8	1904.7	2249.9	2585.9	2912.9	3231.2	3541.1	3843.0	4137.0	4423.5	4702.7	4974.7
	0.425	1210.2	1579.4	1938.0	2286.3	2624.9	2953.9	3273.9	3585.0	3887.7	4182.2	4468.9	4747.9	5019.6
	0.45	1236.6	1610.3	1972.7	2324.2	2665.3	2996.4	3317.9	3630.3	3933.7	4228.7	4515.4	4794.3	5065.5
	0.475	1264.2	1642.6	2008.8	2363.5	2707.2	3040.4	3363.5	3676.9	3981.1	4276.4	4563.2	4841.8	5112.5
	0.5	1293.2	1676.3	2046.5	2404.5	2750.8	3086.0	3410.6	3725.1	4030.0	4325.5	4612.3	4890.5	5160.6
	0.525	1323.8	1711.7	2086.0	2447.2	2796.1	3133.3	3459.4	3774.9	4080.3	4376.1	4662.6	4940.4	5209.8
	0.55	1355.9	1748.9	2127.3	2491.8	2843.3	3182.5	3510.0	3826.4	4132.3	4428.1	4714.4	4991.6	5260.2
	0.575	1389.8	1788.0	2170.5	2538.4	2892.5	3233.6	3562.4	3879.7	4185.9	4481.7	4767.7	5044.2	5311.8
	0.6	1425.6	1829.2	2216.0	2587.2	2943.9	3286.8	3616.9	3934.8	4241.3	4537.0	4822.5	5098.2	5364.7
	0.625	1463.6	1872.6	2263.8	2638.4	2997.5	3342.3	3673.5	3992.0	4298.6	4594.0	4878.9	5153.7	5419.0
	0.65	1504.0	1918.7	2314.2	2692.1	3053.7	3400.1	3732.3	4051.3	4357.9	4652.9	4936.9	5210.7	5474.7
	0.675	1547.0	1967.5	2367.4	2748.7	3112.6	3460.5	3793.6	4112.9	4419.3	4713.7	4996.8	5269.3	5531.8
	0.7	1593.0	2019.4	2423.8	2808.2	3174.4	3523.7	3857.5	4176.9	4483.0	4776.6	5058.5	5329.6	5590.4
	0.725	1642.4	2074.7	2483.6	2871.2	3239.4	3589.9	3924.2	4243.5	4549.0	4841.6	5122.2	5391.7	5650.7
	0.75	1695.5	2134.0	2547.2	2937.8	3307.9	3659.4	3993.9	4312.9	4617.5	4908.9	5187.9	5455.6	5712.5
	0.775	1753.0	2197.6	2615.1	3008.5	3380.2	3732.4	4066.9	4385.2	4688.8	4978.6	5255.9	5521.5	5776.2
0.8	1815.5	2266.2	2687.8	3083.7	3456.7	3809.3	4143.4	4460.8	4762.9	5050.9	5326.1	5589.4	5841.6	
0.825	1883.8	2340.5	2765.9	3163.9	3537.9	3890.4	4223.7	4539.7	4840.0	5126.0	5398.8	5659.4	5908.9	
0.85	1958.9	2421.4	2850.1	3249.8	3624.2	3976.1	4308.2	4622.4	4920.5	5203.9	5474.0	5731.7	5978.2	
0.875	2042.1	2509.9	2941.4	3342.0	3716.1	4066.9	4397.2	4709.1	5004.5	5285.0	5551.9	5806.4	6049.5	
0.9	2135.2	2607.3	3040.7	3441.5	3814.5	4163.3	4491.1	4800.0	5092.2	5369.3	5632.7	5883.6	6123.1	
0.925	2240.2	2715.5	3149.4	3549.1	3919.9	4265.9	4590.3	4895.6	5184.0	5457.1	5716.5	5963.4	6198.9	
0.95	2360.2	2836.5	3269.1	3666.1	4033.4	4375.4	4695.5	4996.3	5280.1	5548.7	5803.6	6046.0	6277.1	
0.975	2499.4	2973.3	3401.9	3794.0	4156.0	4492.5	4807.1	5102.5	5381.0	5644.3	5894.1	6131.5	6357.7	
1	2663.5	3129.5	3550.1	3934.4	4288.8	4618.1	4925.8	5214.6	5486.8	5744.1	5988.1	6220.1	6441.0	

Tabla 4-7. Valores de ΔG [kJ/m³] válidos para el proceso de FO de la disolución PSSP11 para $S_{sw}=0.024$ [kg/kg].

		W_DSd												
		0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375	0.4
0.1	778.7	949.5	1132.6	1327.8	1535.1	1754.4	1985.6	2228.6	2483.3	2749.6	3027.4	3316.6	3617.2	
0.125	787.0	960.3	1146.0	1344.0	1554.1	1776.2	2010.3	2256.1	2513.6	2782.6	3063.0	3354.7	3657.5	
0.15	795.6	971.5	1159.9	1360.7	1573.8	1798.8	2035.8	2284.5	2544.8	2816.5	3099.6	3393.8	3699.1	
0.175	804.5	983.1	1174.4	1378.2	1594.2	1822.2	2062.2	2313.9	2577.1	2851.7	3137.4	3434.2	3741.8	
0.2	813.8	995.3	1189.5	1396.3	1615.4	1846.6	2089.6	2344.4	2610.5	2888.0	3176.5	3475.8	3785.8	
0.225	823.5	1007.9	1205.2	1415.2	1637.5	1871.8	2118.1	2375.9	2645.2	2925.5	3216.8	3518.8	3831.2	
0.25	833.7	1021.1	1221.6	1434.8	1660.4	1898.1	2147.7	2408.7	2681.0	2964.4	3258.5	3563.1	3878.0	
0.275	844.3	1034.9	1238.8	1455.4	1684.4	1925.5	2178.4	2442.8	2718.3	3004.7	3301.6	3608.9	3926.3	
0.3	855.4	1049.4	1256.7	1476.8	1709.4	1954.0	2210.4	2478.1	2756.9	3046.4	3346.3	3656.3	3976.1	
0.325	867.0	1064.5	1275.4	1499.2	1735.5	1983.8	2243.7	2515.0	2797.1	3089.7	3392.5	3705.3	4027.6	
0.35	879.3	1080.4	1295.1	1522.7	1762.8	2014.9	2278.5	2553.3	2838.8	3134.7	3440.5	3756.0	4080.7	
0.375	892.1	1097.1	1315.7	1547.3	1791.4	2047.4	2314.8	2593.3	2882.3	3181.4	3490.3	3808.5	4135.8	
0.4	905.7	1114.7	1337.5	1573.2	1821.4	2081.4	2352.8	2635.0	2927.6	3230.0	3542.0	3863.0	4192.7	
0.425	920.0	1133.3	1360.3	1600.4	1852.9	2117.1	2392.5	2678.6	2974.8	3280.6	3595.7	3919.5	4251.7	
0.45	935.2	1152.9	1384.5	1629.1	1886.0	2154.6	2434.2	2724.2	3024.1	3333.4	3651.5	3978.1	4312.8	
0.475	951.3	1173.7	1410.0	1659.4	1920.9	2194.0	2477.9	2772.0	3075.7	3388.4	3709.7	4039.1	4376.2	
0.5	968.4	1195.8	1437.1	1691.4	1957.8	2235.5	2523.9	2822.1	3129.6	3445.9	3770.4	4102.5	4442.0	
0.525	986.6	1219.2	1465.8	1725.3	1996.8	2279.3	2572.2	2874.7	3186.2	3506.0	3833.6	4168.6	4510.3	
0.55	1006.1	1244.3	1496.4	1761.4	2038.1	2325.7	2623.3	2930.1	3245.5	3568.9	3899.7	4237.4	4581.4	
0.575	1027.0	1271.1	1529.1	1799.7	2082.0	2374.7	2677.1	2988.5	3307.9	3634.9	3968.8	4309.2	4655.4	
0.6	1049.4	1299.8	1564.1	1840.7	2128.7	2426.8	2734.2	3050.0	3373.6	3704.2	4041.2	4384.1	4732.5	
0.625	1073.7	1330.8	1601.6	1884.6	2178.5	2482.2	2794.7	3115.1	3442.8	3777.0	4117.0	4462.5	4812.9	
0.65	1100.1	1364.3	1642.1	1931.7	2231.8	2541.3	2859.0	3184.1	3515.9	3853.6	4196.7	4544.5	4896.8	
0.675	1128.7	1400.7	1685.9	1982.5	2289.1	2604.4	2927.5	3257.4	3593.2	3934.4	4280.4	4630.5	4984.4	
0.7	1160.2	1440.4	1733.4	2037.3	2350.7	2672.2	3000.7	3335.3	3675.2	4019.8	4368.5	4720.8	5076.2	
0.725	1194.8	1483.9	1785.3	2097.0	2417.3	2745.0	3079.0	3418.4	3762.3	4110.2	4461.4	4815.6	5172.3	
0.75	1233.2	1531.9	1842.2	2162.0	2489.6	2823.7	3163.2	3507.3	3855.1	4206.0	4559.6	4915.4	5273.1	
0.775	1276.1	1585.2	1904.9	2233.2	2568.3	2908.9	3254.0	3602.6	3954.0	4307.8	4663.5	5020.6	5378.9	
0.8	1324.5	1644.8	1974.6	2311.8	2654.6	3001.7	3352.1	3705.1	4060.0	4416.3	4773.6	5131.7	5490.3	
0.825	1379.7	1712.1	2052.6	2398.9	2749.5	3103.0	3458.6	3815.7	4173.6	4532.1	4890.7	5249.3	5607.6	
0.85	1443.4	1788.8	2140.5	2496.3	2854.5	3214.3	3574.8	3935.5	4296.0	4656.0	5015.3	5373.8	5731.4	
0.875	1517.9	1877.4	2240.7	2605.9	2971.7	3337.3	3702.1	4065.8	4428.2	4789.1	5148.4	5506.1	5862.2	
0.9	1606.8	1981.2	2356.3	2730.6	3103.4	3474.0	3842.3	4208.1	4571.4	4932.3	5290.8	5646.9	6000.7	
0.925	1715.2	2104.8	2491.3	2874.0	3252.6	3627.1	3997.6	4364.3	4727.4	5087.1	5443.6	5797.1	6147.7	
0.95	1851.4	2255.5	2651.9	3041.0	3423.5	3799.9	4170.8	4536.6	4897.9	5254.9	5608.1	5957.7	6303.9	
0.975	2029.3	2444.2	2846.7	3238.6	3621.6	3996.9	4365.4	4728.0	5085.2	5437.6	5785.7	6129.9	6470.4	
1	2274.6	2689.5	3089.3	3476.9	3854.7	4224.0	4586.1	4941.9	5292.1	5637.4	5978.3	6315.1	6648.3	

Tabla 4-8. Valores de ΔG [kJ/m³] válidos para el proceso de FO de la disolución PSSP11 para $S_{sw}=0.035$ [kg/kg].

		W_DSd												
		0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375	0.4
0.1	778.7	949.5	1132.6	1327.8	1535.1	1754.4	1985.6	2228.6	2483.3	2749.6	3027.4	3316.6	3617.2	
0.125	787.0	960.3	1146.0	1344.0	1554.1	1776.2	2010.3	2256.1	2513.6	2782.6	3063.0	3354.7	3657.5	
0.15	795.6	971.5	1159.9	1360.7	1573.8	1798.8	2035.8	2284.5	2544.8	2816.5	3099.6	3393.8	3699.1	
0.175	804.5	983.1	1174.4	1378.2	1594.2	1822.2	2062.2	2313.9	2577.1	2851.7	3137.4	3434.2	3741.8	
0.2	813.8	995.3	1189.5	1396.3	1615.4	1846.6	2089.6	2344.4	2610.5	2888.0	3176.5	3475.8	3785.8	
0.225	823.5	1007.9	1205.2	1415.2	1637.5	1871.8	2118.1	2375.9	2645.2	2925.5	3216.8	3518.8	3831.2	
0.25	833.7	1021.1	1221.6	1434.8	1660.4	1898.1	2147.7	2408.7	2681.0	2964.4	3258.5	3563.1	3878.0	
0.275	844.3	1034.9	1238.8	1455.4	1684.4	1925.5	2178.4	2442.8	2718.3	3004.7	3301.6	3608.9	3926.3	
0.3	855.4	1049.4	1256.7	1476.8	1709.4	1954.0	2210.4	2478.1	2756.9	3046.4	3346.3	3656.3	3976.1	
0.325	867.0	1064.5	1275.4	1499.2	1735.5	1983.8	2243.7	2515.0	2797.1	3089.7	3392.5	3705.3	4027.6	
0.35	879.3	1080.4	1295.1	1522.7	1762.8	2014.9	2278.5	2553.3	2838.8	3134.7	3440.5	3756.0	4080.7	
0.375	892.1	1097.1	1315.7	1547.3	1791.4	2047.4	2314.8	2593.3	2882.3	3181.4	3490.3	3808.5	4135.8	
0.4	905.7	1114.7	1337.5	1573.2	1821.4	2081.4	2352.8	2635.0	2927.6	3230.0	3542.0	3863.0	4192.7	
0.425	920.0	1133.3	1360.3	1600.4	1852.9	2117.1	2392.5	2678.6	2974.8	3280.6	3595.7	3919.5	4251.7	
0.45	935.2	1152.9	1384.5	1629.1	1886.0	2154.6	2434.2	2724.2	3024.1	3333.4	3651.5	3978.1	4312.8	
0.475	951.3	1173.7	1410.0	1659.4	1920.9	2194.0	2477.9	2772.0	3075.7	3388.4	3709.7	4039.1	4376.2	
0.5	968.4	1195.8	1437.1	1691.4	1957.8	2235.5	2523.9	2822.1	3129.6	3445.9	3770.4	4102.5	4442.0	
0.525	986.6	1219.2	1465.8	1725.3	1996.8	2279.3	2572.2	2874.7	3186.2	3506.0	3833.6	4168.6	4510.3	
0.55	1006.1	1244.3	1496.4	1761.4	2038.1	2325.7	2623.3	2930.1	3245.5	3568.9	3899.7	4237.4	4581.4	
0.575	1027.0	1271.1	1529.1	1799.7	2082.0	2374.7	2677.1	2988.5	3307.9	3634.9	3968.8	4309.2	4655.4	
0.6	1049.4	1299.8	1564.1	1840.7	2128.7	2426.8	2734.2	3050.0	3373.6	3704.2	4041.2	4384.1	4732.5	
0.625	1073.7	1330.8	1601.6	1884.6	2178.5	2482.2	2794.7	3115.1	3442.8	3777.0	4117.0	4462.5	4812.9	
0.65	1100.1	1364.3	1642.1	1931.7	2231.8	2541.3	2859.0	3184.1	3515.9	3853.6	4196.7	4544.5	4896.8	
0.675	1128.7	1400.7	1685.9	1982.5	2289.1	2604.4	2927.5	3257.4	3593.2	3934.4	4280.4	4630.5	4984.4	
0.7	1160.2	1440.4	1733.4	2037.3	2350.7	2672.2	3000.7	3335.3	3675.2	4019.8	4368.5	4720.8	5076.2	
0.725	1194.8	1483.9	1785.3	2097.0	2417.3	2745.0	3079.0	3418.4	3762.3	4110.2	4461.4	4815.6	5172.3	
0.75	1233.2	1531.9	1842.2	2162.0	2489.6	2823.7	3163.2	3507.3	3855.1	4206.0	4559.6	4915.4	5273.1	
0.775	1276.1	1585.2	1904.9	2233.2	2568.3	2908.9	3254.0	3602.6	3954.0	4307.8	4663.5	5020.6	5378.9	
0.8	1324.5	1644.8	1974.6	2311.8	2654.6	3001.7	3352.1	3705.1	4060.0	4416.3	4773.6	5131.7	5490.3	
0.825	1379.7	1712.1	2052.6	2398.9	2749.5	3103.0	3458.6	3815.7	4173.6	4532.1	4890.7	5249.3	5607.6	
0.85	1443.4	1788.8	2140.5	2496.3	2854.5	3214.3	3574.8	3935.5	4296.0	4656.0	5015.3	5373.8	5731.4	
0.875	1517.9	1877.4	2240.7	2605.9	2971.7	3337.3	3702.1	4065.8	4428.2	4789.1	5148.4	5506.1	5862.2	
0.9	1606.8	1981.2	2356.3	2730.6	3103.4	3474.0	3842.3	4208.1	4571.4	4932.3	5290.8	5646.9	6000.7	
0.925	1715.2	2104.8	2491.3	2874.0	3252.6	3627.1	3997.6	4364.3	4727.4	5087.1	5443.6	5797.1	6147.7	
0.95	1851.4	2255.5	2651.9	3041.0	3423.5	3799.9	4170.8	4536.6	4897.9	5254.9	5608.1	5957.7	6303.9	
0.975	2029.3	2444.2	2846.7	3238.6	3621.6	3996.9	4365.4	4728.0	5085.2	5437.6	5785.7	6129.9	6470.4	
1	2274.6	2689.5	3089.3	3476.9	3854.7	4224.0	4586.1	4941.9	5292.1	5637.4	5978.3	6315.1	6648.3	

Tabla 4-9. Valores de ΔG [kJ/m³] válidos para el proceso de FO de la disolución PSSP11 para $S_{sw}=0.04$ [kg/kg].

		W_DSd											
	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375	0.4
0.1	778.7	949.5	1132.6	1327.8	1535.1	1754.4	1985.6	2228.6	2483.3	2749.6	3027.4	3316.6	3617.2
0.125	787.0	960.3	1146.0	1344.0	1554.1	1776.2	2010.3	2256.1	2513.6	2782.6	3063.0	3354.7	3657.5
0.15	795.6	971.5	1159.9	1360.7	1573.8	1798.8	2035.8	2284.5	2544.8	2816.5	3099.6	3393.8	3699.1
0.175	804.5	983.1	1174.4	1378.2	1594.2	1822.2	2062.2	2313.9	2577.1	2851.7	3137.4	3434.2	3741.8
0.2	813.8	995.3	1189.5	1396.3	1615.4	1846.6	2089.6	2344.4	2610.5	2888.0	3176.5	3475.8	3785.8
0.225	823.5	1007.9	1205.2	1415.2	1637.5	1871.8	2118.1	2375.9	2645.2	2925.5	3216.8	3518.8	3831.2
0.25	833.7	1021.1	1221.6	1434.8	1660.4	1898.1	2147.7	2408.7	2681.0	2964.4	3258.5	3563.1	3878.0
0.275	844.3	1034.9	1238.8	1455.4	1684.4	1925.5	2178.4	2442.8	2718.3	3004.7	3301.6	3608.9	3926.3
0.3	855.4	1049.4	1256.7	1476.8	1709.4	1954.0	2210.4	2478.1	2756.9	3046.4	3346.3	3656.3	3976.1
0.325	867.0	1064.5	1275.4	1499.2	1735.5	1983.8	2243.7	2515.0	2797.1	3089.7	3392.5	3705.3	4027.6
0.35	879.3	1080.4	1295.1	1522.7	1762.8	2014.9	2278.5	2553.3	2838.8	3134.7	3440.5	3756.0	4080.7
0.375	892.1	1097.1	1315.7	1547.3	1791.4	2047.4	2314.8	2593.3	2882.3	3181.4	3490.3	3808.5	4135.8
0.4	905.7	1114.7	1337.5	1573.2	1821.4	2081.4	2352.8	2635.0	2927.6	3230.0	3542.0	3863.0	4192.7
0.425	920.0	1133.3	1360.3	1600.4	1852.9	2117.1	2392.5	2678.6	2974.8	3280.6	3595.7	3919.5	4251.7
0.45	935.2	1152.9	1384.5	1629.1	1886.0	2154.6	2434.2	2724.2	3024.1	3333.4	3651.5	3978.1	4312.8
0.475	951.3	1173.7	1410.0	1659.4	1920.9	2194.0	2477.9	2772.0	3075.7	3388.4	3709.7	4039.1	4376.2
0.5	968.4	1195.8	1437.1	1691.4	1957.8	2235.5	2523.9	2822.1	3129.6	3445.9	3770.4	4102.5	4442.0
0.525	986.6	1219.2	1465.8	1725.3	1996.8	2279.3	2572.2	2874.7	3186.2	3506.0	3833.6	4168.6	4510.3
0.55	1006.1	1244.3	1496.4	1761.4	2038.1	2325.7	2623.3	2930.1	3245.5	3568.9	3899.7	4237.4	4581.4
0.575	1027.0	1271.1	1529.1	1799.7	2082.0	2374.7	2677.1	2988.5	3307.9	3634.9	3968.8	4309.2	4655.4
0.6	1049.4	1299.8	1564.1	1840.7	2128.7	2426.8	2734.2	3050.0	3373.6	3704.2	4041.2	4384.1	4732.5
0.625	1073.7	1330.8	1601.6	1884.6	2178.5	2482.2	2794.7	3115.1	3442.8	3777.0	4117.0	4462.5	4812.9
0.65	1100.1	1364.3	1642.1	1931.7	2231.8	2541.3	2859.0	3184.1	3515.9	3853.6	4196.7	4544.5	4896.8
0.675	1128.7	1400.7	1685.9	1982.5	2289.1	2604.4	2927.5	3257.4	3593.2	3934.4	4280.4	4630.5	4984.4
0.7	1160.2	1440.4	1733.4	2037.3	2350.7	2672.2	3000.7	3335.3	3675.2	4019.8	4368.5	4720.8	5076.2
0.725	1194.8	1483.9	1785.3	2097.0	2417.3	2745.0	3079.0	3418.4	3762.3	4110.2	4461.4	4815.6	5172.3
0.75	1233.2	1531.9	1842.2	2162.0	2489.6	2823.7	3163.2	3507.3	3855.1	4206.0	4559.6	4915.4	5273.1
0.775	1276.1	1585.2	1904.9	2233.2	2568.3	2908.9	3254.0	3602.6	3954.0	4307.8	4663.5	5020.6	5378.9
0.8	1324.5	1644.8	1974.6	2311.8	2654.6	3001.7	3352.1	3705.1	4060.0	4416.3	4773.6	5131.7	5490.3
0.825	1379.7	1712.1	2052.6	2398.9	2749.5	3103.0	3458.6	3815.7	4173.6	4532.1	4890.7	5249.3	5607.6
0.85	1443.4	1788.8	2140.5	2496.3	2854.5	3214.3	3574.8	3935.5	4296.0	4656.0	5015.3	5373.8	5731.4
0.875	1517.9	1877.4	2240.7	2605.9	2971.7	3337.3	3702.1	4065.8	4428.2	4789.1	5148.4	5506.1	5862.2
0.9	1606.8	1981.2	2356.3	2730.6	3103.4	3474.0	3842.3	4208.1	4571.4	4932.3	5290.8	5646.9	6000.7
0.925	1715.2	2104.8	2491.3	2874.0	3252.6	3627.1	3997.6	4364.3	4727.4	5087.1	5443.6	5797.1	6147.7
0.95	1851.4	2255.5	2651.9	3041.0	3423.5	3799.9	4170.8	4536.6	4897.9	5254.9	5608.1	5957.7	6303.9
0.975	2029.3	2444.2	2846.7	3238.6	3621.6	3996.9	4365.4	4728.0	5085.2	5437.6	5785.7	6129.9	6470.4
1	2274.6	2689.5	3089.3	3476.9	3854.7	4224.0	4586.1	4941.9	5292.1	5637.4	5978.3	6315.1	6648.3

4.4.1 Acotación de valores. Conclusiones

Tras el análisis realizado, podemos decir que la disolución más viable de momento es SSP, ya que PSSP11 queda descartada por completo para las salinidades $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg] y $S_{sw} = 0.040$ [kg/kg]. No obstante continuaremos con el análisis energético de ambas, ya que pudiera ser que para la salinidad de $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg] resultara más interesante la disolución PSSP11, debido a sus menores límites termodinámicos respecto a la disolución SSP.

5 CONSUMOS ENERGÉTICOS FO

Anteriormente calculamos el incremento de la función de Gibbs del proceso de recuperación de de ambas disoluciones, SSP y PSSP11, con el objeto de caracterizar termodinámicamente dicha etapa, ya que es la única que consume energía y por lo tanto es dónde se encuentra el cuello de botella del proceso, el consumo de energía. Estos primeros resultados fueron acotados simplemente por la información de la que se disponía, las propiedades de las disoluciones hasta una concentración de W_{DS} igual a 0.4. Seguidamente se analizó la espontaneidad del proceso de la Forwards Osmosis, y se volvió acotar el problema, concretamente la primera etapa del proceso global. Y ahora de lo que se trata es de analizar energéticamente los valores que cumplen los requisitos anteriores y analizar por tanto la viabilidad de estas disoluciones, llegando a la conclusión de si serían válidas o no para abordar el fenómeno de la Forward Osmosis. Para poder contractar valores y tener una referencia, previamente vamos a calcular el límite termodinámico de un proceso de desalación. La siguiente figura muestra un esquema de un proceso de desalación:

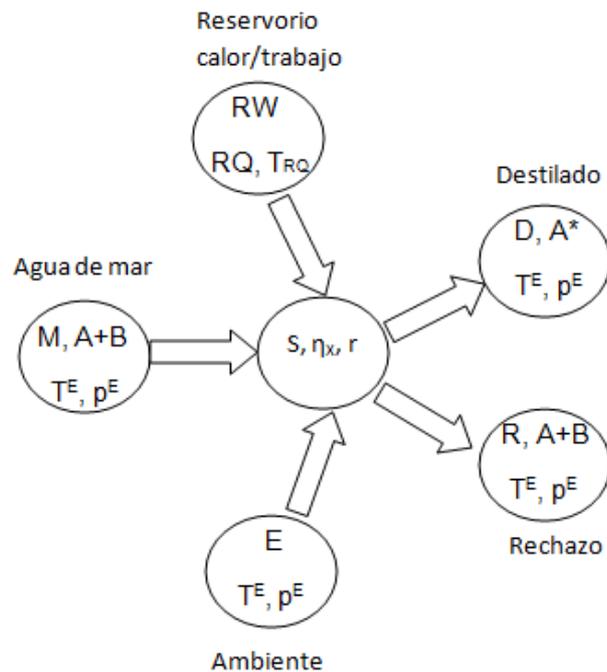


Figura 5-1. Esquema del proceso de desalación.

5.1 Límite termodinámico de un proceso de desalación

En el proceso anterior, una máquina extractora S cíclica recibe un aporte de una solución M, mezcla de disolvente A y de soluto B, produciendo disolvente puro D, un residuo R, mezcla de disolvente y soluto. La máquina necesita al menos de dos reservorios de energía, uno de los cuales ha de ser de calor y el otro puede ser de trabajo o de calor a distinta temperatura del primero. Dicho proceso tendría una entrada de agua de mar que iría hacia la máquina desaladora, dónde interacciona con el ambiente y otro reservorio mas para poder extraer el soluto, sal, y producir así dos corrientes, una de agua pura llamado destilado y otra rechazo, compuesta por agua y sal, pero con una concentración mayor que el agua de mar. Dicha máquina está definida por su rendimiento exergético, η_x , y por su razón de conversión, r, definida como:

$$r = \frac{m_A^D}{m_A^M} \quad (5-1)$$

Una vez comprendido el proceso se puede formular la ecuación que permite calcular el límite termodinámico, es decir el incremento de la función de Gibbs para el proceso de desalación:

$$\Delta_{des}G(T, p, m_A^D, I^M, r \leq r^{sat}) = m_A^D R T \frac{2 I^M}{r} \int_{I^M}^{\frac{I^M}{1-r}} \frac{\varphi(T, p, I)}{I} dI \quad (5-2)$$

Dónde:

- m_A^D [Kg/m³]. Para poder comparar este incremento con el de la Forwards Osmosis realizaremos los cálculos con $m_A^D = 1$ [Kg/m³]
- $R = 8.314472$ [Pa m³/mol K], constante de los gases idelaes.
- $T = 298$ [K], temperatura ambiente del proceso.
- φ , coeficiente osmótico del disolvente.
- I [mol/Kg], coeficiente de actividad iónico medio. Puesto que el cloruro sódico es un electrolito que se disocia según $v^+ = 1, z^+ = 1, v^- = 1, z^- = 1$, su fuerza iónica es igual a la molalidad del soluto, $I = b_B$.

Tenemos todos los datos para realizar los cálculos excepto la expresión del coeficiente osmótico del agua de mar. No obstante se ha hecho uso del artículo “*Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data*”, escrito por Mostafa H. Sharqawya, John H. Lienhard Va y Syed M. Zubairb, dónde se ha podido encontrar le expresión buscada, que a continuación se muestra:

$$\phi = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 + a_4 t^4 + a_5 S + a_6 S t + a_7 S t^3 + a_8 S^2 + a_9 S^2 t + a_{10} S^2 t^2$$

Present work based on Bromley's et al. [79] data

where

$$a_1 = 8.9453 \times 10^{-1}, a_2 = 4.1561 \times 10^{-4}, a_3 = -4.6262 \times 10^{-6}, a_4 = 2.2211 \times 10^{-11}$$

$$a_5 = -1.1445 \times 10^{-1}, a_6 = -1.4783 \times 10^{-3}, a_7 = -1.3526 \times 10^{-8}, a_8 = 7.0132$$

$$a_9 = 5.696 \times 10^{-2}, a_{10} = -2.8624 \times 10^{-4}$$

Validity: $0 \leq t \leq 200$ °C; $10 \leq S \leq 120$ g/kg

Accuracy: ± 1.4 %

Figura 5-2. Ecuación del coeficiente osmótico del disolvente para el agua de mar. [27]

Como se observa en la figura 5-2, la expresión se encuentra en función de dos parámetros, S, concentración del agua de mar, y t, temperatura del agua de mar. Así que para poder utilizarla en la ecuación de incremento de la función de Gibbs, 5-2, debemos hacer los siguientes cambios:

$$S = I M_B \quad (5-3)$$

Pudiendo de este modo integrar la parte correspondiente de la ecuación respecto del coeficiente de actividad iónico medio, I. Por lo tanto la ecuación 5-2 quedaría del siguiente modo:

$$\begin{aligned} \Delta_{des} G(T, p, m_A^D, I^M, r \leq r^{sat}) = & \\ m_A^D R T \frac{2 I^M}{r} \int_{I^M}^{\frac{I^M}{1-r}} \frac{a_1}{I} + \frac{a_2}{I} T + \frac{a_3}{I} T^2 + \frac{a_4}{I} T^3 + \frac{a_5}{I} I M_B + \frac{a_6}{I} T I M_B & \\ + \frac{a_7}{I} T^3 I M_B + \frac{a_8}{I} I^2 M_B^2 + \frac{a_9}{I} T I^2 M_B^2 + \frac{a_{10}}{I} T^2 I^2 M_B^2 & \\ \Delta_{des} G(T, p, m_A^D, I^M, r \leq r^{sat}) = & \\ m_A^D R T \frac{2 I^M}{r} \left[a_1 \ln\left(\frac{1}{1-r}\right) + a_2 T \ln\left(\frac{1}{1-r}\right) + a_3 T^2 \ln\left(\frac{1}{1-r}\right) + a_4 T^3 \ln\left(\frac{1}{1-r}\right) \right. & \\ + a_5 M_B \ln\left(\frac{I^M}{1-r} - I^M\right) + a_6 T M_B \ln\left(\frac{I^M}{1-r} - I^M\right) + a_7 T^3 M_B \ln\left(\frac{I^M}{1-r} - I^M\right) & \\ + a_8 M_B^2 \ln\left(\frac{\left(\frac{I^M}{1-r}\right)^2}{2} - \frac{(I^M)^2}{2}\right) + a_9 T M_B^2 \ln\left(\frac{\left(\frac{I^M}{1-r}\right)^2}{2} - \frac{(I^M)^2}{2}\right) & \\ \left. + a_{10} T^2 M_B^2 \ln\left(\frac{\left(\frac{I^M}{1-r}\right)^2}{2} - \frac{(I^M)^2}{2}\right) \right] & \end{aligned} \quad (5-4)$$

Particularizando la ecuación 5-4 para las salinidades de agua de mar $S_{sw} = 0.024, 0.035$ y 0.025 [kg/kg] se obtienen los límites termodinámicos del proceso de desalación. Representáanse así en la tabla inferior, el consumo mínimo necesario para la obtención de un metro cúbico de agua dulce.

Tabla 5-1. Límite termodinámico de la desalación para $S_{sw} = 0.024, 0.035$ y 0.04 [kg/kg].

	$S_{sw}=0.024$ [kg/kg]	$S_{sw}=0.035$ [kg/kg]	$S_{sw}=0.040$ [kg/kg]
ΔG [KJ/m ³]	2217.90	3264.00	3751.00
ΔG [kWh/m ³]	0.616	0.907	1.042

5.2 Limite termodinámico proceso desalación. Acotación

Conocidos los valores de los límites termodinámicos de un proceso de desalación, se puede proceder a la tercera y última acotación de los valores de los límites termodinámicos de proceso de recuperación de la disolución en la FO. Para cada salinidad de agua de mar, se van a descartar aquellos valores de ΔG , que superen los límites de un proceso de desalación, con el objeto de comprobar que en el proceso de FO hay valores dentro de unos límites energéticos viables, y poder continuar así con el estudio presente.

5.2.1 Acotación límites termodinámicos FO. SSP

Las siguientes tablas muestran a continuación la acotación de los valores termodinámicos del proceso FO tomando como referencia los límites de un proceso de desalación. Los valores de dichos límites se corresponden a la disolución SSP para las salinidades de agua de mar $S_{sw} = 0.024, 0.035$ y 0.040 [kg/kg], respectivamente.

El color de las celdas hace referencia a:

- Valores para los cuales la disolución está caracterizada pero no son válidos para la FO.
- Valores para los cuales la disolución está caracterizada y son válidas para la FO.
- Valores para los cuales la disolución no está caracterizada.
- Valores dentro de los límites energéticos comparados con un proceso de desalación.

Separación térmica en soluciones extractoras de ósmosis directa: Aplicación a desalación de agua de mar

Para la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg], la referencia tomada se corresponde con $\Delta G = 0.616$ [kWh/m³].

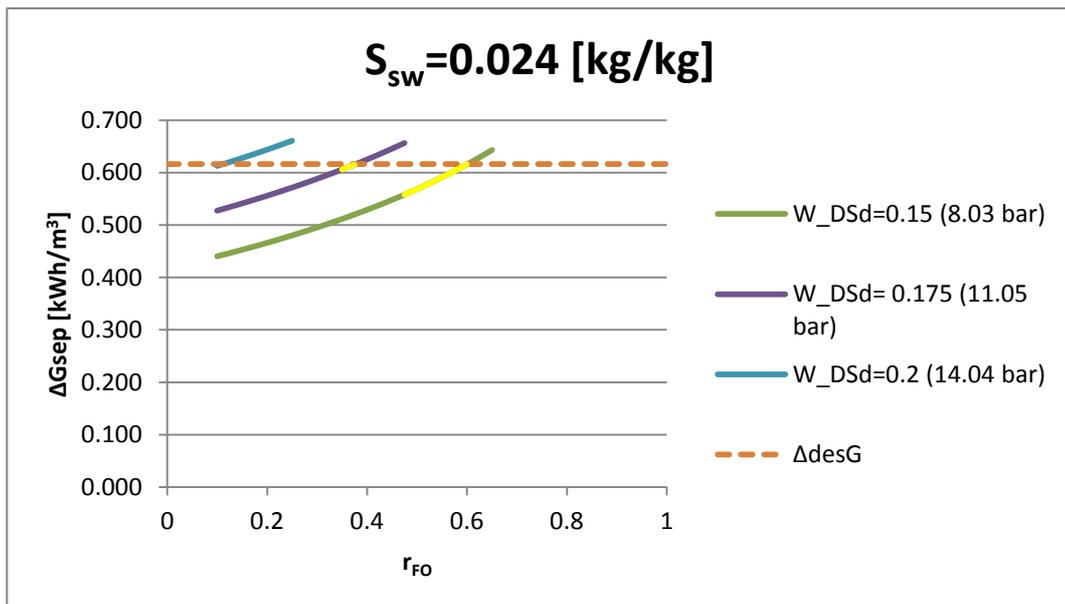
Tabla 5-2. ΔG para la disolución SSP y una salinidad de mar de $S_{sw} = 0.024$ [Kg/Kg].

		W_DSd												
		0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375	0.4
L	0.1	0.264	0.353	0.441	0.527	0.613	0.697	0.780	0.861	0.942	1.021	1.099	1.175	1.251
	0.125	0.268	0.358	0.447	0.534	0.620	0.705	0.788	0.870	0.951	1.030	1.108	1.185	1.261
	0.15	0.273	0.364	0.453	0.541	0.628	0.713	0.797	0.879	0.960	1.040	1.118	1.195	1.271
	0.175	0.277	0.369	0.460	0.548	0.636	0.721	0.805	0.888	0.970	1.049	1.128	1.205	1.281
	0.2	0.282	0.375	0.466	0.556	0.644	0.730	0.815	0.898	0.979	1.060	1.138	1.215	1.291
	0.225	0.287	0.381	0.473	0.563	0.652	0.739	0.824	0.907	0.989	1.070	1.149	1.226	1.302
	0.25	0.293	0.387	0.480	0.571	0.661	0.748	0.834	0.917	1.000	1.080	1.159	1.237	1.312
	0.275	0.298	0.394	0.488	0.580	0.669	0.757	0.843	0.928	1.010	1.091	1.170	1.248	1.323
	0.3	0.304	0.401	0.495	0.588	0.679	0.767	0.854	0.938	1.021	1.102	1.181	1.259	1.335
	0.325	0.310	0.408	0.503	0.597	0.688	0.777	0.864	0.949	1.032	1.113	1.193	1.270	1.346
	0.35	0.316	0.415	0.512	0.606	0.698	0.787	0.875	0.960	1.044	1.125	1.204	1.282	1.358
	0.375	0.322	0.423	0.520	0.615	0.708	0.798	0.886	0.972	1.055	1.137	1.216	1.294	1.370
	0.4	0.329	0.431	0.529	0.625	0.718	0.809	0.898	0.984	1.068	1.149	1.229	1.306	1.382
	0.425	0.336	0.439	0.538	0.635	0.729	0.821	0.909	0.996	1.080	1.162	1.241	1.319	1.394
	0.45	0.343	0.447	0.548	0.646	0.740	0.832	0.922	1.008	1.093	1.175	1.254	1.332	1.407
	0.475	0.351	0.456	0.558	0.657	0.752	0.845	0.934	1.021	1.106	1.188	1.268	1.345	1.420
	0.5	0.359	0.466	0.568	0.668	0.764	0.857	0.947	1.035	1.119	1.202	1.281	1.358	1.433
	0.525	0.368	0.475	0.579	0.680	0.777	0.870	0.961	1.049	1.133	1.216	1.295	1.372	1.447
	0.55	0.377	0.486	0.591	0.692	0.790	0.884	0.975	1.063	1.148	1.230	1.310	1.387	1.461
	0.575	0.386	0.497	0.603	0.705	0.803	0.898	0.990	1.078	1.163	1.245	1.324	1.401	1.476
	0.6	0.396	0.508	0.616	0.719	0.818	0.913	1.005	1.093	1.178	1.260	1.340	1.416	1.490
	0.625	0.407	0.520	0.629	0.733	0.833	0.928	1.020	1.109	1.194	1.276	1.355	1.432	1.505
	0.65	0.418	0.533	0.643	0.748	0.848	0.944	1.037	1.125	1.211	1.292	1.371	1.447	1.521
	0.675	0.430	0.547	0.658	0.764	0.865	0.961	1.054	1.142	1.228	1.309	1.388	1.464	1.537
0.7	0.443	0.561	0.673	0.780	0.882	0.979	1.072	1.160	1.245	1.327	1.405	1.480	1.553	
0.725	0.456	0.576	0.690	0.798	0.900	0.997	1.090	1.179	1.264	1.345	1.423	1.498	1.570	
0.75	0.471	0.593	0.708	0.816	0.919	1.017	1.109	1.198	1.283	1.364	1.441	1.515	1.587	
0.775	0.487	0.610	0.726	0.836	0.939	1.037	1.130	1.218	1.302	1.383	1.460	1.534	1.604	
0.8	0.504	0.630	0.747	0.857	0.960	1.058	1.151	1.239	1.323	1.403	1.479	1.553	1.623	
0.825	0.523	0.650	0.768	0.879	0.983	1.081	1.173	1.261	1.344	1.424	1.500	1.572	1.641	
0.85	0.544	0.673	0.792	0.903	1.007	1.104	1.197	1.284	1.367	1.446	1.521	1.592	1.661	
0.875	0.567	0.697	0.817	0.928	1.032	1.130	1.221	1.308	1.390	1.468	1.542	1.613	1.680	
0.9	0.593	0.724	0.845	0.956	1.060	1.156	1.248	1.333	1.415	1.491	1.565	1.634	1.701	
0.925	0.622	0.754	0.875	0.986	1.089	1.185	1.275	1.360	1.440	1.516	1.588	1.657	1.722	
0.95	0.656	0.788	0.908	1.018	1.120	1.215	1.304	1.388	1.467	1.541	1.612	1.679	1.744	
0.975	0.694	0.826	0.945	1.054	1.154	1.248	1.335	1.417	1.495	1.568	1.637	1.703	1.766	
1	0.740	0.869	0.986	1.093	1.191	1.283	1.368	1.449	1.524	1.596	1.663	1.728	1.789	

Analizando la tabla anterior se puede decir que tan sólo ocho valores tiene sentido energéticamente. Aunque sí existen muchos valores que están por debajo del límite termodinámico de un proceso de desalación, pero no éstos quedan excluidos del estudio por no cumplir el criterio de espontaneidad. A continuación se muestra de forma gráfica los resultados de la tabla anterior, dónde están señalados en amarillo fosforito los valores válidos para el proceso FO.

En la gráfica 5-1 se ha representado en el en el eje X la razón de conversión del proceso de separación de la FO, r_{FO} , y en el eje Y los valores de los límites termodinámicos de la FO.

Cada línea de color, azul morado y verde, hace referencia a una concentración de disolución diluida, o aun incremento de presión inicial, y representa la evolución del límite termodinámico de la FO a medida que aumenta la razón de conversión del proceso. Se ha establecido con una línea naranja perpuntada el límite termodinámico para un proceso de desalación, en este caso para la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg], y se ha marcado en amarillo os valores viables energéticamente para cada concentración de la disolución diluida w_{DSd} .



Gráfica 5-1. ΔG para la disolución SSP y una salinidad de mar de $S_{sw}=0.024$ [Kg/Kg].

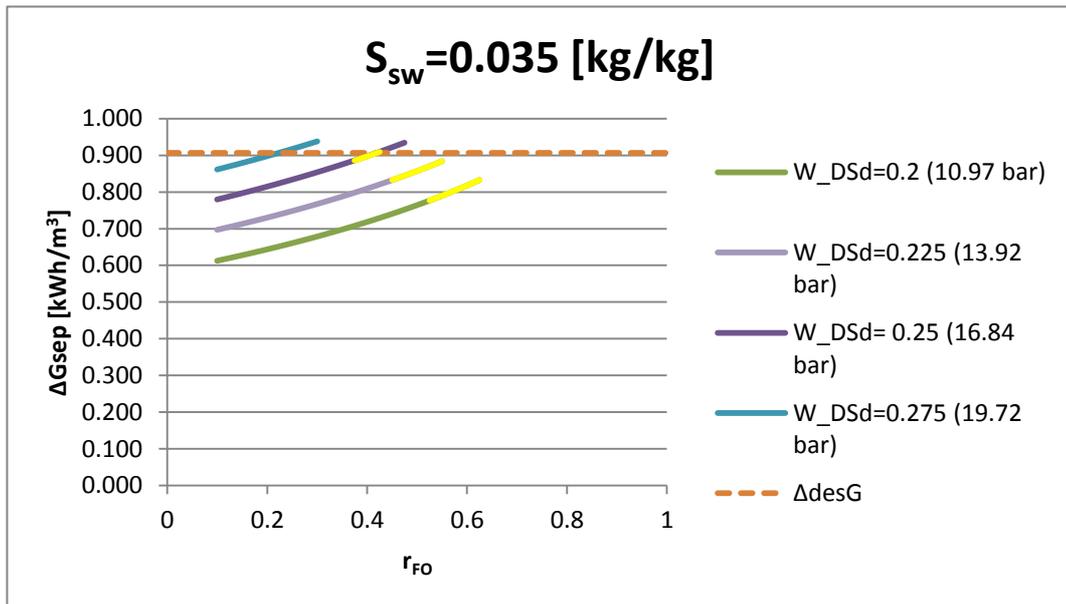
A continuación se muestra la tabla con la acotación de los límites termodinámicos de la FO para la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg], tomando como referencia su correspondiente límite termodinámico del proceso de desalación, $\Delta G = 0.907$ [kWh/m³].

Tabla 5-3. ΔG para la disolución SSP y una salinidad de mar de $S_{sw} = 0.035$ [Kg/Kg].

		W_DSd												
		0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375	0.4
L	0.1	0.264	0.353	0.441	0.527	0.613	0.697	0.780	0.861	0.942	1.021	1.099	1.175	1.251
	0.125	0.268	0.358	0.447	0.534	0.620	0.705	0.788	0.870	0.951	1.030	1.108	1.185	1.261
	0.15	0.273	0.364	0.453	0.541	0.628	0.713	0.797	0.879	0.960	1.040	1.118	1.195	1.271
	0.175	0.277	0.369	0.460	0.548	0.636	0.721	0.805	0.888	0.970	1.049	1.128	1.205	1.281
	0.2	0.282	0.375	0.466	0.556	0.644	0.730	0.815	0.898	0.979	1.060	1.138	1.215	1.291
	0.225	0.287	0.381	0.473	0.563	0.652	0.739	0.824	0.907	0.989	1.070	1.149	1.226	1.302
	0.25	0.293	0.387	0.480	0.571	0.661	0.748	0.834	0.917	1.000	1.080	1.159	1.237	1.312
	0.275	0.298	0.394	0.488	0.580	0.669	0.757	0.843	0.928	1.010	1.091	1.170	1.248	1.323
	0.3	0.304	0.401	0.495	0.588	0.679	0.767	0.854	0.938	1.021	1.102	1.181	1.259	1.335
	0.325	0.310	0.408	0.503	0.597	0.688	0.777	0.864	0.949	1.032	1.113	1.193	1.270	1.346
	0.35	0.316	0.415	0.512	0.606	0.698	0.787	0.875	0.960	1.044	1.125	1.204	1.282	1.358
	0.375	0.322	0.423	0.520	0.615	0.708	0.798	0.886	0.972	1.055	1.137	1.216	1.294	1.370
	0.4	0.329	0.431	0.529	0.625	0.718	0.809	0.898	0.984	1.068	1.149	1.229	1.306	1.382
	0.425	0.336	0.439	0.538	0.635	0.729	0.821	0.909	0.996	1.080	1.162	1.241	1.319	1.394
	0.45	0.343	0.447	0.548	0.646	0.740	0.832	0.922	1.008	1.093	1.175	1.254	1.332	1.407
	0.475	0.351	0.456	0.558	0.657	0.752	0.845	0.934	1.021	1.106	1.188	1.268	1.345	1.420
	0.5	0.359	0.466	0.568	0.668	0.764	0.857	0.947	1.035	1.119	1.202	1.281	1.358	1.433
	0.525	0.368	0.475	0.579	0.680	0.777	0.870	0.961	1.049	1.133	1.216	1.295	1.372	1.447
	0.55	0.377	0.486	0.591	0.692	0.790	0.884	0.975	1.063	1.148	1.230	1.310	1.387	1.461
	0.575	0.386	0.497	0.603	0.705	0.803	0.898	0.990	1.078	1.163	1.245	1.324	1.401	1.476
0.6	0.396	0.508	0.616	0.719	0.818	0.913	1.005	1.093	1.178	1.260	1.340	1.416	1.490	
0.625	0.407	0.520	0.629	0.733	0.833	0.928	1.020	1.109	1.194	1.276	1.355	1.432	1.505	
0.65	0.418	0.533	0.643	0.748	0.848	0.944	1.037	1.125	1.211	1.292	1.371	1.447	1.521	
0.675	0.430	0.547	0.658	0.764	0.865	0.961	1.054	1.142	1.228	1.309	1.388	1.464	1.537	
0.7	0.443	0.561	0.673	0.780	0.882	0.979	1.072	1.160	1.245	1.327	1.405	1.480	1.553	
0.725	0.456	0.576	0.690	0.798	0.900	0.997	1.090	1.179	1.264	1.345	1.423	1.498	1.570	
0.75	0.471	0.593	0.708	0.816	0.919	1.017	1.109	1.198	1.283	1.364	1.441	1.515	1.587	
0.775	0.487	0.610	0.726	0.836	0.939	1.037	1.130	1.218	1.302	1.383	1.460	1.534	1.604	
0.8	0.504	0.630	0.747	0.857	0.960	1.058	1.151	1.239	1.323	1.403	1.479	1.553	1.623	
0.825	0.523	0.650	0.768	0.879	0.983	1.081	1.173	1.261	1.344	1.424	1.500	1.572	1.641	
0.85	0.544	0.673	0.792	0.903	1.007	1.104	1.197	1.284	1.367	1.446	1.521	1.592	1.661	
0.875	0.567	0.697	0.817	0.928	1.032	1.130	1.221	1.308	1.390	1.468	1.542	1.613	1.680	
0.9	0.593	0.724	0.845	0.956	1.060	1.156	1.248	1.333	1.415	1.491	1.565	1.634	1.701	
0.925	0.622	0.754	0.875	0.986	1.089	1.185	1.275	1.360	1.440	1.516	1.588	1.657	1.722	
0.95	0.656	0.788	0.908	1.018	1.120	1.215	1.304	1.388	1.467	1.541	1.612	1.679	1.744	
0.975	0.694	0.826	0.945	1.054	1.154	1.248	1.335	1.417	1.495	1.568	1.637	1.703	1.766	
1	0.740	0.869	0.986	1.093	1.191	1.283	1.368	1.449	1.524	1.596	1.663	1.728	1.789	
0.975	0.694	0.826	0.945	1.054	1.154	1.248	1.335	1.417	1.495	1.568	1.637	1.703	1.766	
1	0.740	0.869	0.986	1.093	1.191	1.283	1.368	1.449	1.524	1.596	1.663	1.728	1.789	

En la gráfica 5-2 se ha representado en el eje X la razón de conversión del proceso de separación de la FO, r_{FO} , y en el eje Y los valores de los límites termodinámicos de la FO.

Cada línea de color, azul morado, lila y verde, hace referencia a una concentración de disolución diluida, o aun incremento de presión inicial, y representa la evolución del límite termodinámico de la FO a medida que aumenta la razón de conversión del proceso. Se ha establecido con una línea naranja perpuntada el límite termodinámico para un proceso de desalación, en este caso para la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg], y se ha marcado en amarillo los valores viables energéticamente para cada concentración de la disolución diluida w_{DSd} .



Gráfica 5-2. ΔG para la disolución SSP y una salinidad de mar de $S_{sw}=0.035$ [kg/kg].

Para la salinidad de agua de mar $S_{sw}=0.035$ [Kg/Kg] también encontramos algunos valores interesantes, exactamente trece con valores, en el rango $\Delta G = [0.777; 0.909]$ [kWh/m³]. Todos los valores por debajo del límite termodinámico del proceso de desalación $\Delta G = 0.907$ [kWh/m³], excepto el último que aún así ha sido seleccionado por su cercanía al valor de referencia. La diferencia respecto a la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg], es que los valores viables se encuentran para concentraciones de la disolución mayores.

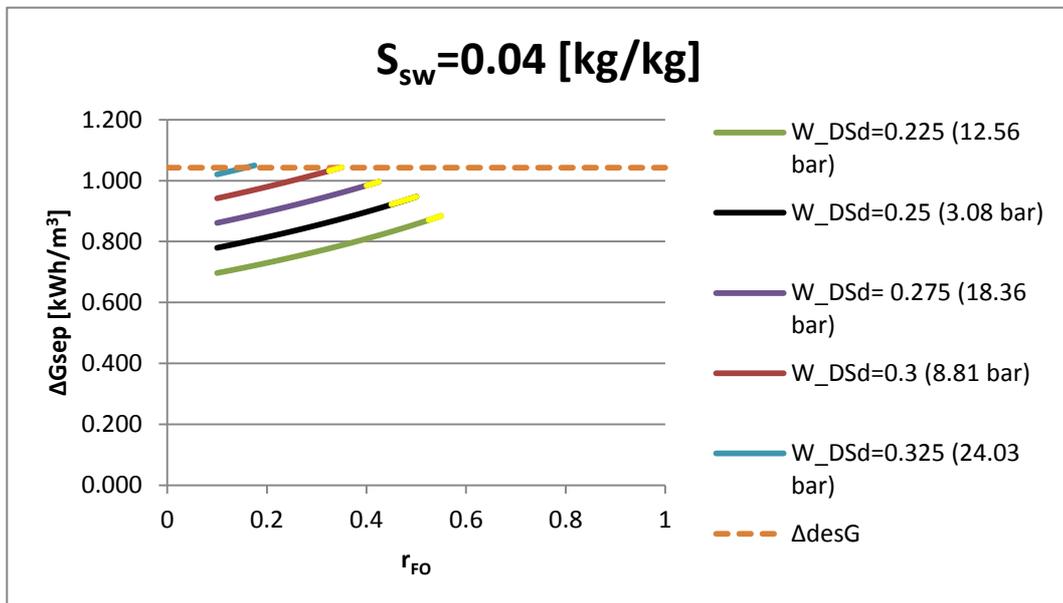
A continuación se muestra la tabla con la acotación de los límites termodinámicos de la FO para la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.04$ [kg/kg], tomando como referencia su correspondiente límite termodinámico del proceso de desalación, $\Delta G = 1.042$ [kWh/m³].

Tabla 5-4. ΔG para la disolución SSP y una salinidad de mar de $S_{sw} = 0.04$ [Kg/Kg].

		W_DSd												
		0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375	0.4
W	0.1	0.264	0.353	0.441	0.527	0.613	0.697	0.780	0.861	0.942	1.021	1.099	1.175	1.251
	0.125	0.268	0.358	0.447	0.534	0.620	0.705	0.788	0.870	0.951	1.030	1.108	1.185	1.261
	0.15	0.273	0.364	0.453	0.541	0.628	0.713	0.797	0.879	0.960	1.040	1.118	1.195	1.271
	0.175	0.277	0.369	0.460	0.548	0.636	0.721	0.805	0.888	0.970	1.049	1.128	1.205	1.281
	0.2	0.282	0.375	0.466	0.556	0.644	0.730	0.815	0.898	0.979	1.060	1.138	1.215	1.291
	0.225	0.287	0.381	0.473	0.563	0.652	0.739	0.824	0.907	0.989	1.070	1.149	1.226	1.302
	0.25	0.293	0.387	0.480	0.571	0.661	0.748	0.834	0.917	1.000	1.080	1.159	1.237	1.312
	0.275	0.298	0.394	0.488	0.580	0.669	0.757	0.843	0.928	1.010	1.091	1.170	1.248	1.323
	0.3	0.304	0.401	0.495	0.588	0.679	0.767	0.854	0.938	1.021	1.102	1.181	1.259	1.335
	0.325	0.310	0.408	0.503	0.597	0.688	0.777	0.864	0.949	1.032	1.113	1.193	1.270	1.346
	0.35	0.316	0.415	0.512	0.606	0.698	0.787	0.875	0.960	1.044	1.125	1.204	1.282	1.358
	0.375	0.322	0.423	0.520	0.615	0.708	0.798	0.886	0.972	1.055	1.137	1.216	1.294	1.370
	0.4	0.329	0.431	0.529	0.625	0.718	0.809	0.898	0.984	1.068	1.149	1.229	1.306	1.382
	0.425	0.336	0.439	0.538	0.635	0.729	0.821	0.909	0.996	1.080	1.162	1.241	1.319	1.394
	0.45	0.343	0.447	0.548	0.646	0.740	0.832	0.922	1.008	1.093	1.175	1.254	1.332	1.407
	0.475	0.351	0.456	0.558	0.657	0.752	0.845	0.934	1.021	1.106	1.188	1.268	1.345	1.420
	0.5	0.359	0.466	0.568	0.668	0.764	0.857	0.947	1.035	1.119	1.202	1.281	1.358	1.433
	0.525	0.368	0.475	0.579	0.680	0.777	0.870	0.961	1.049	1.133	1.216	1.295	1.372	1.447
	0.55	0.377	0.486	0.591	0.692	0.790	0.884	0.975	1.063	1.148	1.230	1.310	1.387	1.461
	0.575	0.386	0.497	0.603	0.705	0.803	0.898	0.990	1.078	1.163	1.245	1.324	1.401	1.476
0.6	0.396	0.508	0.616	0.719	0.818	0.913	1.005	1.093	1.178	1.260	1.340	1.416	1.490	
0.625	0.407	0.520	0.629	0.733	0.833	0.928	1.020	1.109	1.194	1.276	1.355	1.432	1.505	
0.65	0.418	0.533	0.643	0.748	0.848	0.944	1.037	1.125	1.211	1.292	1.371	1.447	1.521	
0.675	0.430	0.547	0.658	0.764	0.865	0.961	1.054	1.142	1.228	1.309	1.388	1.464	1.537	
0.7	0.443	0.561	0.673	0.780	0.882	0.979	1.072	1.160	1.245	1.327	1.405	1.480	1.553	
0.725	0.456	0.576	0.690	0.798	0.900	0.997	1.090	1.179	1.264	1.345	1.423	1.498	1.570	
0.75	0.471	0.593	0.708	0.816	0.919	1.017	1.109	1.198	1.283	1.364	1.441	1.515	1.587	
0.775	0.487	0.610	0.726	0.836	0.939	1.037	1.130	1.218	1.302	1.383	1.460	1.534	1.604	
0.8	0.504	0.630	0.747	0.857	0.960	1.058	1.151	1.239	1.323	1.403	1.479	1.553	1.623	
0.825	0.523	0.650	0.768	0.879	0.983	1.081	1.173	1.261	1.344	1.424	1.500	1.572	1.641	
0.85	0.544	0.673	0.792	0.903	1.007	1.104	1.197	1.284	1.367	1.446	1.521	1.592	1.661	
0.875	0.567	0.697	0.817	0.928	1.032	1.130	1.221	1.308	1.390	1.468	1.542	1.613	1.680	
0.9	0.593	0.724	0.845	0.956	1.060	1.156	1.248	1.333	1.415	1.491	1.565	1.634	1.701	
0.925	0.622	0.754	0.875	0.986	1.089	1.185	1.275	1.360	1.440	1.516	1.588	1.657	1.722	
0.95	0.656	0.788	0.908	1.018	1.120	1.215	1.304	1.388	1.467	1.541	1.612	1.679	1.744	
0.975	0.694	0.826	0.945	1.054	1.154	1.248	1.335	1.417	1.495	1.568	1.637	1.703	1.766	
1	0.740	0.869	0.986	1.093	1.191	1.283	1.368	1.449	1.524	1.596	1.663	1.728	1.789	

En la gráfica 5-3 se ha representado en el eje X la razón de conversión del proceso de separación de la FO, r_{FO} , y en el eje Y los valores de los límites termodinámicos de la FO.

Cada línea de color, azul, rojo, morado, negro y verde, hace referencia a una concentración de disolución diluida, o aun incremento de presión inicial, y representa la evolución del límite termodinámico de la FO a medida que aumenta la razón de conversión del proceso. Se ha establecido con una línea naranja perpuntada el límite termodinámico para un proceso de desalación, en este caso para la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.040$ [kg/kg], y se ha marcado en amarillo los valores viables energéticamente para cada concentración de la disolución diluida w_{DSd} .



Gráfica 5-3. ΔG para la disolución SSP y una salinidad de mar de $S_{sw}=0.040$ [Kg/Kg].

Para la salinidad de agua de mar $S_{sw}=0.040$ [Kg/Kg] también encontramos valores por debajo del límite de desalación $\Delta G = 1.042$ [kWh/m³] dentro del rango [0.870, 1.044] [kWh/m³], con valores de la concentración de las disoluciones diluidas mayores que en los dos casos anteriores.

5.2.2 Acotación límites termodinámicos FO. PSSP11

Para la disolución PSSP11, la cotación de los valores se ha realizadon exactamente igual que para la SSP. De modo que se va proceder a la muestra de las acotaciones en sus respectivas tablas y gráficas.

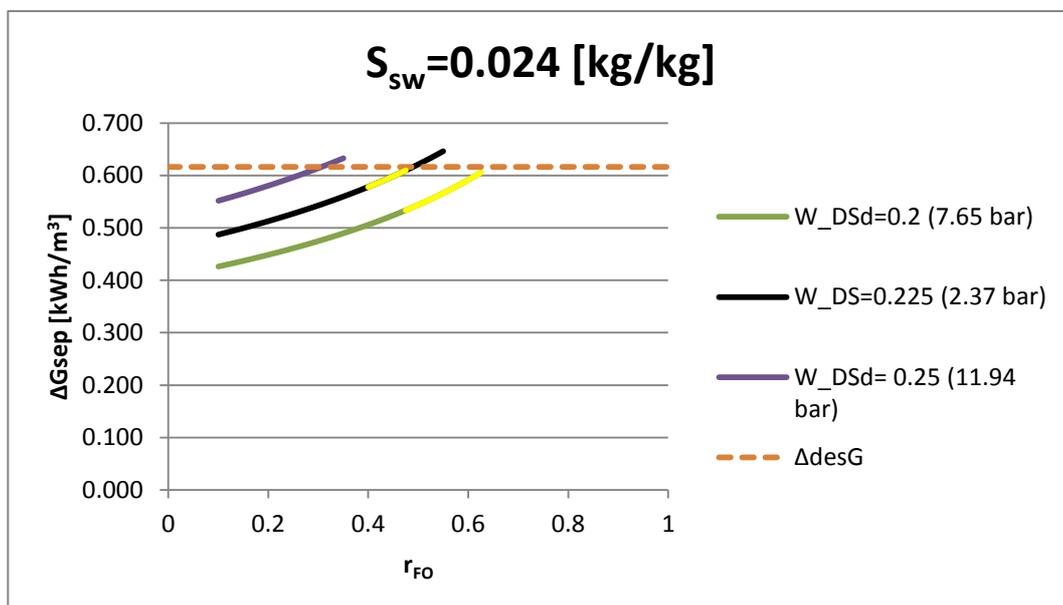
A continuación se muestra la tabla con la acotación de los límites termodinámicos de la FO para la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg], tomando como referencia su correspondiente límite termodinámico del proceso de desalación, $\Delta G = 0.616$ [kWh/m³].

Tabla 5-5. ΔG para la disolución PSSP11 y una salinidad de mar de $S_{sw} = 0.024$ [Kg/Kg].

		W_DSd												
		0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375	0.4
t	0.1	0.216	0.264	0.315	0.369	0.426	0.487	0.552	0.619	0.690	0.764	0.841	0.921	1.005
	0.125	0.219	0.267	0.318	0.373	0.432	0.493	0.558	0.627	0.698	0.773	0.851	0.932	1.016
	0.15	0.221	0.270	0.322	0.378	0.437	0.500	0.565	0.635	0.707	0.782	0.861	0.943	1.028
	0.175	0.223	0.273	0.326	0.383	0.443	0.506	0.573	0.643	0.716	0.792	0.872	0.954	1.039
	0.2	0.226	0.276	0.330	0.388	0.449	0.513	0.580	0.651	0.725	0.802	0.882	0.966	1.052
	0.225	0.229	0.280	0.335	0.393	0.455	0.520	0.588	0.660	0.735	0.813	0.894	0.977	1.064
	0.25	0.232	0.284	0.339	0.399	0.461	0.527	0.597	0.669	0.745	0.823	0.905	0.990	1.077
	0.275	0.235	0.287	0.344	0.404	0.468	0.535	0.605	0.679	0.755	0.835	0.917	1.002	1.091
	0.3	0.238	0.291	0.349	0.410	0.475	0.543	0.614	0.688	0.766	0.846	0.930	1.016	1.104
	0.325	0.241	0.296	0.354	0.416	0.482	0.551	0.623	0.699	0.777	0.858	0.942	1.029	1.119
	0.35	0.244	0.300	0.360	0.423	0.490	0.560	0.633	0.709	0.789	0.871	0.956	1.043	1.134
	0.375	0.248	0.305	0.365	0.430	0.498	0.569	0.643	0.720	0.801	0.884	0.970	1.058	1.149
	0.4	0.252	0.310	0.372	0.437	0.506	0.578	0.654	0.732	0.813	0.897	0.984	1.073	1.165
	0.425	0.256	0.315	0.378	0.445	0.515	0.588	0.665	0.744	0.826	0.911	0.999	1.089	1.181
	0.45	0.260	0.320	0.385	0.453	0.524	0.599	0.676	0.757	0.840	0.926	1.014	1.105	1.198
	0.475	0.264	0.326	0.392	0.461	0.534	0.609	0.688	0.770	0.854	0.941	1.030	1.122	1.216
	0.5	0.269	0.332	0.399	0.470	0.544	0.621	0.701	0.784	0.869	0.957	1.047	1.140	1.234
	0.525	0.274	0.339	0.407	0.479	0.555	0.633	0.715	0.799	0.885	0.974	1.065	1.158	1.253
	0.55	0.279	0.346	0.416	0.489	0.566	0.646	0.729	0.814	0.902	0.991	1.083	1.177	1.273
	0.575	0.285	0.353	0.425	0.500	0.578	0.660	0.744	0.830	0.919	1.010	1.102	1.197	1.293
0.6	0.292	0.361	0.434	0.511	0.591	0.674	0.759	0.847	0.937	1.029	1.123	1.218	1.315	
0.625	0.298	0.370	0.445	0.523	0.605	0.689	0.776	0.865	0.956	1.049	1.144	1.240	1.337	
0.65	0.306	0.379	0.456	0.537	0.620	0.706	0.794	0.884	0.977	1.070	1.166	1.262	1.360	
0.675	0.314	0.389	0.468	0.551	0.636	0.723	0.813	0.905	0.998	1.093	1.189	1.286	1.385	
0.7	0.322	0.400	0.481	0.566	0.653	0.742	0.834	0.926	1.021	1.117	1.213	1.311	1.410	
0.725	0.332	0.412	0.496	0.582	0.671	0.763	0.855	0.950	1.045	1.142	1.239	1.338	1.437	
0.75	0.343	0.426	0.512	0.601	0.692	0.784	0.879	0.974	1.071	1.168	1.267	1.365	1.465	
0.775	0.354	0.440	0.529	0.620	0.713	0.808	0.904	1.001	1.098	1.197	1.295	1.395	1.494	
0.8	0.368	0.457	0.549	0.642	0.737	0.834	0.931	1.029	1.128	1.227	1.326	1.425	1.525	
0.825	0.383	0.476	0.570	0.666	0.764	0.862	0.961	1.060	1.159	1.259	1.359	1.458	1.558	
0.85	0.401	0.497	0.595	0.693	0.793	0.893	0.993	1.093	1.193	1.293	1.393	1.493	1.592	
0.875	0.422	0.522	0.622	0.724	0.825	0.927	1.028	1.129	1.230	1.330	1.430	1.529	1.628	
0.9	0.446	0.550	0.655	0.759	0.862	0.965	1.067	1.169	1.270	1.370	1.470	1.569	1.667	
0.925	0.476	0.585	0.692	0.798	0.903	1.008	1.110	1.212	1.313	1.413	1.512	1.610	1.708	
0.95	0.514	0.627	0.737	0.845	0.951	1.056	1.159	1.260	1.361	1.460	1.558	1.655	1.751	
0.975	0.564	0.679	0.791	0.900	1.006	1.110	1.213	1.313	1.413	1.510	1.607	1.703	1.797	
1	0.632	0.747	0.858	0.966	1.071	1.173	1.274	1.373	1.470	1.566	1.661	1.754	1.847	

En la gráfica 5-4 se ha representado en el eje X la razón de conversión del proceso de separación de la FO, r_{FO} , y en el eje Y los valores de los límites termodinámicos de la FO.

Cada línea de color, morado, negro y verde, hace referencia a una concentración de disolución diluida, o aun incremento de presión inicial, y representa la evolución del límite termodinámico de la FO a medida que aumenta la razón de conversión del proceso. Se ha establecido con una línea naranja perpuntada el límite termodinámico para un proceso de desalación, en este caso para la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg], y se ha marcado en amarillo los valores viables energéticamente para cada concentración de la disolución diluida w_{DSd} .



Gráfica 5-4. ΔG para la disolución PSSP11 y una salinidad de mar de $S_{sw}=0.024$ [Kg/Kg].

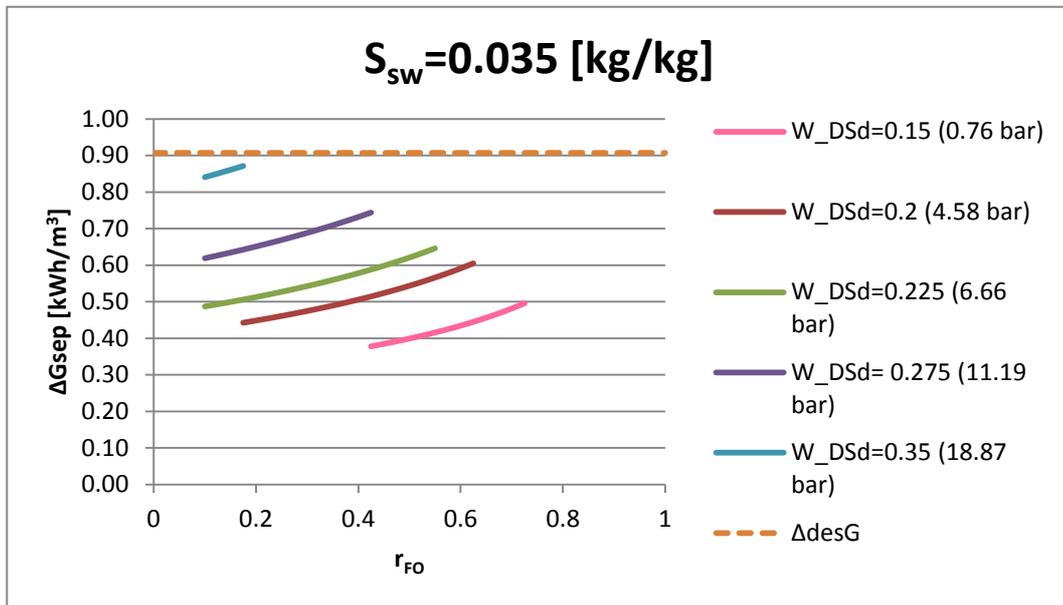
A continuación se muestra la tabla con la acotación de los límites termodinámicos de la FO para la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg], tomando como referencia su correspondiente límite termodinámico del proceso de desalación, $\Delta G = 0.907$ [kWh/m³].

Tabla 5-6. ΔG para la disolución PSSP11 y una salinidad de mar de $S_{sw} = 0.035$ [Kg/Kg].

		W_DSd												
		0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375	0.4
t	0.1	0.216	0.264	0.315	0.369	0.426	0.487	0.552	0.619	0.690	0.764	0.841	0.921	1.005
	0.125	0.219	0.267	0.318	0.373	0.432	0.493	0.558	0.627	0.698	0.773	0.851	0.932	1.016
	0.15	0.221	0.270	0.322	0.378	0.437	0.500	0.565	0.635	0.707	0.782	0.861	0.943	1.028
	0.175	0.223	0.273	0.326	0.383	0.443	0.506	0.573	0.643	0.716	0.792	0.872	0.954	1.039
	0.2	0.226	0.276	0.330	0.388	0.449	0.513	0.580	0.651	0.725	0.802	0.882	0.966	1.052
	0.225	0.229	0.280	0.335	0.393	0.455	0.520	0.588	0.660	0.735	0.813	0.894	0.977	1.064
	0.25	0.232	0.284	0.339	0.399	0.461	0.527	0.597	0.669	0.745	0.823	0.905	0.990	1.077
	0.275	0.235	0.287	0.344	0.404	0.468	0.535	0.605	0.679	0.755	0.835	0.917	1.002	1.091
	0.3	0.238	0.291	0.349	0.410	0.475	0.543	0.614	0.688	0.766	0.846	0.930	1.016	1.104
	0.325	0.241	0.296	0.354	0.416	0.482	0.551	0.623	0.699	0.777	0.858	0.942	1.029	1.119
	0.35	0.244	0.300	0.360	0.423	0.490	0.560	0.633	0.709	0.789	0.871	0.956	1.043	1.134
	0.375	0.248	0.305	0.365	0.430	0.498	0.569	0.643	0.720	0.801	0.884	0.970	1.058	1.149
	0.4	0.252	0.310	0.372	0.437	0.506	0.578	0.654	0.732	0.813	0.897	0.984	1.073	1.165
	0.425	0.256	0.315	0.378	0.445	0.515	0.588	0.665	0.744	0.826	0.911	0.999	1.089	1.181
	0.45	0.260	0.320	0.385	0.453	0.524	0.599	0.676	0.757	0.840	0.926	1.014	1.105	1.198
	0.475	0.264	0.326	0.392	0.461	0.534	0.609	0.688	0.770	0.854	0.941	1.030	1.122	1.216
	0.5	0.269	0.332	0.399	0.470	0.544	0.621	0.701	0.784	0.869	0.957	1.047	1.140	1.234
	0.525	0.274	0.339	0.407	0.479	0.555	0.633	0.715	0.799	0.885	0.974	1.065	1.158	1.253
	0.55	0.279	0.346	0.416	0.489	0.566	0.646	0.729	0.814	0.902	0.991	1.083	1.177	1.273
	0.575	0.285	0.353	0.425	0.500	0.578	0.660	0.744	0.830	0.919	1.010	1.102	1.197	1.293
	0.6	0.292	0.361	0.434	0.511	0.591	0.674	0.759	0.847	0.937	1.029	1.123	1.218	1.315
	0.625	0.298	0.370	0.445	0.523	0.605	0.689	0.776	0.865	0.956	1.049	1.144	1.240	1.337
	0.65	0.306	0.379	0.456	0.537	0.620	0.706	0.794	0.884	0.977	1.070	1.166	1.262	1.360
	0.675	0.314	0.389	0.468	0.551	0.636	0.723	0.813	0.905	0.998	1.093	1.189	1.286	1.385
	0.7	0.322	0.400	0.481	0.566	0.653	0.742	0.834	0.926	1.021	1.117	1.213	1.311	1.410
	0.725	0.332	0.412	0.496	0.582	0.671	0.763	0.855	0.950	1.045	1.142	1.239	1.338	1.437
	0.75	0.343	0.426	0.512	0.601	0.692	0.784	0.879	0.974	1.071	1.168	1.267	1.365	1.465
	0.775	0.354	0.440	0.529	0.620	0.713	0.808	0.904	1.001	1.098	1.197	1.295	1.395	1.494
0.8	0.368	0.457	0.549	0.642	0.737	0.834	0.931	1.029	1.128	1.227	1.326	1.425	1.525	
0.825	0.383	0.476	0.570	0.666	0.764	0.862	0.961	1.060	1.159	1.259	1.359	1.458	1.558	
0.85	0.401	0.497	0.595	0.693	0.793	0.893	0.993	1.093	1.193	1.293	1.393	1.493	1.592	
0.875	0.422	0.522	0.622	0.724	0.825	0.927	1.028	1.129	1.230	1.330	1.430	1.529	1.628	
0.9	0.446	0.550	0.655	0.759	0.862	0.965	1.067	1.169	1.270	1.370	1.470	1.569	1.667	
0.925	0.476	0.585	0.692	0.798	0.903	1.008	1.110	1.212	1.313	1.413	1.512	1.610	1.708	
0.95	0.514	0.627	0.737	0.845	0.951	1.056	1.159	1.260	1.361	1.460	1.558	1.655	1.751	
0.975	0.564	0.679	0.791	0.900	1.006	1.110	1.213	1.313	1.413	1.510	1.607	1.703	1.797	
1	0.632	0.747	0.858	0.966	1.071	1.173	1.274	1.373	1.470	1.566	1.661	1.754	1.847	

En la gráfica 5-5 se ha representado en el eje X la razón de conversión del proceso de separación de la FO, r_{FO} , y en el eje Y los valores de los límites termodinámicos de la FO.

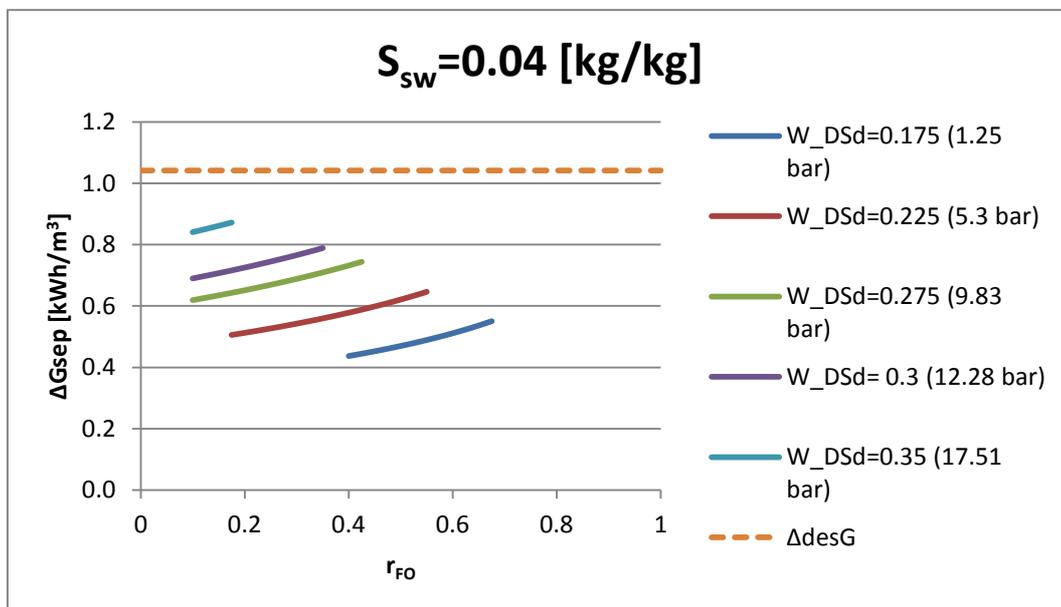
Cada línea de color, azul, morado, verde, rojo y rosa, hace referencia a una concentración de disolución diluida, o aun incremento de presión inicial, y representa la evolución del límite termodinámico de la FO a medida que aumenta la razón de conversión del proceso. Se ha establecido con una línea naranja perpuntada el límite termodinámico para un proceso de desalación, en este caso para la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg], y se ha marcado en amarillo os valores viables energéticamente para cada concentración de la disolución diluida w_{DSd} .



Gráfica 5-5. ΔG para la disolución PSSP11 y una salinidad de mar de $S_{sw} = 0.035$ [Kg/Kg].

Como se puede observar en la Gráfica 5-5 y Tabla 5-6, para la disolución PSSP11 y la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg] se encuentran resultados cuyos valores están por debajo del límite termodinámico del proceso de desalación pero dicha solución no consigue dar incrementos de presiones de modo que se cumpla el criterio de espontaneidad. Por lo tanto descartaríamos esta disolución para esta salinidad.

Por las razones anteriores expuestas para la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg], la sustancia también queda descartada para la salinidad de $S_{sw} = 0.040$ [kg/kg].



Gráfica 5-6. ΔG para la disolución PSSP11 y una salinidad de mar de $S_{sw} = 0.040$ [Kg/Kg].

5.2.3 Acotación. Conclusiones

Analizando los datos anteriores, a modo de conclusión, atendiendo al criterio del límite termodinámico, encontramos que la sustancia PSSP11 tiene límites termodinámicos mas bajos que la disolución SSP, es decir consumiría teóricamente menos energía en la etapa 2 del proceso de FO. Estos bajos límites son consecuencia de las bajas presiones osmóticas conseguidas conseguidas por esta sustancia, ya que la dependencia era directa como se muestra en la siguiente ecuación ya escrita en el apartado 3.3.2:

$$\frac{\Delta_{sep} G(T^E, p^E, w)}{V^{A*}} = \frac{1}{1 - \frac{w_{DSd} (1 - w_{DSc})}{w_{DSc} (1 - w_{DSd})}} \frac{w_{DSd}}{(1 - w_{DSd})} \int_{w_{DSd}}^{w_{DSc}} \pi(T^E, p^E, w) \frac{dw}{w^2}$$

Esto quiere decir que para la misma concentración, la disolución PSSP11 consigue establecer una presión osmótica menor que la SSP. Y es consecuencia de ello que la PSSP11 sólo sea válida para salinidades bajas como $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg], no cumpliendo que la presión de la Salmuera sea menor que la de la disolución concentrada para concentraciones de agua de mar mayores.

5.3 Consumo reales. FO

El artículo² sobre el que se basa el trabajo presente, habla de una temperatura crítica de la disolución (*LCST*, *lower critical solution temperature*), temperatura mínima a partir de la cual el soluto deja de ser miscible con el agua. Es decir que si se aporta calor hasta que la disolución alcance dicha temperatura, soluto y disolvente quedan separados debido a la diferencia de densidad entre ambos, posibilitando de manera sencilla la extracción del polímero en forma líquida utilizado como soluto. A continuación se muestra una gráfica donde se representa la *LCST* para cada disolución y las concentraciones en peso de 10 y 20 (wt%). En el eje X se representa la temperatura expresada en grados y en el eje Y el número de unidades de repetición del polímero que hace referencia a las disoluciones SSP, PSSP5, PSSP6 y PSSP11, en el orden indicado.

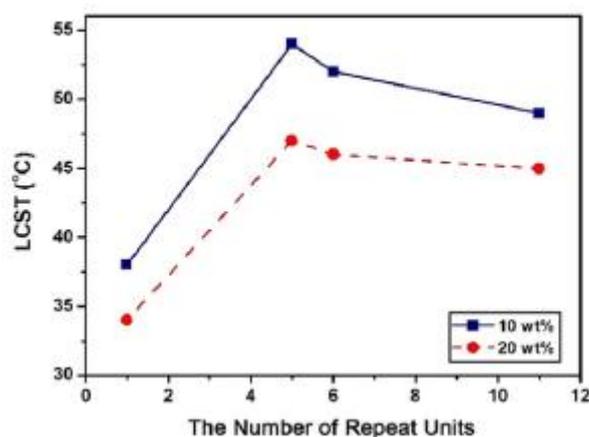


Figura 5-2. Temperatura crítica de disolución medida a las concentraciones 10 y 20 (wt%) para las disoluciones SSP, PSSP5, PSSP6 y PSSP11.[26]

Como no se dispone de todas las temperaturas críticas de disolución para todas las concentraciones, se ha optado por coger 40 [°C] para la disolución SSP y 50 [°C] para PSSP11 para los cálculos de los consumos reales del proceso de separación. Estas temperaturas van a permanecer fijas para cada disolución independientemente de la concentración, con el objeto de asegurarnos que al ser calentadas van alcanzar el punto en el que soluto y disolvente dejan de ser miscibles.

² El artículo sobre el cual se basa este trabajo se encuentra referenciado con el número 26.

Como sabemos la temperatura a la que debemos calentar la disolución, podemos calcular la energía necesaria para alcanzar el punto en el que disolvente y soluto dejan de ser miscibles, mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{Q^{S \rightleftharpoons RQ}}{m_{DSd}} = Cp_{DS} \Delta T \quad (5-5)$$

En la ecuación 5-5, la capacidad calorífica de la disolución se ha estimado y se ha cogido el valor correspondiente que tiene el agua a la temperatura de 298 K, $Cp_{agua}(T = 298 K) = 4.1813 \left[\frac{kJ}{kg K} \right]$. Por otro lado la diferencia de temperatura será igual a la diferencia entre la temperatura del reservorio de calor, diferente para ambas disoluciones, y la temperatura ambiente, $T^E = 298 [^{\circ}C]$.

Ahora de lo que se trata es de calcular la energía que necesitamos aportar para la obtención de 1[kg] de masa de agua dulce, ya que durante todo el análisis se han obtenido todos los resultados por kilogramo o metro cúbico de agua extraída, y es el dato verdaderamente importante para cualquier proceso de desalación.

Para ello vamos a realizar la siguiente aproximación:

$$\frac{Q^{S \rightleftharpoons RQ}}{m_{DSd}} \frac{m_{DSd}}{m_{A^*}} \approx \frac{1}{r_{FO}} Cp_{DS} \Delta T \quad (5-6)$$

La aproximación se debe a que se ha considerado que $m_{DSd} \approx m_A^{DSd}$. De este modo sabiendo la razón de conversión del proceso podemos dar una estimación preliminar del consumo real que tendría esta tecnología.

5.3.1 Estimación preliminar de consumos reales. SSP

En este apartado se ha particularizado la ecuación 5-6 para la disolución SSP. Los datos necesarios para dicho cálculo han sido.

- Temperatura de la disolución. $T_{DS} = 313[K]$
- Temperatura ambiente. $T^E = 298 [K]$
- Calor específico. $Cp (T = 298 K) = 4.1813 [kJ/kg K]$

El otro dato que faltaría sería la razón de conversión r_{FO} . Se han utilizado para la estimación del consumo aquellas r_{FO} asociadas a unas concentraciones de la disolución que hacen posible el proceso de FO para diferentes salinidades de agua de mar. De modo que a continuación se muestran tres tablas correspondientes a las tres salinidades de agua de mar en las que aparecen los valores de las particularizaciones de la ecuación (5-6).

Tabla 5-2. Estimación de los consumos reales del proceso de separación de FO para la disolución SSP y $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg].

	$w_{Dsd} = 0.15$						$w_{Dsd} = 0.175$	
r_{FO}	0.475	0.5	0.525	0.55	0.575	0.6	0.35	0.375
$Q^{S\rightleftharpoons RQ}/m_{A^*}$ [kJ/kg]	132.04	125.44	119.47	114.04	109.08	104.53	179.20	167.25
$Q^{S\rightleftharpoons RQ}/m_{A^*}$ [kWh/m ³]	36.68	34.84	33.18	31.68	30.30	29.04	49.78	46.46

Tabla 5-3. Estimación de los consumos reales del proceso de separación de FO para la disolución SSP y $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg].

	$w_{Dsd} = 0.2$				$w_{Dsd} = 0.225$				
r_{FO}	0.525	0.55	0.575	0.6	0.45	0.475	0.5	0.525	0.55
$Q^{S\rightleftharpoons RQ}/m_{A^*}$ [kJ/kg]	119.47	114.04	109.08	104.53	139.38	132.04	125.44	119.47	114.04
$Q^{S\rightleftharpoons RQ}/m_{A^*}$ [kWh/m ³]	33.18	31.67	30.29	29.03	38.70	36.67	34.83	33.18	31.67

	$w_{Dsd} = 0.25$		
r_{FO}	0.375	0.4	0.425
$Q^{S\rightleftharpoons RQ}/m_{A^*}$ [kJ/kg]	167.25	156.80	147.58
$Q^{S\rightleftharpoons RQ}/m_{A^*}$ [kWh/m ³]	46.45	43.54	40.98

Tabla 5-4. Estimación de los consumos reales del proceso de separación de FO para la disolución SSP y $S_{sw} = 0.04$ [kg/kg].

	$w_{Dsd} = 0.225$		$w_{Dsd} = 0.25$			$w_{Dsd} = 0.275$		$w_{Dsd} = 0.275$	
r_{FO}	0.525	0.55	0.45	0.475	0.5	0.4	0.425	0.325	0.35
$Q^{S\rightleftharpoons RQ}/m_{A^*}$ [kJ/kg]	119.47	114.04	139.38	132.04	125.44	156.80	147.58	192.98	179.20
$Q^{S\rightleftharpoons RQ}/m_{A^*}$ [kWh/m ³]	33.18	31.67	38.70	36.67	34.83	43.54	40.98	53.59	49.76

Des este modo tenemos calculado las estimaciones de los consumos reales de la FO para la disolución SSP y las tres salinidades estudiadas.

5.3.2 Rendimientos exergéticos de las estimaciones de los consumos reales. SSP

Con el objeto de tener caracterizado termodinámicamente por completo el proceso de separación de la FO para la disolución SSP, se va calcular el rendimiento exergético, η_x , de cada consumo, mediante la ecuación 5-7. Como se observa en dicha ecuación aparece la temperatura del reservorio de calor, la cual se ha considerado diez grados mayor que la que debe alcanzar la mezcla, $T^{RQ} = 323$ [K]

$$\eta_x = \frac{\Delta G_{FO}}{Q^{S \rightarrow RQ} \left(1 - \frac{T^E}{T^{RQ}}\right)} \quad (5-7)$$

A continuación se muestran tres tablas en las que han sido calculados los rendimientos exergéticos asociados a cada incremento de la función de Gibbs, cuyos valores fueron seleccionados para cada salinidad de agua de mar en el apartado 5.2.1.

Tabla 5-5. Rendimientos exergéticos de las estimaciones de los consumos reales para la disolución SSP y $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg].

	$w_{Dsd} = 0.15$						$w_{Dsd} = 0.175$	
r_{FO}	0.475	0.5	0.525	0.55	0.575	0.6	0.35	0.375
$Q^{S \rightarrow RQ}/m_{A^*}$ [kWh/m ³]	36.68	34.84	33.18	31.68	30.30	29.04	49.78	46.46
ΔG [kWh/m ³]	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	0.61	0.62
Rendimiento exergético η_x	0.20	0.21	0.23	0.24	0.26	0.27	0.16	0.17

Tabla 5-6. Rendimientos exergéticos de las estimaciones de los consumos reales para la disolución SSP y $S_{sw} = 0.035$ [kg/kg].

	$w_{Dsd} = 0.2$				$w_{Dsd} = 0.225$				
r_{FO}	0.525	0.55	0.575	0.6	0.45	0.475	0.5	0.525	0.55
$Q^{S \rightarrow RQ}/m_{A^*}$ [kWh/m ³]	33.18	31.67	30.29	29.03	38.70	36.67	34.83	33.18	31.67
ΔG [kWh/m ³]	0.777	0.79	0.803	0.818	0.833	0.832	0.845	0.857	0.87
Rendimiento exergético η_x	0.3026	0.32231	0.34251	0.36407	0.27806	0.29316	0.31341	0.33375	0.35495

Tabla 5-7. Rendimientos exergéticos de las estimaciones de los consumos reales para la disolución SSP y $S_{sw} = 0.040$ [kg/kg].

	$w_{Dsd} = 0.225$		$w_{Dsd} = 0.25$			$w_{Dsd} = 0.275$		$w_{Dsd} = 0.275$	
r_{FO}	0.525	0.55	0.45	0.475	0.5	0.4	0.425	0.325	0.35
$Q^{S \rightarrow RQ}/m_{A^*}$ [kWh/m ³]	33.18	31.67	38.70	36.67	34.83	43.54	40.98	53.59	49.76
ΔG [kWh/m ₃]	0.87	0.88	0.92	0.93	0.95	0.98	1.00	1.03	1.04
Rendimiento exergético η_x	0.34	0.36	0.31	0.33	0.35	0.29	0.31	0.25	0.27

5.3.3 Consumos reales. PSSP11

Al igual que para la otra disolución, se ha particularizado la ecuación 5-5 para la disolución PSSP11, bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura de la disolución. $T_{DS} = 323[\text{K}]$
- Temperatura ambiente. $T^E = 298 [\text{K}]$
- Calor específico. $C_p (T = 298 \text{ K}) = 4.1813 [\text{kJ/kg K}]$

La siguiente tabla muestra el resultado del consumo real del proceso de separación de FO para la disolución SSP y las condiciones anteriores:

Tabla 5-8. Estimación de los consumos reales del proceso de separación de FO para la disolución PSSP11.

	$w_{DSd} = 0.2$							$w_{DSd} = 0.225$			
r_{FO}	0.475	0.5	0.525	0.55	0.575	0.6	0.625	0.4	0.425	0.45	0.475
$Q^{S \rightarrow RQ} / m_{A^*} [\text{kJ/kg}]$	220.07	209.07	199.11	190.06	181.80	174.22	167.25	261.33	245.96	232.29	220.07
$Q^{S \rightarrow RQ} / m_{A^*} [\text{kWh/m}^3]$	61.11	58.06	55.29	52.78	50.48	48.38	46.45	72.57	68.30	64.51	61.11

5.3.4 Rendimientos exergéticos de los consumos reales. PSSP11

Del mismo modo que en el apartado anterior, pero particularizado para la disolución PPSP se procede al cálculo del rendimiento exergético, η_x , de cada estimación del consumo real, con la diferencia que en este caso solo se trata la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.024 [\text{kg/kg}]$, ya que es la única que permite el desarrollo de la FO.

Para la realización de los cálculos en este caso se ha tomado una temperatura del reservorio de calor superior a la anterior, por el hecho de que se debe calentar la disolución a más temperatura. Para que la mezcla llegue a los $50[^\circ\text{C}]$ que se han impuesto, la temperatura del reservorio de calor elegida ha sido $T^{RQ} = 60[^\circ\text{C}]$. A continuación se muestran tres tablas en las que han sido calculados los rendimientos exergéticos asociados a cada incremento de la función de Gibbs, cuyos valores fueron seleccionados para cada salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.024 [\text{kg/kg}]$ en el apartado 5.2.2.

Tabla 5-9. Rendimientos exergéticos de las estimaciones de los consumos reales para la disolución PSSP11 y $S_{sw} = 0.024$ [kg/kg].

	$w_{Dsd} = 0.2$							$w_{Dsd} = 0.225$			
r_{FO}	0.475	0.5	0.525	0.55	0.575	0.6	0.625	0.4	0.425	0.45	0.475
$Q^{S \rightarrow RQ}/m_{A^*}$ [kWh/m ³]	61.11	58.06	55.29	52.78	50.48	8.38	46.45	72.57	68.30	64.51	61.11
ΔG [kWh/m ³]	0.53	0.54	0.56	0.57	0.58	0.59	0.61	0.58	0.59	0.60	0.61
Rendimiento exergético η_x	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.08	0.08	0.09	0.09

	$w_{Dsd} = 0.225$			
r_{FO}	0.4	0.425	0.45	0.475
$Q^{S \rightarrow RQ}/m_{A^*}$ [kWh/m ³]	72.57	68.30	64.51	61.11
ΔG [kWh/m ³]	0.58	0.59	0.60	0.61
Rendimiento exergético η_x	0.08	0.08	0.09	0.09

5.4 Destilación convencional

En los apartados anteriores se han analizado las disoluciones SSP y PSSP11, escogiendo para cada salinidad de agua de mar los valores de los límites termodinámicos que estaban por debajo de los de un proceso de salación. Por otro lado se ha calculado el consumo real del proceso de FO atendiendo a la propuesta del artículo sobre el que se basa el estudio, y finalmente se han calculados los rendimientos exergéticos asociados a cada separación en particular. Ahora de lo que se trata es de comparar estos valores con una referencia que nos permita concluir la calidad de los mismos. Para ellos se han elegido tres procesos de destilación convencional, dónde la principal diferencia radica en las temperaturas del reservorio de calor utilizadas:

- Destilación convencional, $T^{RQ} = 70^{\circ}\text{C}$
- Destilación convencional, $T^{RQ} = 180^{\circ}\text{C}$
- Destilación convencional, $T^{RQ} = 225^{\circ}\text{C}$

En la siguiente se muestran los consumos reales de estas tecnologías:

Tabla 5-7. Consumos reales de los procesos de destilación convencional para las temperaturas del reservorio de calor a $T^{RQ} = 70^{\circ}\text{C}$, $T^{RQ} = 180^{\circ}\text{C}$ y $T^{RQ} = 225^{\circ}\text{C}$.

Destilación convencional			
	$T^{RQ} = 70^{\circ}\text{C}$	$T^{RQ} = 180^{\circ}\text{C}$	$T^{RQ} = 225^{\circ}\text{C}$
$Q^{S \leftrightarrow RQ} / m_{A^*}$ [kJ/kg]	230	116.50	166.43
$Q^{S \leftrightarrow RQ} / m_{A^*}$ [kWh/m ³]	63.89	32.36	46.23
Rendimiento exergético η_x	0.074	0.082	0.056

5.5 Comparación de las estimaciones de los consumos reales de la FO y destilación convencional.

Tras analizar los resultados mostrados en las gráficas podemos establecer diferencias atendiendo a los siguientes parámetros:

-Rendimiento exergético. La tecnología que mayor rendimiento exergético alcanza es la FO para la disolución SSP, seguida de la disolución PSSP11 y en la última posición los procesos de destilación. La tecnología FO con la disolución SSP puede llevar alcanzar un rendimiento exergético $\eta_x = 0.36$ ($w_{Dsd} = 0.2$; $S_{sw} = 0.035$ kg/kg), mientras que la disolución PSSP11, bajo las mismas condiciones, alcanza el valor de $\eta_x = 0.12$, y por último están los procesos de destilación que ni siquiera alcanzan un rendimiento exergético de 0.1.

-Consumo “real”. La primera diferencia que podemos establecer es entre las disoluciones SSP y PSSP11. Las estimaciones de los consumos reales son superiores para la disolución PSSP11 ya que es necesario elevar más la temperatura en el proceso de recuperación del disolvente. No se podemos establecer una comparación más directa ya que las condiciones en cuanto a concentración y razón de conversión son diferentes entre ambas disoluciones. En cuanto a la tecnología de destilación encontramos valores similares a los obtenidos en el proceso de FO. Los consumos reales de estos procesos son $Q^{S=RQ}/m_A \text{ [kWh/m}^3\text{]} = 63.89$ ($T^{RQ} = 70$ °C); 32.36 ($T^{RQ} = 180$ °C) y 46.23 ($T^{RQ} = 225$ °C). Si los comparamos frente a los conseguidos en la FO por la disolución SSP para la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.035$ kg/kg podemos decir que los consumos en su mayoría más bajos, incluso se baja de los 30 [kWh/m³] y con la ventaja de que sólo necesita alcanzarse una temperatura de 50 °C, frente a los 180 °C de la destilación para conseguir un consumo similar, aunque ligeramente superior.

5.6 Conclusiones

Tras el análisis realizado de la viabilidad de las disoluciones SSP y PSSP11, podemos concluir con que la disolución PSSP11 quedaría descartada como candidata a *draw solution*, debido al reducido rango de valores de la concentración que hacen posible el fenómeno de espontaneidad, siendo válida sólo para la salinidad de agua de mar $S_{sw} = 0.024$ kg/kg, Reforzando esta idea, se puede añadir además que consigue menos incrementos de presiones osmóticas que la disolución SSP y peores rendimientos exergéticos.

En cuanto al proceso en sí, tras la comparación con los procesos de destilación convencional, hemos comprobado que es posible conseguir los mismos objetivos a costa de mejores rendimientos exergéticos y menores consumos. Por tanto se considera tecnología prometedora con bastante potencial para la desalación de aguas, incluso para la producción de energía usando el gradiente osmótico a través de la membrana semipermeable como fuerza motriz en la generación de agua y energía, y poder así ayudar a combatir los problemas mencionados en la introducción de escasez de agua presentes en nuestro planeta.

Es una tecnología que está en sus inicios, madura lo que menos, y tiene un largo camino que recorrer para mejorar los resultados obtenidos en este trabajo. Creo que las mejoras vendrán de la mano con el desarrollo de nuevas sustancias y membranas semipermeables, así como del propio proceso en sí. Del mismo modo que la ósmosis inversa ha superado a los sistemas de evaporación multiefecto como tecnología dominante en el sector de la desalinización, espero y creo que la FO, aunque ahora se encuentre en la cola de este tipo de tecnologías, gracias a la evolución de las membranas y diseño del proceso, dando lugar a mejoras en los rendimientos y en la eficiencia energética del proceso, consiga ir escalando puestos. El tiempo y el dinero darán a esta tecnología el reconocimiento que aún no tiene.

REFERENCIAS

- [1] Hispagua, Sistema Español de Información sobre el Agua [sede Web]. Hispagua.cedex.es; Julio 2002; [acceso 15 de marzo 2016]. Disponible: <http://www.hispagua.cedex.es>
- [2] Green Facts, Hechos sobre la salud y el medioambiente [sede web]. Greenfacts.org. Febrero 2012; [acceso 16 de marzo 2016]. Disponible: <http://www.greenfacts.org/es/recursos-hidricos/recursos-hidricos-foldout.pdf>
- [3] Santosh Mehrotra, Jan Vandermoortele y Enrike Delamonica, *Basic Services for all?* (Florenca: UNICEF, Centro de Investigaciones Innocenti, 2000). Disponible: <https://www.unicef-irc.org/publications/pdf/basics.pdf>
- [4] FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Fao.org; Marzo 2013; [acceso 16 de marzo 2016]. Disponible: <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>
- [5] 2030 Water Resources Group. 2009. Charting our water future. Economic framework to inform decision-making. Mc Kinsey & Company. 185 p.
- [6] AEDyR, Asociación Española de Desalación y Reutilización [sede web]. Aedyr.com; 2012 [acceso 16 de marzo 2016]. Disponible: <http://www.aedyr.com/ficha.php?id=1775>
- [7] Circe, Universidad de Zaragoza. (Enero 2001). Ilustración del diagrama de la compresión de vapor (CV) con evaporador de tubos verticales (VTE). [Figura]. Recuperado de <http://circe.cps.unizar.es/spanish/isgwes/spain/desala.pdf>
- [8] USGS, U.S Geological Survey. (2003). Ilustración de la distribución global del agua. [Figura]. Recuperado de <http://water.usgs.gov/edu/watercycles.html>
- [9] Mailxmail, cursos para compartir lo que sabes [sede web]. Mailxmail.com; 2005 [acceso 20 de marzo 2016]. Disponible: <http://www.mailxmail.com/curso-agua-desalacion-1-4/destilacion-8220-multiple-efecto-8221-med>
- [10] Siden Veolia, [sede web]. Sidem-desalination.com 2008 [acceso 20 de marzo 2016]. Disponible: <http://www.sidem-desalination.com/Process/MSF/>
- [11] Ecoagua, Soluciones globales para la desalación y reutilización de aguas [sede web] .Ecoagua.com; 2010 [acceso 20 de marzo 2016]. Disponible: http://www.ecoagua.com/files/technical-articles/art_tec_msf1.pdf
- [12] UNEP, United Nations Environment Programme [sede web]. Unep.or.jp; 2003 [acceso 20 23 de marzo]. Disponible: <http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/TechPublications/TechPub-8f/B/Desalination1-1.asp>
- [13] UNEP, United Nations Environment Programme. (2002). Ilustración del diagrama de destilación súbita multietapa. [Figura]. Recuperado de <http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/TechPublications/TechPub-8f/B/Desalination1-1.asp>
- [14] UNEP, United Nations Environment Programme. (2002). Ilustración del diagrama de destilación por múltiple efecto. [Figura]. Recuperado de <http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/TechPublications/TechPub-8f/B/Desalination1-1.asp>
- [15] Circe, Universidad de Zaragoza. (Enero 2001). Ilustración del esquema del proceso de destilación [Figura]. Recuperado de <http://circe.cps.unizar.es/spanish/isgwes/spain/desala.pdf>
- [16] Hari J. Krishna, Introduction to Desalination Technologies; 2006 [acceso 27 de marzo 2016]. Disponible: http://www.twdb.texas.gov/publications/reports/numbered_reports/doc/r363/c1.pdf
- [17] Ecoagua, Soluciones globales para la desalación y reutilización de aguas [sede web] .Ecoagua.com; 2010 [acceso 27 de marzo 2016]. Disponible: http://www.ecoagua.com/files/technical-articles/art_tec_ed6.pdf

- [18] Ecoagua, Soluciones globales para la desalación y reutilización de aguas (2010). Ilustración del diagrama de flujo del proceso de Electrodialisis [Figura]. Recuperado de http://www.ecoagua.com/files/technical-articles/art_tec_ed6.pdf
- [19] Jihye Kim, Kwanho Jeong, Myoung Jun Park, Ho Kyong Shon, Joon Ha Kim. Recent Advances in Osmotic Energy Generation via Pressure-Retarded Osmosis (PRO): A Review. "Energies 2015". Published: 20 October 2015. Disponible: <http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjSL-a7JLMAhVIIRoKHcI8D8sQFggkMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F1996-1073%2F8%2F10%2F11821%2Fpdf&usg=AFQjCNGDUNuOlmGOLrBMMbYEOApvXAHwbA&sig2=0YO7sdjooHzPn3tXj8URA>
- [21] Prof. Werner Antweiler, Ph.D, *Seawater desalination: technology to quench the world's growing thirst for water*. Posted on Tuesday, September 1, 2015 at 17:30. Disponible: <http://wernerantweiler.ca/blog.php?item=2015-09-01>
- [22] Prof. Werner Antweiler, Ph.D, *Seawater desalination: technology to quench the world's growing thirst for water* (2010). Ilustración del esquema de los distintos tipos de ósmosis [Figura]. Recuperado de <http://wernerantweiler.ca/blog.php?item=2015-09-01>
- [23] [Menachem Elimelech](#), *Yale constructs forward osmosis desalination pilot plant*. [Membrane Technology](#); Volume 2007, Issue 1, January 2007, Pages 7–8. Disponible: http://www.yale.edu/env/elimelech/News_Page/membrane_technology_jan2007.pdf
- [24] [Menachem Elimelech](#), *Yale constructs forward osmosis desalination pilot plant*. [Membrane Technology](#); Volume 2007, Issue 1, January 2007, Pages 7–8 (Enero 2015). Ilustración del esquema del proceso de FO [Figura]. Recuperado de http://www.yale.edu/env/elimelech/News_Page/membrane_technology_jan2007.pdf
- [25] Gómez Camacho C, Termodinámica: 2º Curso de Grados en Ingeniería; 2013.
- [26] Jin-joo Kim, Hyo Kang, Yong-Seok Choi, Yun Ah. Yu, Jong-Chan Lee. Thermo-responsive oligomeric poly(tetrabutylphosphonium styrenesulfonate)s as draw solutes for forward osmosis (FO) applications. *Desalination*, Volume 381, 1 March 2016, Pages 84-94. Disponible: <http://0-www.sciencedirect.com.fama.us.es/science/article/pii/S0011916415301156>
- [27] Mostafa H. Sharqawy, John H. Lienhard Va, Syed M. Zubair. Thermophysical properties of seawater : a review os exiting correlations an data .Disponible: http://web.mit.edu/lienhard/www/Thermophysical_properties_of_seawater-DWT-16-354-2010.pdf

