

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Evaluación de electrolitos y sus mezclas en
procesos ósmosis directa**

**(Assessment of electrolytes and their
mixtures in forward osmosis processes)**

Para acceder al Título de

Graduado/a en Ingeniería Química

Autor: Losada Velón, Fernando

Índice

1. PLANTEAMIENTO	6
1.1. Operaciones de separación en el contexto de la Ingeniería Química	6
1.2. Tecnologías de membrana	7
1.3. Tecnología de ósmosis directa	10
1.3.1. Fundamentos	10
1.3.2. Disoluciones osmóticas	11
1.3.3. Membranas	13
1.3.4. Ensuciamiento de las membranas	15
1.3.5. Aplicaciones	16
1.4. Antecedentes y objetivos	22
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	24
2.1. Método experimental	24
2.1.1. Material empleado	24
2.1.2. Sistema experimental	25
2.1.3. Metodología experimental	29
2.1.4. Diseño experimental	31
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
3.1. Estudio de la influencia de la concentración de la draw solution	32
3.2. Estudio de la influencia de la composición de la draw solution	41
3.3. Estudio de la influencia de mezclas de sales de la draw solution	44
4. CONCLUSIONES	47
5. REFERENCIAS	50

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Características y efectos de las draw solution.....	12
Tabla 2.1. Datos técnicos de la balanza analítica.....	28
Tabla 2.2. Condiciones experimentales.....	31
Tabla 3.1. Relación J_s/J_w para los experimentos realizados con draw solution NaCl.....	37
Tabla 3.2. Relación J_s/J_w para los experimentos realizados con draw solution $MgSO_4$	40

Índice de Figuras

Figura 1.1. Rango de tamaños para cada proceso con membranas.	8
Figura 1.2. Dirección y magnitud del flujo de agua como una función de la presión aplicada en OD, PRO y Ol.....	9
Figura 1.3. Esquema de la presión osmótica.....	10
Figura 1.4. Esquema de una membrana de ósmosis directa.	11
Figura 1.5. Corte Transversal de una membrana de triacetato de celulosa de OD.	13
Figura 1.6. Imágenes de (a) Capa activa de una membrana OD y (b) Capa soporte de una membrana de OD.	14
Figura 1.7. Diagrama de flujo de un proceso de tratamiento de lixiviados mediante FO	17
Figura 1.8. Diagrama de flujo original DOC de la NASA.....	18
Figura 1.9. Esquema del proceso de osmosis directa Amoniaco-Dióxido de carbono. .	18
Figura 1.10. Esquema de las secciones que componen el sistema DUROS®.	20
Figura 1.11. Proceso simplificado de una planta energética de PRO.....	21
Figura 2.1. HTI OsMem CTA-ES. (a) imagen SEM de un corte transversal de la membrana. (b) Imagen SEM de la cara de atrás (soporte) de la membrana. (c) Imagen SEM de la superficie activa.....	24
Figura 2.2. Malla espaciadora de polipropileno.....	25
Figura 2.3. Sistema experimental de Osmosis directa empleado en la realización del TFG.	25
Figura 2.4. Módulo de OD de la casa comercial STERLITECH modelo CF042P abierto (inferior) y el módulo de OD cerrado (superior)	26
Figura 2.5. Bomba Watson marlow 323 (Draw solution) y bomba Watson marlow 520S (alimentación) empleadas en el TFG.	27

Figura 2.6. Conductímetro sensION 5 de la casa comercial HACH empleado en el TFG.	28
Figura 3.1. Evolución de la concentración adimensional de NaCl con el tiempo en la draw solution para experimentos con concentración inicial de NaCl 0,5, 1,0 y 2,0 M en la DS.	34
Figura 3.2. Flujo de agua con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial de NaCl 0,5, 1,0 y 2,0 M en la DS.	35
Figura 3.3 Retroflujo con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial de NaCl 0,5, 1,0 y 2,0 M en la DS.	36
Figura 3.4. Evolución de la concentración adimensional de MgSO ₄ con el tiempo en la draw solution para experimentos con concentración inicial de MgSO ₄ 1,0 y 2,0 M en la DS.	38
Figura 3.5 Flujo de agua con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial de MgSO ₄ 1,0 y 2,0 M en la DS.	38
Figura 3.6. Retroflujo de sales con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial de MgSO ₄ 1,0 y 2,0 M en la DS.	40
Figura 3.7. Evolución de la concentración adimensional con el tiempo en la draw solution para experimentos con concentración inicial de NaCl 0,5, 1,0 y 2,0 M y de MgSO ₄ 1,0 y 2,0 M en la DS.	41
Figura 3.8. Flujo de agua con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial de NaCl 0,5, 1,0 y 2,0 M y de MgSO ₄ 1,0 y 2,0 M en la DS.	42
Figura 3.9. Retroflujo de sales con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial NaCl 0,5, 1,0 y 2,0 M y de MgSO ₄ 1,0 y 2,0 M en la DS.	43
Figura 3.10. Evolución de la concentración adimensional con el tiempo en la draw solution para experimentos con concentración inicial de Mezcla de NaCl con MgSO ₄ 1,0 M.	44
Figura 3.11. Flujo de agua con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial de Mezcla de NaCl con MgSO ₄ 1,0 M.	45
Figura 3.12. Conductividad de la fase de alimentación con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial de NaCl 0,5 M, 1 M y 2 M, de MgSO ₄ 1,0 M y 2 M y con concentración inicial de Mezcla de NaCl con MgSO ₄ 1,0 M.	46

1. PLANTEAMIENTO

1.1. Operaciones de separación en el contexto de la Ingeniería Química

En general, en cualquier proceso químico industrial han de producirse tres conjuntos sucesivos de etapas cuyos objetivos son la preparación de los reaccionantes, la reacción química y la separación de los productos obtenidos, si bien alguno de los mismos puede resultar innecesario en procesos concretos. Cuando se aborda el estudio de dichos procesos industriales se siguen básicamente dos enfoques alternativos: el más clásico se centra en la descripción de los procedimientos seguidos y en los equipos empleados en cada industria, recorriendo las diversas operaciones que comprende (enfoque típico de la Química Industrial) , mientras que el otro consiste en el estudio sistematizado de cada una de las operaciones que son comunes a diversos procesos industriales clasificadas de acuerdo con su función específica (Operación básica). [1]

Una operación básica, también conocida como operación unitaria es cada una de las etapas individuales con una función específica diferenciada que, coordinadas, permiten llevar a cabo un proceso químico-industrial. De entre todas las operaciones básicas destacan por su importancia el conjunto de aquellas conocidas como operaciones de separación por transferencia de materia, cuya actuación se produce sobre una corriente-alimento formada por una mezcla de compuestos en fase única, con el objetivo de separar dos o más corrientes-producto de diferente composición. Estas corrientes-producto pueden representar grandes inconvenientes en la industria en lo que respecta a la calidad del producto obtenido y a la generación de residuos que se produzcan durante el proceso. Estos inconvenientes se han abordado siempre mediante el uso de operaciones básicas de separación como la destilación, la extracción o la absorción, siendo de importante aplicación en la industria farmacéutica y en la industria alimentaria. [1]

Las operaciones básicas de separación han evolucionado con el fin de mejorar la calidad de los productos obtenidos, de minimizar los impactos de los subproductos de dichos procesos, así como también de reducir los costes de los equipos y de su operación. Dicha evolución es posible gracias al desarrollo de técnicas avanzadas de separación. En este sentido, los procesos de separación a través de membranas semipermeables o mediante

aplicación de campos eléctricos o campos magnéticos presentan unas expectativas crecientes de uso industrial. [1]

Dentro de estas técnicas avanzadas de separación se sitúan los procesos de separación con membranas, los cuales constituyen un grupo de operaciones básicas relativamente nuevas si se compara con las operaciones anteriormente citadas, pero que presentan una importancia creciente en cuanto a sus aplicaciones industriales.

1.2. Tecnologías de membrana

Una membrana es una barrera física que separa dos fluidos y que permite controlar la permeación de especies químicas que la atraviesan. Las membranas han ganado un lugar importante en la tecnología química y se usan en una amplia gama de aplicaciones. La propiedad clave es la habilidad de la membrana de controlar la velocidad de permeación de las especies químicas. [2]

A la hora de atravesar las membranas, los fluidos requieren energía que se consigue mediante una fuerza impulsora. Los procesos de separación con membranas se pueden agrupar en función de su fuerza impulsora de la siguiente forma:

- Presión hidrostática: Microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF), ósmosis inversa (OI), separación de gases (GS) y pervaporación (PV).
- Gradiente de concentración o de potencial químico: diálisis (D), pervaporación (PV) y la ósmosis directa (OD).
- Potencial eléctrico: electrodialisis (ED).
- Gradiente de temperatura: destilación con membranas (MD).

Dentro de los procesos de separación con membranas impulsados por el gradiente de presión, se distinguen las tecnologías de microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis, cuyas diferencias radican en la presión hidráulica que se aplica y en el tamaño de poro de las membranas utilizadas. Estas diferencias entre el tamaño de poro de los distintos procesos se esquematizan en la Figura 1.1. En dicha figura podemos observar el tamaño relativo de los diferentes solutos eliminados por cada tipo de membrana y, por tanto, el rango de tamaños en los que se trabaja en cada proceso. Las membranas de microfiltración filtran partículas coloidales y bacterias de 0.1 a 10 μm de diámetro. Las membranas de ultrafiltración pueden usarse para filtrar macromoléculas disueltas

como proteínas mientras que, en membranas de ósmosis inversa, los poros de la membrana son muy pequeños, desde 3 a 5 Å de diámetro.

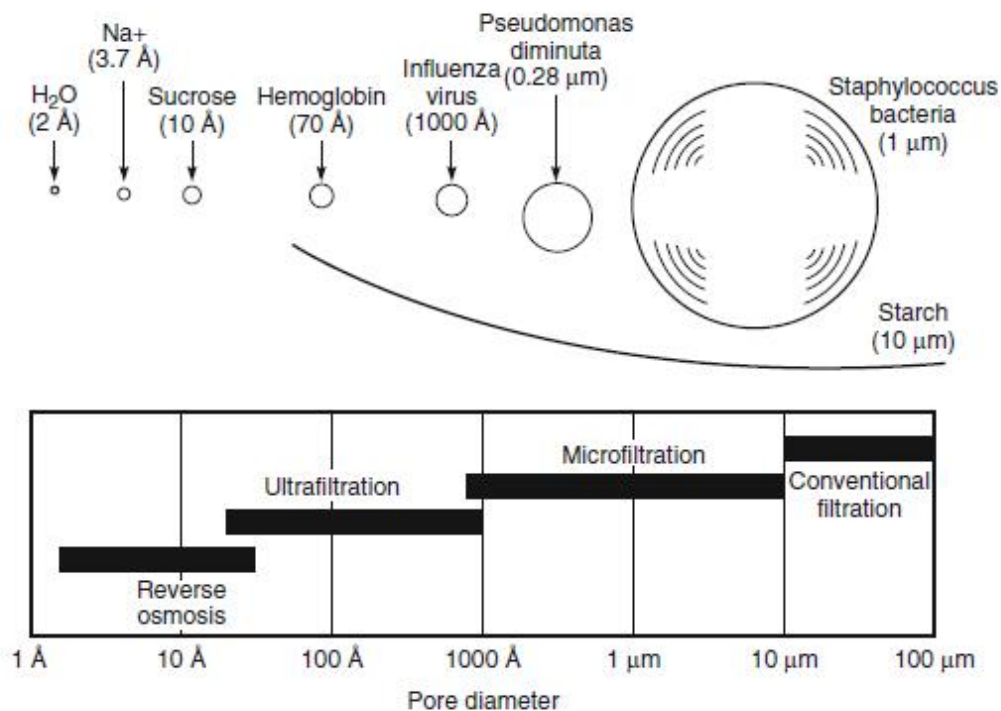


Figura 1.1. Rango de tamaños para cada proceso con membranas. [2]

En el caso de la tecnología de ósmosis el transporte de agua se da a través de una membrana de permeabilidad selectiva de una región de mayor potencial químico del agua a una región de menor potencial químico del agua. En función de la magnitud y sentido de la presión aplicada (ΔP) al sistema, se pueden diferenciar tres procesos distintos de ósmosis:

- Ósmosis directa (OD) o Forward Osmosis (FO): No utiliza presión hidráulica. La fuerza impulsora es el gradiente de presión osmótica entre las disoluciones.
- Pressure Retarded Osmosis (PRO): Utiliza presión hidráulica sin exceder a la presión osmótica. La fuerza impulsora es la diferencia entre el gradiente de presión osmótica entre disoluciones y la presión hidráulica aplicada.
- Ósmosis inversa (OI): Utiliza la presión hidráulica excediendo a la presión osmótica. La fuerza impulsora es la diferencia entre la presión hidráulica aplicada y el gradiente de presión osmótica entre disoluciones.

Las diferencias entre los procesos de ósmosis descritos se esquematizan en la Figura 1.2 donde se representa la dirección y magnitud del flujo de agua como una función de la presión aplicada. Para procesos de ósmosis directa nos encontramos en el punto en el que no existe presión aplicada y la fuerza impulsora del proceso es máxima. En la Pressure Retarded Osmosis (ósmosis retardada por presión) se aplican presiones hidráulicas inferiores al gradiente de presión osmótica. Este tipo de procesos se utiliza para la generación de energía. A partir del punto de flujo inverso se aplican presiones mayores para invertir el flujo de agua en los procesos de ósmosis inversa. [3]

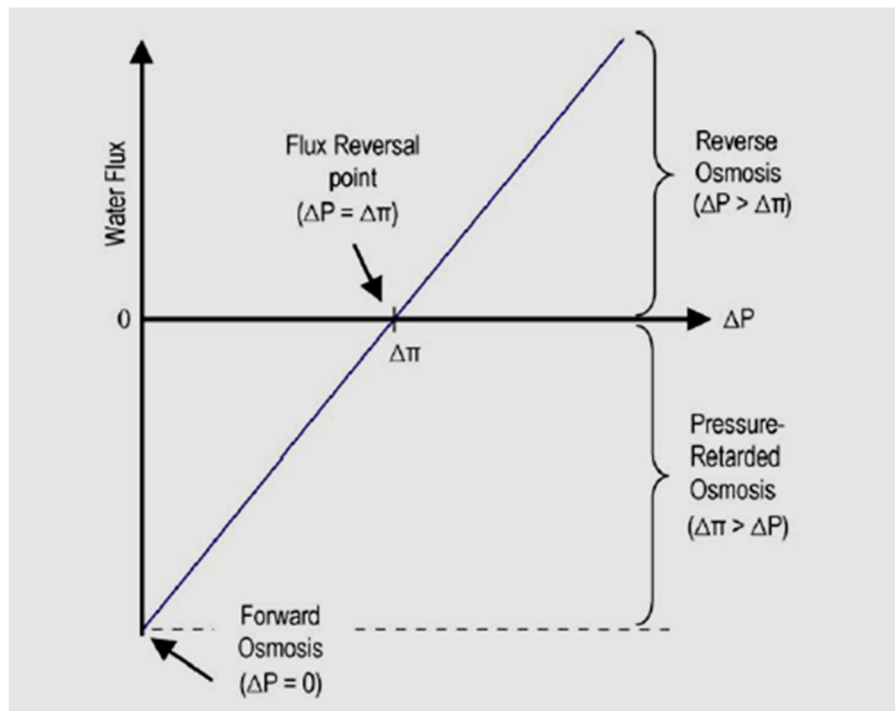


Figura 1.2. Dirección y magnitud del flujo de agua como una función de la presión aplicada en OD, PRO y OI. [3]

La OD puede abordar algunas deficiencias en procesos con membranas impulsados por presión hidráulica, como la ósmosis inversa. Sin embargo, a pesar de los importantes avances en la comprensión del proceso OD, el reto sobre la eficiencia energética y el estado de la tecnología debe de abordarse más profundamente. [4]

1.3. Tecnología de ósmosis directa

1.3.1. Fundamentos

La ósmosis directa es un proceso emergente de separación/desalinización que ha recibido una elevada atención en la pasada década tanto en la investigación académica como en el desarrollo industrial. [4]

En OD, una membrana semipermeable está situada entre dos disoluciones de diferentes concentraciones; una disolución concentrada y una alimentación más diluida, usando la diferencia de presión osmótica para impulsar la permeación de agua a través de la membrana.

La presión osmótica (π) es la presión que, si se aplica a la disolución más concentrada, impediría el transporte de agua a través de la membrana. La ósmosis directa utiliza el gradiente de presión osmótica a través de la membrana, en lugar del diferencial de presión hidráulica (Como en OI), como la fuerza motriz para el transporte de agua a través de la membrana. El proceso OD tiene como objetivo la concentración de una corriente de alimentación y la dilución de una corriente altamente concentrada. En la Figura 1.3 podemos observar los distintos procesos asociados a la ósmosis dependiendo de si se trabaja con o sin presión hidráulica, ΔP .

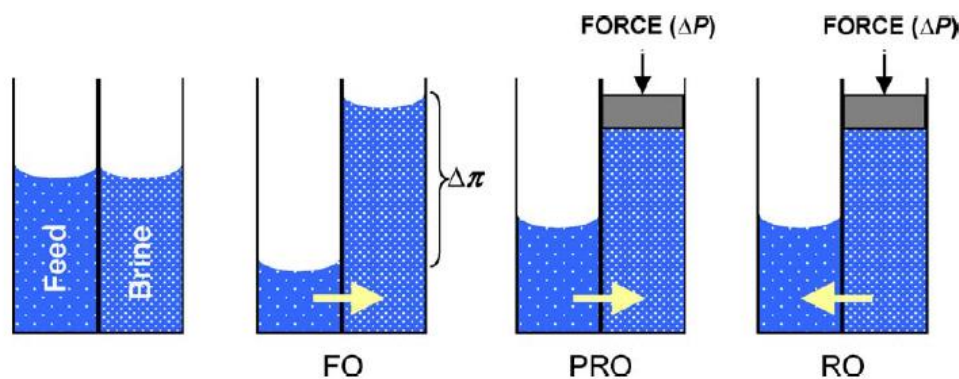


Figura 1.3. Esquema de la presión osmótica. [3]

La ecuación general que describe el flujo de agua a través de la membrana en un proceso de OD es la siguiente:

$$J_w = A\sigma(\Delta\pi - \Delta P) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde J_w es el flujo de agua, A es la constante de permeabilidad de la membrana, σ es el coeficiente de rechazo de la membrana y $\Delta\pi$ es el gradiente de presión osmótica entre las dos disoluciones y ΔP es la presión hidráulica aplicada en el caso de que se aplique presión como en los procesos esquematizados en la Figura 1.3.

En esta ecuación, $\Delta\pi$ representa la diferencia de presión osmótica a través de la membrana. En la figura 1.4 se representa un esquema de una membrana de ósmosis directa, donde J_w es el flujo de agua a través de la membrana, C_5 es la concentración de la disolución osmótica, C_1 es la concentración de la alimentación y J_s es el flujo de soluto en sentido inverso al flujo de agua, es decir, la difusión de soluto desde la fase de la disolución osmótica hacia la fase de alimentación debido al gradiente de concentraciones (ΔC). La cantidad de soluto que no permea a través de la membrana se conoce como rechazo, teniendo que ser este lo más elevado posible.

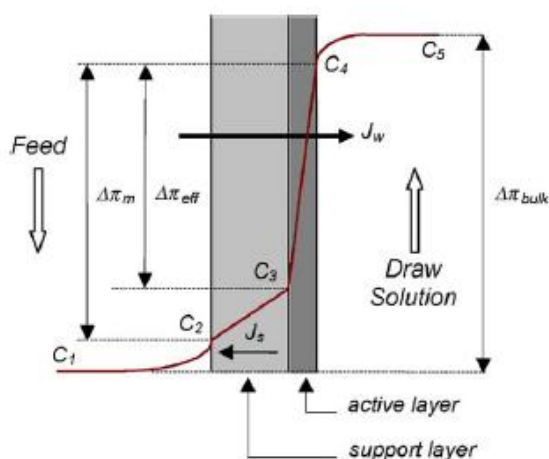


Figura 1.4. Esquema de una membrana de ósmosis directa. [3]

1.3.2. Disoluciones osmóticas

La disolución concentrada en el lado del permeado de la membrana es la fuente de la fuerza impulsora en el proceso de OD. Se utilizan diferentes términos en la literatura para nombrar esta disolución incluyendo draw solution, agente osmótico, medio osmótico, disolución impulsora o simplemente salmuera. [3]

Existen varios factores que pueden influenciar el resultado del proceso de ósmosis directa y, en general, están relacionados con las características de las draw solutions, las propiedades de la membrana y las condiciones de operación.

Cuando se selecciona una disolución concentrada, hay que tener en consideración una serie de criterios:

- La selección de la presión osmótica para que sea mayor que la disolución de la alimentación.
- La selección de un proceso adecuado para la reconcentración de la disolución concentrada después de que haya sido diluida en el proceso de OD.
- La selección de una disolución químicamente estable y no reactiva con la membrana.

También es importante conocer el efecto de las características principales de las draw solution sobre el rendimiento global del proceso. En la Tabla 1.1 se recogen las principales características de las draw solution con su correspondiente efecto en los procesos de OD. [5]

Tabla 1.1. Características y efectos de las draw solution. [5]

CARACTERÍSTICAS DE LAS DRAW SOLUTIONS	IMPACTO SOBRE UN PROCESO DE OSMOSIS DIRECTA
Presión osmótica	Una alta presión osmótica de la draw solution y una baja presión osmótica de la alimentación inducen altos flujos de agua
Solubilidad en agua	Alta solubilidad induce alta presión osmótica y, por tanto, alto flujo de agua
Peso molecular (Pmol)	Solutos de bajo Pmol producen presiones osmóticas mayores, pero inducen mayor flujo inverso de soluto que solutos de alto peso molecular
Concentración	El flujo de agua aumenta a mayores concentraciones de draw solution, aunque la polarización de la concentración dilutiva se incrementa resultando en una mejora del flujo de agua menos efectiva.
Temperatura	Alta temperatura debería no sólo aportar altos flujos iniciales y altas recuperaciones de agua, sino también inducir efectos adversos más severos en el escalado y la limpieza de las membranas.

Un buen ejemplo de las características recogidas anteriormente es el NaCl, se suele emplear una disolución de NaCl porque tiene una alta solubilidad y es relativamente sencilla para reconcentrar mediante ósmosis inversa sin riesgo de escalado. La difusión del soluto desde la disolución concentrada a través de la membrana debe tenerse en

cuenta, es decir el retroflujo. En aplicaciones específicas donde se desean altos rechazos, es preferible utilizar disoluciones de iones multivalentes. Esto se debe a que al incluir estos iones multivalentes en la disolución osmótica minimiza el retroflujo de soluto hacia la alimentación debido a su radio hidratado y sus menores valores del coeficiente de difusividad. [6]

1.3.3. Membranas

Generalmente, cualquier material denso, no poroso y permeable selectivamente puede ser utilizado como una membrana de ósmosis directa. Una membrana de ósmosis directa consta de una capa activa y de un soporte poroso que confiere resistencia mecánica. Las características deseadas de membranas para ósmosis directa son una alta densidad de la capa activa para un alto rechazo de soluto y una membrana delgada con una porosidad mínima del soporte para una baja concentración de la polarización, y, por lo tanto, un flujo de agua mayor. En las figuras 1.5 [7] y 1.6 [8] se puede observar una membrana usada en este tipo de procesos compuesta por triacetato de celulosa. Esta membrana carece de soporte, en su lugar una malla de poliéster proporciona una buena resistencia mecánica.

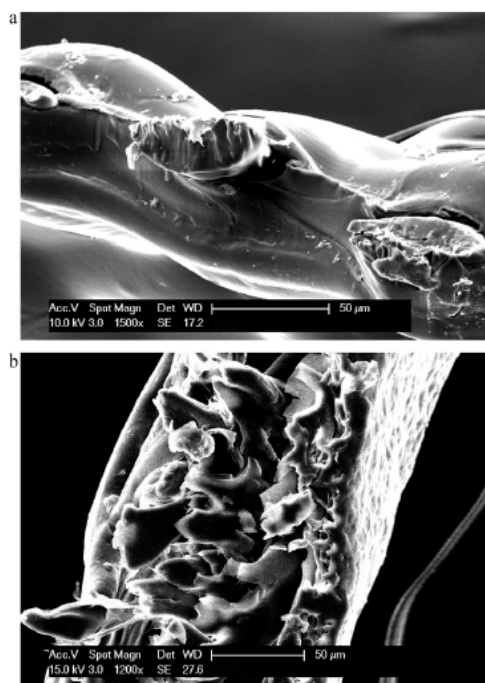


Figura 1.5. Corte Transversal de una membrana de triacetato de celulosa de OD. [7]

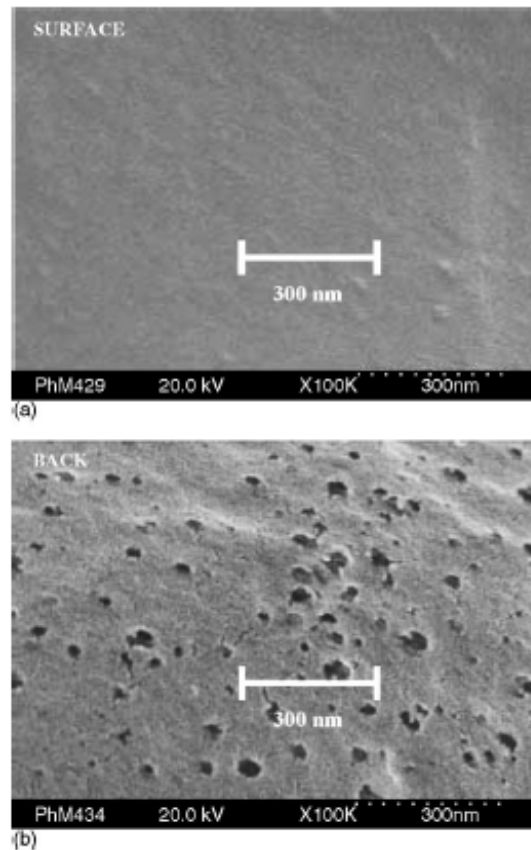


Figura 1.6. Imágenes de (a) Capa activa de una membrana OD y (b) Capa soporte de una membrana de OD. [8]

Existen dos modos de operación según la orientación de la capa activa de la membrana:

- AL-FS (Active layer – Feed solution): La alimentación se encuentra en contacto con la capa activa de la membrana y la draw solution con la capa soporte porosa de la membrana.
- AL-DS (Active layer – Draw solution): La draw solution se encuentra en contacto con la capa activa de la membrana y la alimentación está enfrentada con la capa soporte porosa de la membrana.

En los procesos de ósmosis directa es habitual una pérdida de eficacia (menor flujo de agua y mayor retroflujo de solutos) debido a los fenómenos de polarización de la concentración. Este fenómeno hace que la diferencia de presión osmótica eficaz a través de la capa activa sea más baja que la diferencia de presión observada la cual es proporcional a la diferencia de concentración entre la alimentación y la draw solution ($\Delta\pi_{\text{bulk}}$) [3]. En el caso de membranas asimétricas constituidas por una capa activa densa y soporte microporoso, la polarización de la concentración sucede externamente en las

interfases disolución-superficie de la membrana e internamente en la capa soporte porosa de la membrana. Estos dos tipos de fenómenos se describen a continuación:

- La polarización de la concentración externa: el flujo convectivo de permeado provoca un fenómeno de dilución las proximidades de la membrana (capa límite) haciendo que la concentración de soluto disminuya, generando un gradiente de concentración externo (C_5-C_4). Para amortiguar dicho gradiente el soluto tiende a difundir a través de la capa límite. Este tipo de polarización depende de las condiciones fluido dinámicas del sistema y habitualmente es despreciable con respecto a la polarización interna (Figura 1.4).
- La polarización de la concentración interna: la capa activa tiene una cierta permeabilidad al soluto. Una vez que el soluto atraviesa la capa activa, deberá difundir lo más rápido posible a través del soporte poroso y hacia el seno de la fase de alimentación con el fin de maximizar el gradiente eficaz de presión osmótica ($\Delta\pi_{eff}$). La velocidad de transferencia de materia viene definida por el correspondiente coeficiente de transporte de materia en la membrana (Figura 1.4).

La polarización de la concentración puede minimizarse incrementando la velocidad de flujo y la turbulencia. [3]

1.3.4. Ensuciamiento de las membranas

El ensuciamiento de las membranas es un fenómeno inevitable y negativo en todos los procesos de membrana y se hace visible en largos periodos de operación. Sin embargo, esta tendencia al ensuciamiento de los procesos de membrana es menor con el principio de la ósmosis como fuerza impulsora que la que se produce en procesos de membrana con la presión hidráulica como fuerza impulsora.

Esta baja tendencia al ensuciamiento supone una menor necesidad de limpieza y una vida más larga del equipo, traducándose en un ahorro de costes de capital y de operación.

Cuando la draw solution se encuentra enfrentada al lado soportado de la membrana, el soluto de la draw solution se acumula en la superficie de la capa activa mediante difusión inversa provocando un aumento de la polarización de la concentración, reduciéndose la fuerza impulsora y disminuyéndose así el flujo de agua.

Tanto la tendencia al ensuciamiento como la polarización de la concentración, aumentan la resistencia y reducen la permeabilidad de la membrana. En este sentido es necesario seguir investigando a escala de laboratorio como paso previo a la realización de pruebas a gran escala hasta que se puedan mejorar inconvenientes que aún quedan por solucionar. Algunos de estos inconvenientes son:

- Inexistencia de una draw solution ideal.
- Necesidad de mejora y optimización de las membranas de osmosis directa.
- Falta de desarrollo de un método de regeneración de la draw solution diluida fácil y económico.

1.3.5. Aplicaciones

Las aplicaciones que se han estudiado para los procesos de osmosis directa abarcan varios campos como pueden ser la industria farmacéutica, la industria alimentaria, y por supuesto la industria química. Uno de los campos más recientes en el uso de este tipo de proceso es en el tratamiento de aguas residuales y purificación de agua. A continuación, se describen algunas aplicaciones de osmosis directa en el tratamiento de aguas residuales y purificación de agua, desalación de agua de mar, procesado de alimentos, aplicaciones farmacéuticas y generación de energía. [3]

Tratamiento de aguas residuales y purificación de agua

Concentración de lixiviados de vertedero:

El lixiviado de vertedero es una disolución compleja compuesta por cuatro tipos generales de contaminantes: compuestos orgánicos, metales pesados disueltos, nitrógeno orgánico e inorgánico y sólidos disueltos totales. El tratamiento más sencillo para los lixiviados de vertedero es procesarlo en instalaciones de tratamiento de aguas residuales. Normalmente se procesa en instalaciones en las que se centra en tratar orgánicos, metales pesados y nitrógeno sin tener un tratamiento de sólidos disueltos totales. [3]

El lixiviado puro se recoge y se pre-trata anteriormente al sistema de osmosis inversa en seis etapas con celdas de osmosis directa. Se utiliza una disolución de cloruro sódico como draw solution. Posteriormente, un sistema de osmosis inversa de tres etapas trata el permeado de la osmosis directa, produciéndose una corriente de agua pura y una

corriente de draw solution reconcentrada. El lixiviado concentrado procedente de las seis etapas de osmosis directa se solidifica y se devuelve al vertedero. Se puede ver un esquema del proceso en la Figura 1.7. [3]

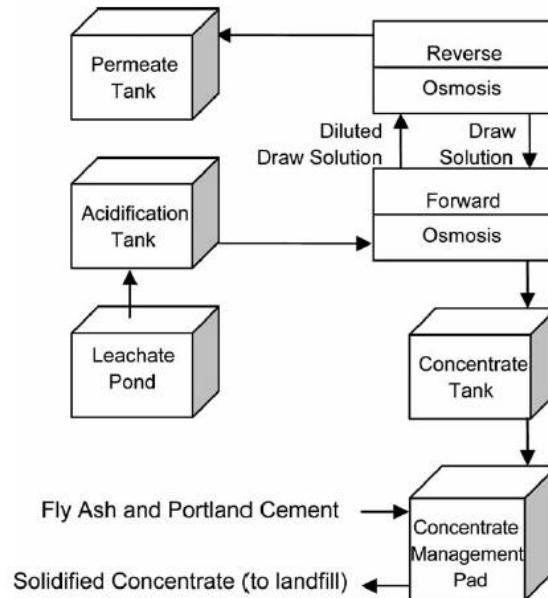


Figura 1.7. Diagrama de flujo de un proceso de tratamiento de lixiviados mediante FO

✚ Reutilización directa de agua potable para sistemas avanzados de soporte vital:

Las misiones espaciales de largo tiempo requieren un suministro continuo y autosuficiente de agua dulce para consumo, higiene y mantenimiento. Dependen de un sistema de tratamiento del agua que recupere agua potable del agua residual generada a bordo de la nave o en el hábitat planetario. El sistema para tratar estas aguas residuales ha de ser fiable, duradero, ligero y capaz de recuperar un alto porcentaje de las aguas residuales. Adicionalmente, el sistema debería ser autónomo, con poco mantenimiento y consumir poca energía. Una de las varias tecnologías para la reutilización de agua potable en el espacio que están siendo evaluadas por la administración nacional de aeronáutica y del espacio de los estados unidos recibe el nombre de concentración osmótica directa (DOC) ilustrada en la Figura 1.8. [3]

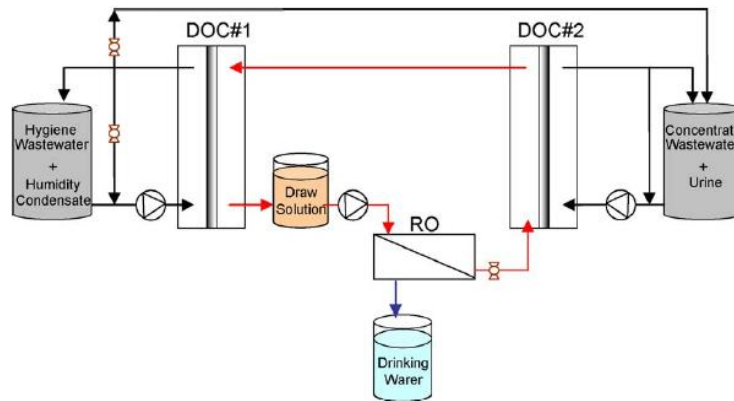


Figura 1.8. Diagrama de flujo original DOC de la NASA (concentración osmótica directa).

Desalación de agua de mar:

🔧 Producción de agua potable:

Los procesos de desalinización con osmosis directa consisten en primer lugar en la dilución de la draw solution mediante el flujo de agua procedente del agua de mar y en segundo lugar la recuperación del agua diluida en la draw solution.

En recientes estudios se ha demostrado que cuando se usa una membrana adecuada de osmosis directa y una draw solution fuerte, el agua de mar puede ser eficientemente desalada mediante la osmosis directa. Esta draw solution está formada mediante la mezcla en proporciones específicas de carbonato de amonio e hidróxido de amonio formándose especies salinas como carbonato de amonio, bicarbonato de amonio y carbamato de amonio. Estas sales son altamente solubles, crean presiones osmóticas elevadas, se difunden relativamente rápido en disolución, son rechazadas por las membranas semipermeables y se pueden eliminar de la disolución con la adición de calor. Un esquema de este proceso de osmosis directa se ilustra en la Figura 1.9. [3]

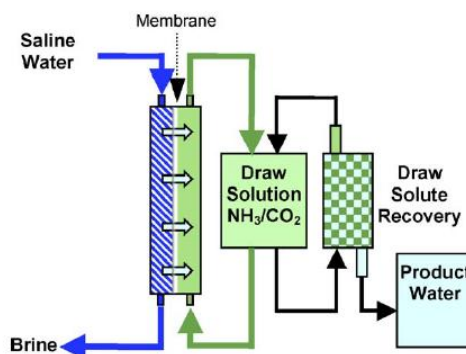


Figura 1.9. Esquema del proceso de osmosis directa Amoniac-Dióxido de carbono.

A medida que el agua procedente del agua de mar atraviesa la membrana, sus sales y los solutos de la draw solution son rechazados tal que el agua de mar se concentra y la draw solution se diluye. Calentando moderadamente (cerca de 60°C), esta se descompone en amoníaco y dióxido de carbono. La separación del agua dulce producto de la draw solution diluida se puede llevar a cabo por varios métodos de separación (columnas de destilación o destilación con membranas) obteniéndose agua pura y una draw solution reconcentrada disponible para su reutilización en el proceso. [3]

Procesado de alimentos:

En la industria alimentaria, a menudo es necesario eliminar agua de los alimentos para aumentar su estabilidad y reducir costes de almacenamiento y transporte. La osmosis directa actúa como un proceso de deshidratación para eliminar agua de alimentos manteniendo sus propiedades físicas sin deteriorar su calidad. Por el contrario, las técnicas convencionales afectan perjudicialmente a compuestos clave responsable del sabor, aroma y compuestos esenciales para mantener las características de frescor en concentrados de calidad. Su uso está ampliamente extendido a escala de laboratorio para concentrar alimentos que contienen aguas tales como zumo de tomate, champiñones, zumo de frutas, peras, zanahorias, papayas, patatas, albaricoques, fresas, piñas y pimientos. [3]

Industria farmacéutica:

- Bombas osmóticas:

La vía oral, que todavía es el modo más aceptado de administración de medicamentos recetados, puede tener limitaciones en lograr los resultados deseados. En circunstancias especiales, se requiere de una liberación dirigida o una dosis precisa de un remedio en el cuerpo, particularmente en enfermedades crónicas. Los beneficios adicionales de la liberación controlada de fármacos incluyen la disminución de la frecuencia de dosificación, la concentración más regular de fármacos en el torrente sanguíneo, una mayor biodisponibilidad y la reducción de los efectos secundarios. Esta forma de administración de medicamentos se encuentra implementada en las denominadas bombas osmóticas. [3]

Uno de los ejemplos de las bombas osmóticas aplicadas a la terapia humana es el sistema DUROS® que puede administrar medicamentos de manera continuada durante un año. El principal componente de un sistema común de liberación de medicamentos osmótico se muestra en la Figura 1.10.

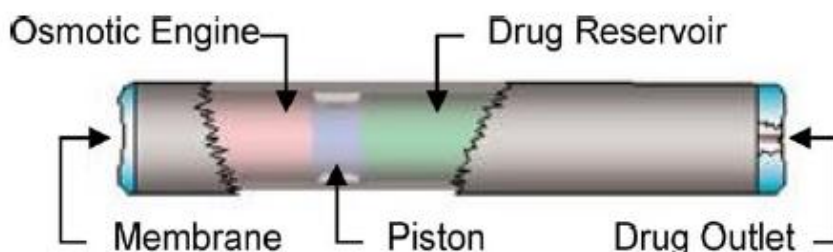


Figura 1.10. Esquema de las secciones que componen el sistema DUROS®.

En la Figura 1.10 la bomba osmótica se encuentra alojada en un depósito cilíndrico de una aleación de titanio que protege las moléculas del medicamento de las enzimas, de la humedad del cuerpo y de los componentes celulares que podrían desactivar el medicamento antes de su liberación. Una membrana semipermeable de poliuretano recubre un extremo del depósito. El motor osmótico (Osmotic Engine) se encuentra detrás de la membrana. Normalmente, la draw solution es cloruro sódico y una pequeña cantidad de excipientes farmacéuticos en forma de pastilla. Un pistón separa la draw solution de la formulación medicinal (Drug Reservoir), que puede ser una disolución o una suspensión acuosa o no acuosa y debe ser estable a temperatura corporal (37°C). Cuando la bomba osmótica contacta con una solución acuosa, el agua difunde a través de la membrana hacia el compartimento de la draw solution. A medida que aumenta la presión, se expande y empuja al pistón con lo que se libera el medicamento por un orificio (Drug Outlet). [3]

Energía osmótica:

- Pressure-retarded osmosis:

La energía renovable se puede extraer siempre que dos corrientes de agua de diferente salinidad o de diferente potencial químico se encuentren. Considerando que la salinidad del agua de mar produce presiones osmóticas de 2.7MPa y que la presión osmótica del agua de río es relativamente insignificante, una gran parte de los 2.7 Mpa puede

utilizarse para la generación de energía. [3] Un esquema de la generación de energía mediante el uso de PRO se ilustra en la Figura 1.11

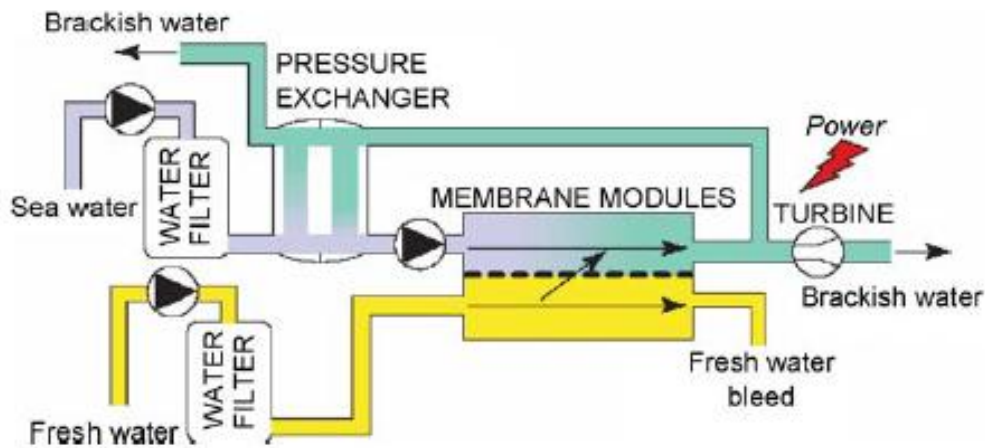


Figura 1.11. Proceso simplificado de una planta energética de PRO.

Como se muestra en la Figura 1.11 el agua dulce se bombea a un módulo que contiene membranas semipermeables, donde difunde hacia el lado que contiene el agua de mar que se encuentra presurizado. El agua de mar diluida y presurizada se divide en dos corrientes: una que es despresurizada en una turbina produciendo energía, y otra que pasa a través de un intercambiador de presión para ayudar en la presurización del agua de mar entrante. La energía obtenida es aquella que se define como la energía generada por unidad de área de membrana (Ecuación 2) denominada densidad de potencia (W), y representa la eficiencia de conversión de energía de la membrana. [3]

$$W = J_w * \Delta P \quad (\text{Ecuación 2})$$

1.4. Antecedentes y objetivos

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) se enmarca en un proyecto de investigación más amplio, que se está desarrollando en el departamento de Ingenierías Química y Biomolecular del grupo Procesos Avanzados de Separación (PAS) de la Universidad de Cantabria, que tiene como objetivo el diseño de procesos de separación basados en osmosis directa en los que se emplean como draw solutions suspensiones de nanopartículas magnéticas (NPMs).

En primer lugar, el proyecto de investigación se ha dirigido hacia el estudio del comportamiento de soluciones osmóticas innovadoras para procesos de osmosis directa centrado en los siguientes objetivos:

- Viabilidad del potencial de distintas draw solutions propuestas.
- Evaluación de la draw solution elegida en un sistema de osmosis directa.
- Funcionalidad de la draw solution escogida con nanopartículas ferromagnéticas.

Las draw solutions analizadas fueron una de un azúcar (glucosa), un aminoácido (glicina), un líquido iónico (IL-OH) y una sal orgánica (TANED). De todas ellas se trabajó con aquellas que presentaban mayor presión osmótica que el NaCl; el líquido iónico (IL-OH) y la sal orgánica (TANED), siendo descartado el líquido iónico debido a que es un agente higroscópico y se degrada con el tiempo. Se concluyó, debido a los excelentes valores de flujo de agua y a un rechazo del 100%, que la sal orgánica fue una gran contribución a los procesos de osmosis directa, observando un alto rendimiento en el flujo de agua cuando se añadía esta sal a las disoluciones de nanopartículas magnéticas.

En segundo lugar, se continuó con otro estudio de cara al diseño de procesos avanzados de separación mediante osmosis directa y en el cual se plantearon los siguientes objetivos:

- Profundizar en el conocimiento de los procesos avanzados de separación mediante ósmosis directa.
- Llevar a cabo la evaluación técnica de diferentes membranas comerciales de ósmosis directa.
- Seleccionar la membrana que proporciona mejores resultados en términos de máximo flujo de permeado y máximo rechazo de sales.

En este proyecto se utilizó como draw solution cloruro sódico y se concluyó que a medida que aumentamos la concentración inicial de NaCl también nos aumenta el flujo de agua, el retroflujo de sal y el rechazo de la membrana. En cuanto a la orientación de la membrana en la evaluación técnica de las membranas se concluyó que con la orientación de la capa activa hacia la draw solution se alcanzan mayores valores de flujo de agua en todas las membranas y mayores valores de flujo de soluto para todas las membranas excepto para la CTA-ES.

Teniendo en cuenta los estudios realizados hasta el momento en el proyecto de investigación, este TFG tiene como principal objetivo contribuir al diseño de la draw solution ideal. Dentro de este objetivo principal se han propuesto diseñar los siguientes objetivos parciales:

- Analizar el comportamiento de Draw solution partiendo de sales monovalentes y sales divalentes en procesos de osmosis directa trabajando individualmente.
- Evaluar el comportamiento empleando draw solutions con mezcla de sales.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En esta sección se describen los materiales empleados, el sistema experimental, la metodología y el diseño empleado durante el desarrollo experimental de este Trabajo Fin de Grado. En el penúltimo apartado de este capítulo se describe la realización de un experimento tipo, así como el procesamiento de datos para la obtención de los resultados posteriores con el objetivo de evaluar la influencia de los electrolitos en procesos de ósmosis directa.

2.1. Método experimental

2.1.1. Material empleado

A la hora de llevar a cabo los experimentos, se han empleado disoluciones de alimentación, disoluciones de draw solution, membrana, malla espaciadora, material de vidrio siguientes:

- Como disolución de alimentación se ha utilizado agua ultra milli-Q.
- Como draw solution se han utilizado disoluciones de NaCl de la casa comercial Scharlau con una pureza mínima del 99% y disoluciones de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ de la casa comercial Probus con una pureza mínima del 99%.
- La membrana empleada ha sido HTI OsMem™ CTA-ES de la casa comercial Hydration Technology Innovations. Se trata de una membrana de triacetato de celulosa con soporte de una malla de poliéster entretejido. En la Figura 2.1, se muestra una imagen con microscopio electrónico de ambos lados de la membrana junto con un corte transversal de la misma.

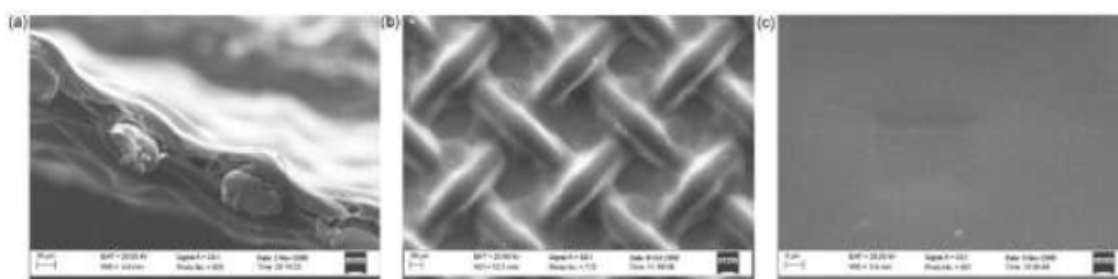


Figura 2.1. HTI OsMem CTA-ES. (a) imagen SEM de un corte transversal de la membrana. (b) Imagen SEM de la cara de atrás (soporte) de la membrana. (c) Imagen SEM de la superficie activa. [9]

En la Figura 2.1(a), se puede ver como la membrana esta soportada mecánicamente por una malla entretejida. Esta malla está compuesta por fibras de poliéster dispuestas ortogonalmente con un espaciado aproximado de 0,12 mm; también visible desde la cara de atrás (soporte) de la membrana (Figura 2.1(b)).

- Una malla espaciadora de polipropileno (Figura 2.2) sobre la capa activa de la membrana con la intención de generar turbulencia en la superficie de la membrana y disminuir la polarización de la concentración externa.



Figura 2.2. Malla espaciadora de polipropileno

- Material de vidrio de uso común como vasos de precipitados, matraces aforados, probetas, etc.

2.1.2. Sistema experimental

El sistema experimental utilizado para la realización de este trabajo se encuentra ubicado en el laboratorio 530 en la planta -5 de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, en el departamento de Ingeniería Química y Biomolecular de la Universidad de Cantabria. En la Figura 2.3 se muestra una imagen del sistema experimental.

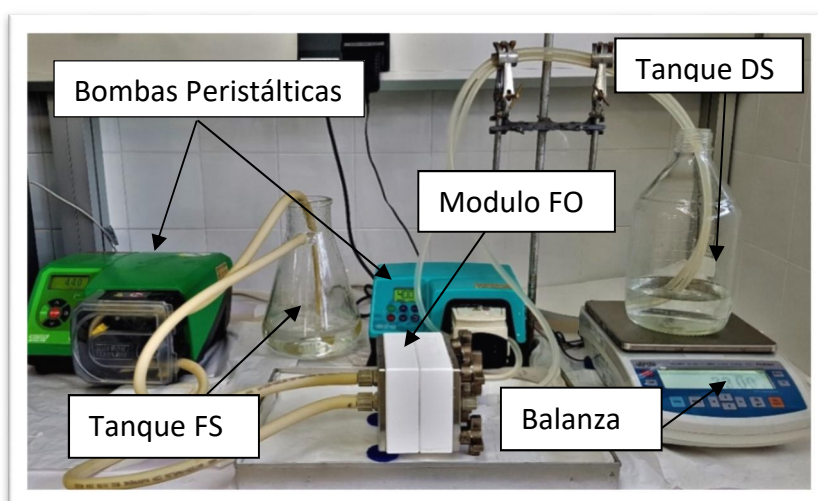


Figura 2.3. Sistema experimental de Osmosis directa empleado en la realización del TFG.

Como se muestra en la Figura 2.3 el equipo está compuesto por un módulo de membranas de FO, dos bombas peristálticas, una balanza de precisión, un ordenador y un conductivímetro.

A continuación, se describen los elementos que componen el sistema experimental:

Módulo de membranas de FO

El módulo de membranas de FO es el modelo CF042-P de la casa comercial STERLITECH con un área efectiva de membrana de 42 cm² (Figura 2.4).

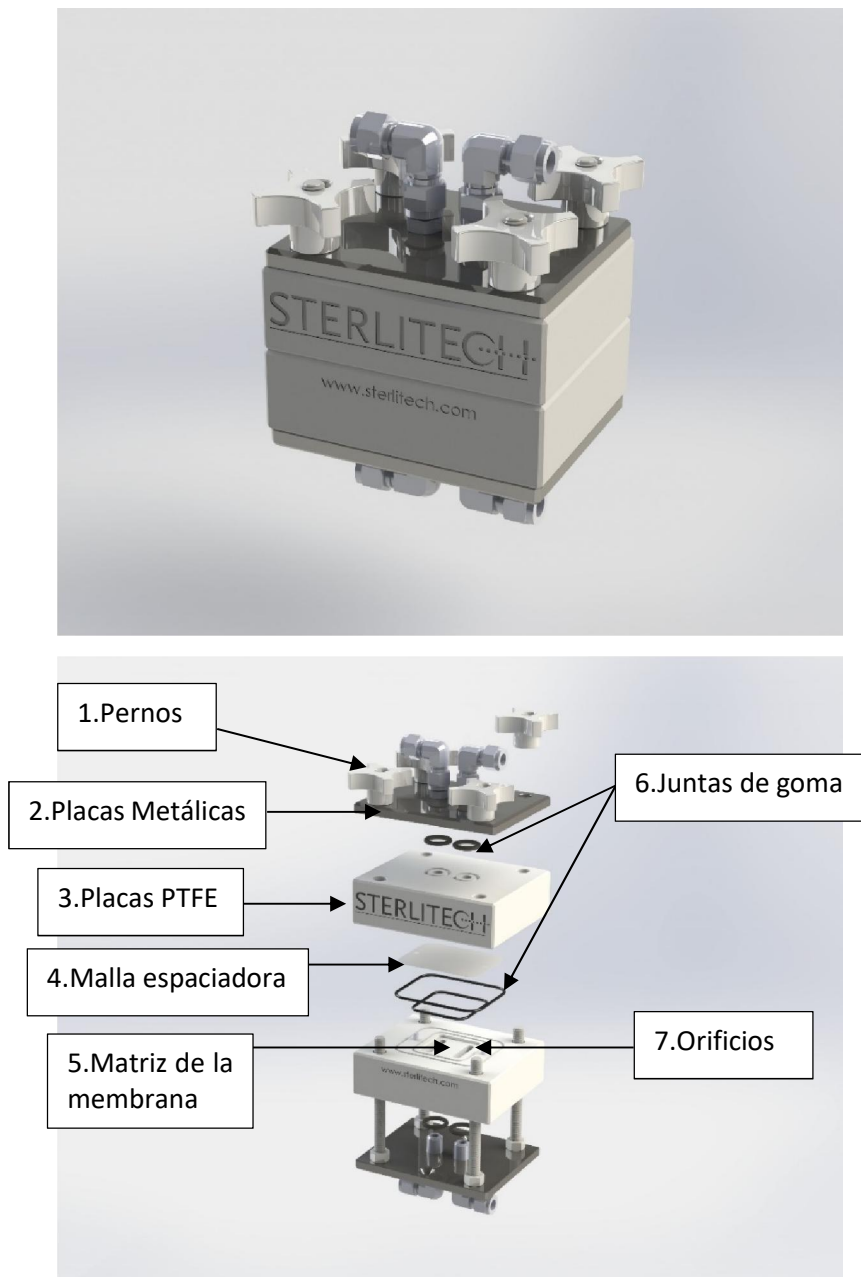


Figura 2.4. Módulo de OD de la casa comercial STERLITECH modelo CF042P abierto (inferior) y el módulo de OD cerrado (superior)

El módulo (Figura 2.4) está constituido por dos placas de politetrafluoroetileno (3) (PTFE, teflón) sujetadas la una a la otra por 4 pernos (1) y dos placas metálicas de acero inoxidable (2) cuya función es soportar la presión del módulo evitando la separación de las placas. En concreto, la presión y las temperaturas máximas soportadas por el módulo son 300 psi (20 bar) y 80 °C. La membrana se coloca en la matriz interna del módulo (5) entre las placas de PTFE junto con la malla espaciadora (4) y unas juntas de goma (6) para evitar fugas en el sistema. La matriz de la membrana está conectada con los tubos del circuito por medio de los orificios de entrada y salida (7), los cuales también poseen unas juntas de goma de igual forma que la matriz para evitar fugas en el sistema.

Bombas peristálticas

Las bombas peristálticas (Figura 2.5) se encargan de impulsar la disolución de alimentación y la draw solution desde los tanques hasta el módulo donde se encuentra la membrana y se lleva a cabo el proceso de osmosis. A la izquierda se observa una bomba de manguera Watson marlow 323 con un rango de caudales de 0-400 rpm y a la derecha una bomba de proceso Watson marlow 520S con un rango de caudal de 0-440 rpm.



Figura 2.5. Bomba Watson marlow 323 (Draw solution) y bomba Watson marlow 520S (alimentación) empleadas en el TFG.

Balanza de precision

La balanza de precision (Figura 2.3) se utiliza para hacer un seguimiento de la variación del peso con el tiempo. El modelo empleado ha sido el PS 60000/X de la casa comercial Radwag. La balanza posee un cable usb conectado al ordenador para la recogida de datos automatica mediante el software Pomiar Win de Radwag.

Tabla 2.1. Datos técnicos de la balanza analítica.

Capacidad máxima	6000	G
Carga mínima	0,5	G
Legibilidad	0,01	G
Rango de tara	-6000	G
Repetitividad	0,015	G
Linealidad	±0,03	G
Tamaño de la bandeja	195x195	Mm
Tiempo de estabilización	1,5	S
Sensibilidad	2 ppm/°C en temperatura 15° - 35 °C	
Temperatura de trabajo	10° - 40 °C	
Suministro de potencia	13,5 16 V DC / 2,1 A	
Ajuste/Calibración	interna (automática)	
Monitor	gráfico con luz	
Interfase	RS 232	
Peso neto/Peso bruto	4,8/6,3	Kg
Tamaño de embalaje	470x380x336	Mm

Conductímetro

El conductivímetro utilizado ha sido el modelo sensION 5 de la casa comercial HACH (Figura 2.6). Este se coloca en el interior del tanque de alimentación con el objetivo de seguir la evolución de la conductividad con el tiempo.



Figura 2.6. Conductímetro sensION 5 de la casa comercial HACH empleado en el TFG.

2.1.3. Metodología experimental

La metodología que se va a seguir en cada experimento es independiente del tipo de disolución osmótica utilizada, por lo que se describe el procedimiento a seguir de forma general para ambos tipos de disoluciones.

Una vez preparada la disolución osmótica se pesa en la balanza y se mide su conductividad inicial. De igual forma se mide la conductividad de la alimentación al inicio. Para la puesta en marcha del equipo experimental, hay que asegurarse que la membrana está orientada de modo que la capa activa esta hacia el lado de la disolución osmótica, colocando la malla espaciadora sobre la capa activa de la membrana. Los tubos de entrada y salida de ambas partes del módulo de OD deben estar correctamente situados con el fin de evitar las vibraciones y garantizar la correcta estabilidad del sistema.

La puesta en marcha del sistema se inicia con el arranque de las bombas de alimentación y de la disolución osmótica simultáneamente, al mismo tiempo que se inicia el software Pomiar para el registro automático del peso de la disolución osmótica y el cronómetro para el registro de la conductividad cada 15 minutos.

La alimentación y la draw solution se bombean a través de los tubos de entrada llegando a los orificios de entrada del módulo de OD hacia la matriz del módulo, donde se encuentra la membrana. En el interior, cada disolución fluye tangencialmente, bien sobre la malla espaciadora de la capa activa o sobre el soporte poroso de la membrana. Ambas disoluciones fluyen en el mismo sentido a lo largo del módulo mientras que parte de la alimentación va permeando a través de la membrana hacia la draw solution. Una vez han atravesado longitudinalmente el módulo, las dos corrientes regresan a los depósitos iniciales de alimentación y draw solution, saliendo por los orificios de salida que conectan con los tubos de salida.

Ambas disoluciones se encuentran recirculando continuamente durante todo el experimento, por lo que la alimentación va a ir perdiendo agua, a la vez que se va concentrando, debido al flujo inverso de soluto (retroflujo) y la draw solution se va diluyendo debido al retroflujo de soluto y al transporte de agua a través de la membrana.

Los ensayos se dejarán alrededor de 20 horas para poder observar correctamente la evolución. Una vez finalizado el experimento se detiene el programa informático y se apaga la bomba de la draw solution y la bomba de la alimentación. Se deberá pasar agua ultra pura en ambos lados para limpiar bien el sistema de cara al siguiente experimento.

2.1.4. Diseño experimental

En la Tabla 2.2 se representan las condiciones de operación utilizadas en los experimentos. Estos experimentos se han llevado a cabo partiendo de las condiciones óptimas estudiadas en el proyecto previo. Estas condiciones óptimas se detallan a continuación:

- Membrana HTI OsMem™ CTA-ES
- Orientación de la membrana AL-DS

Tabla 2.2. Condiciones experimentales

Disolución		Concentración (M)	Concentración (g/L)	Caudal (mL/min)	Presión Osmótica (atm)
NaCl		0,5	29,2	440	22.8
		1	58,4	440	46.8
		2	117	440	100
MgSO ₄		1	120	440	23.3
		2	241	440	54.8
Mezcla	NaCl	0,763	44,6	440	42,9
	MgSO ₄	0,188	22,6		

Para estimar las presiones osmóticas de cada una de las draw solutions utilizadas se ha utilizado el programa Oli Studio 9.5: Stream Analyzer.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se evalúa la influencia de diferentes composiciones y concentraciones de la draw solutions (DS) sobre el retroflujo (J_s) de sales hacia la fase de alimentación (FS) y sobre el flujo de agua (J_w) desde la fase de alimentación a la fase de la draw solution durante el empleo de la tecnología de osmosis directa. Para este estudio experimental se ha empleado draw solution con diferentes sales y concentraciones tal y como se describe en la Tabla 2.2.

3.1. Estudio de la influencia de la concentración de la draw solution

NaCl como draw solution

El primer estudio realizado en este TFG se centra en la influencia de la concentración de la draw solution y se ha llevado a cabo con una de las sales más comunes encontradas en las salmueras como es el NaCl. Las concentraciones estudiadas han sido 0,5 M, 1,0 M y 2,0 M con unas presiones osmóticas de 22.8 atm, 46.8 atm y 100 atm respectivamente (Tabla 2.2).

Para determinar el flujo de agua (Ecuación 3) con los datos experimentales obtenidos de la evolución del peso de la draw solution con el tiempo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$J_w = \frac{\Delta V_{draw\ solution}}{A_m * \Delta t} = \frac{\Delta m_{draw\ solution} / \rho_{draw\ solution}}{A_m * \Delta t} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Siendo:

- J_w el flujo de agua en L/ (m² h)
- $\Delta m_{draw\ solution}$ el incremento de masa de la draw solution en g
- $\rho_{draw\ solution}$ la densidad de la draw solution en g/L
- A_m el área efectiva de la membrana en m²
- Δt el incremento de tiempo en h

Para determinar el flujo de soluto (Ecuación 4) se calcula el contenido de cloruro sódico de la alimentación con los datos experimentales obtenidos de la medida de la conductividad con el tiempo y con la cantidad de agua transferida a la draw solution:

$$J_s = \frac{V_f * C_f}{A_m * \Delta t} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Siendo:

- J_s el flujo de soluto en mol/ (m² h)
- V_f el volumen de la alimentación en L
- C_f la concentración final de la alimentación en mol/L
- A_m el área efectiva de la membrana en m²
- Δt el incremento de tiempo en h

El volumen en cada instante de la alimentación (Ecuación 5) se halla con la diferencia entre el volumen inicial de la alimentación y el volumen de agua transferido a la draw solution en cada instante:

$$V_f = V_0 - \frac{m_{H_2O}}{\rho_{alimentacion}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Siendo:

- V_f el volumen de la alimentación en L
- V_0 el volumen inicial de la alimentación en L
- m_{H_2O} la masa de agua transferida a la draw solution en g
- $\rho_{alimentación}$ la densidad de la disolución de alimentación en g/L

Para el cálculo de la concentración de la alimentación (Ecuación 6) con los datos experimentales obtenidos del cambio de la conductividad con el tiempo se utiliza los ajustes representados en el Anexo 1:

$$C = x * \frac{conduct}{1000} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Siendo:

- C la concentración final de la alimentación en mol/L
- X es la pendiente de la recta de calibrado de la conductividad en (mol*cm) / (mS*L) $x(\text{NaCl})=0.0108$ y $x(\text{MgSO}_4)=0.0112$
- $Conduct$ la conductividad de la alimentación medida en $\mu\text{S}/\text{cm}$

Las Figuras 3.1 y 3.2 muestran la evolución de la concentración adimensional de la sal en la fase de la draw solution y el flujo de permeado de agua desde la fase de alimentación hasta la draw solution con el tiempo de experimentación, respectivamente.

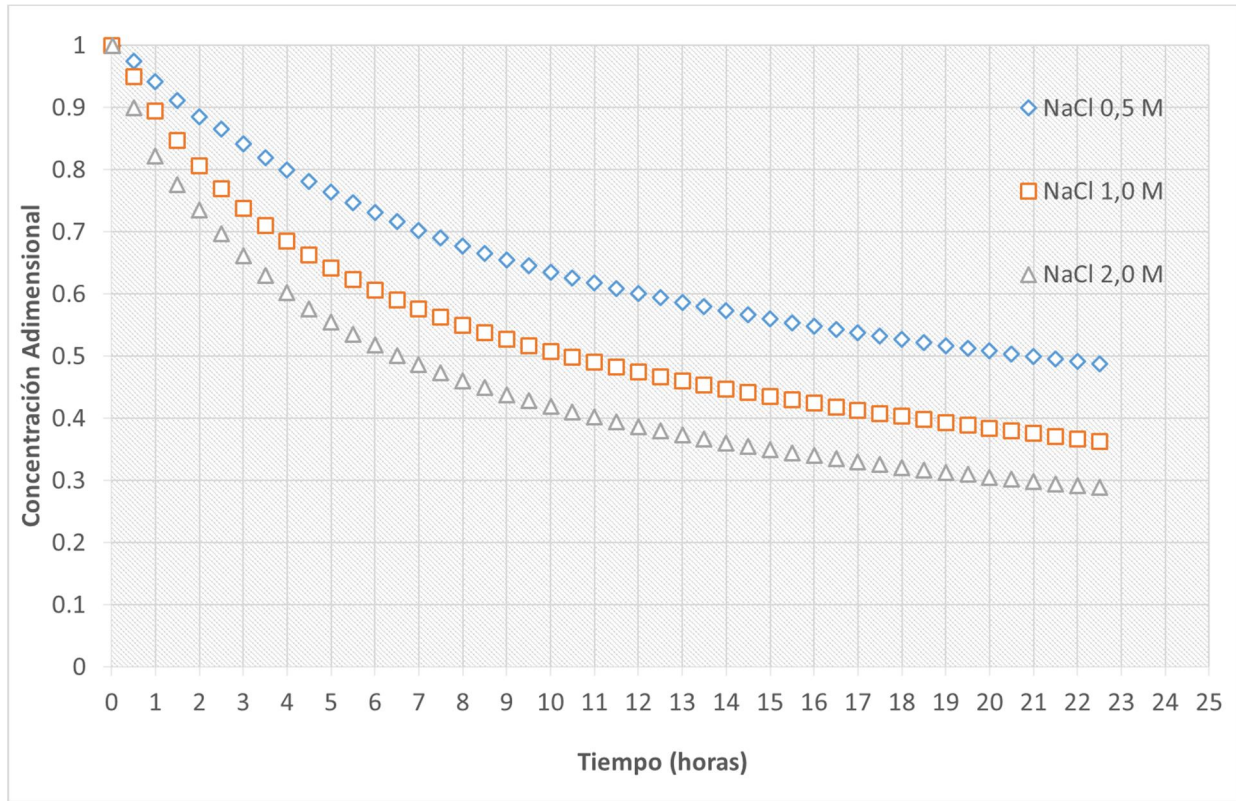


Figura 3.1. Evolución de la concentración adimensional de NaCl con el tiempo en la draw solution para experimentos con concentración inicial de NaCl 0,5, 1,0 y 2,0 M en la DS.

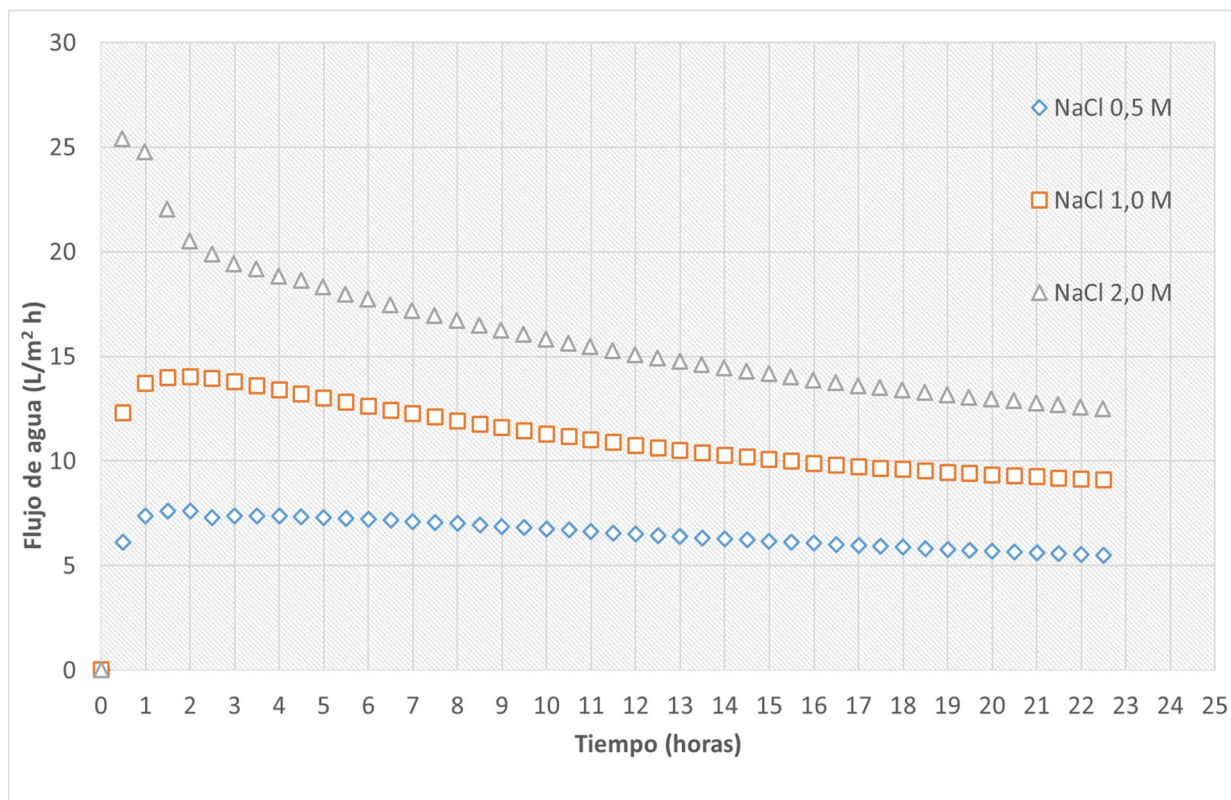


Figura 3.2. Flujo de agua con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial de NaCl 0,5, 1,0 y 2,0 M en la DS.

Como se observa en la Figura 3.1 la evolución de la concentración adimensional del NaCl disminuye asintóticamente con el tiempo tendiendo a alcanzar el estado estacionario después de 23 horas de experimentación. A medida que aumenta la concentración inicial de NaCl de la draw solution, disminuye la concentración de dicha sal en esta fase; esto es debido al mayor flujo de agua procedente de la fase de alimentación tal y como se muestra en la Figura 3.2. De esta forma tenemos un flujo de agua proporcional a la presión osmótica de cada disolución (Tabla 2.2). Así para una concentración inicial de la draw solution 0,5 M de NaCl su concentración con el tiempo se diluye un 50% alcanzándose un flujo de $5,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, mientras que partiendo de una draw solution de concentración inicial 2,0 M de NaCl la concentración final en dicha fase es de 0,6 M, diluyéndose un 70% con un flujo de $12,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$. En términos generales y en el caso de una sal monovalente como es el caso del NaCl el flujo de agua aumenta algo más del doble ($\times 2$) siendo para ello necesario multiplicar por cuatro ($\times 4$) la concentración inicial de la sal en la draw solution.

El retroflujo inicial correspondiente a los tres experimentos de presiones osmóticas de 22,8 atm, 46,8 atm y 100 atm se muestra en la Figura 3.3 para las 1,5 primeras horas, tiempo en el que se alcanza el estado estacionario. El retroflujo de agua se ha calculado empleando las ecuaciones 4 y 5. El cálculo de la concentración del NaCl que pasa de la draw solution a la alimentación se lleva a cabo empleando la ecuación del calibrado que se muestra en el Anexo I, Figura A1.

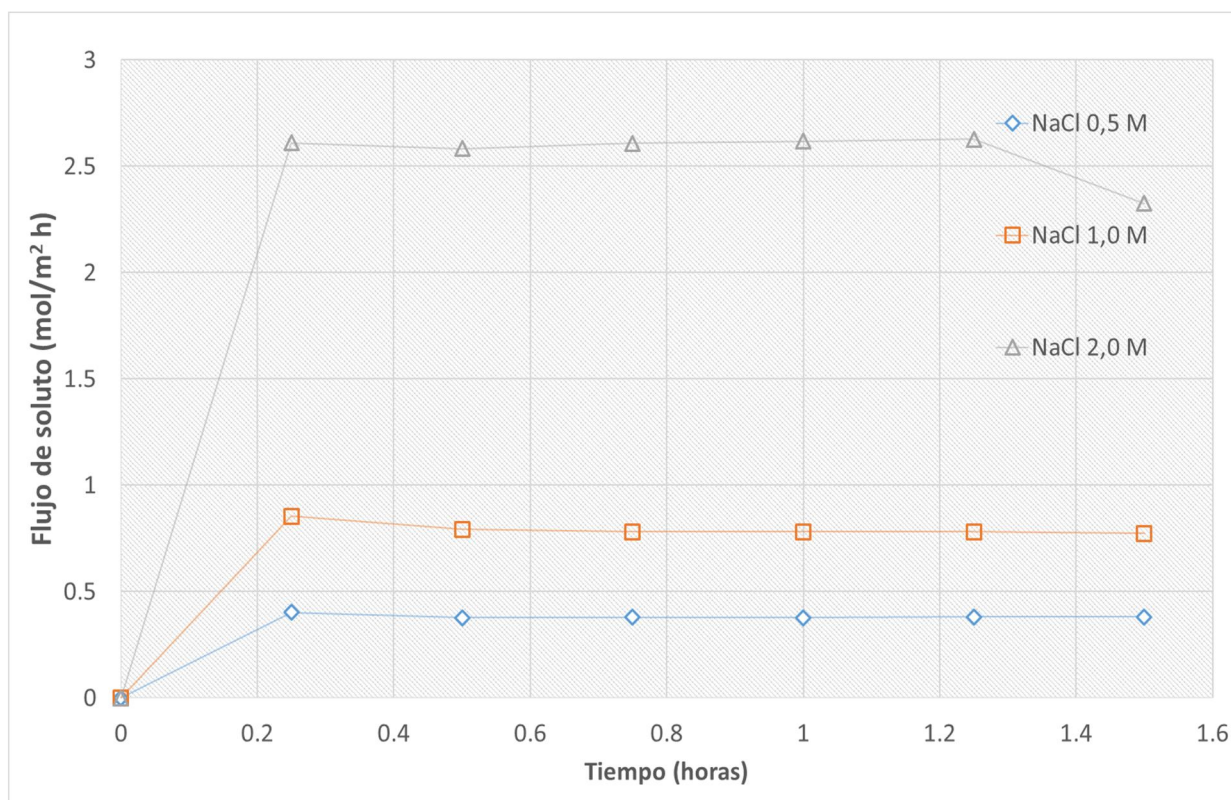


Figura 3.3. Retroflujo de sales con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial de NaCl 0,5, 1,0 y 2,0 M en la DS.

Como se observa en la Figura 3.6 el retroflujo de NaCl aumenta durante las primeras 0,25 horas y luego permanece constante con el tiempo. Este comportamiento puede ser debido al tiempo de estabilización que requiere el sistema. La cantidad de sal que a traviesa la membrana es considerablemente grande en la disolución de NaCl 2,0 M en comparación con el retroflujo de sal para la disolución de NaCl 0,5 M, siendo algo más de 6 veces mayor (x6) en la disolución más concentrada, lo que está en consonancia con los resultados observados en las Figuras 3.1 y 3.2, es decir con la concentración adimensional de NaCl y el flujo de agua en la draw solution.

Con el objetivo de evaluar la capacidad de concentración/dilución de la tecnología de ósmosis directa se ha calculado la relación entre el retroflujo de sales hacia la fase de alimentación y el flujo de agua hacia la DS. Los resultados obtenidos para los experimentos con concentración inicial de NaCl en la DS de 0,5, 1,0 y 2,0 M se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Relación J_s/J_w para los experimentos realizados con draw solution NaCl.

DS inicial NaCl (M)	J_s/J_w (mol L ⁻¹)
0,5	0,018
1,0	0,015
2,0	0,028

La finalidad de comparar el retroflujo de sales con el flujo de agua (Tabla 3.1) es medir la eficacia de la draw solution utilizada; esta relación debe ser lo más baja posible si nuestro objetivo es minimizar el retroflujo de sales y maximizar el flujo de agua.

MgSO₄ como draw solution

En una segunda etapa se ha llevado a cabo el estudio de la influencia de la concentración de la draw solution con otra sal también común en salmueras como es el caso del MgSO₄. En este caso la concentración estudiada han sido 1,0 M y 2,0 M con unas presiones osmóticas de 23.3 atm y 54.8 atm respectivamente (Tabla 2.2). Al igual que sucede con el resto de las variables de operación estudiadas en este TFG el análisis de los resultados se ha llevado a cabo a través de la evolución de la concentración adimensional de la sal en la fase de la draw solution (Figura 3.4) y el flujo de permeado de agua desde la fase de alimentación hasta la draw solution (Figura 3.5).

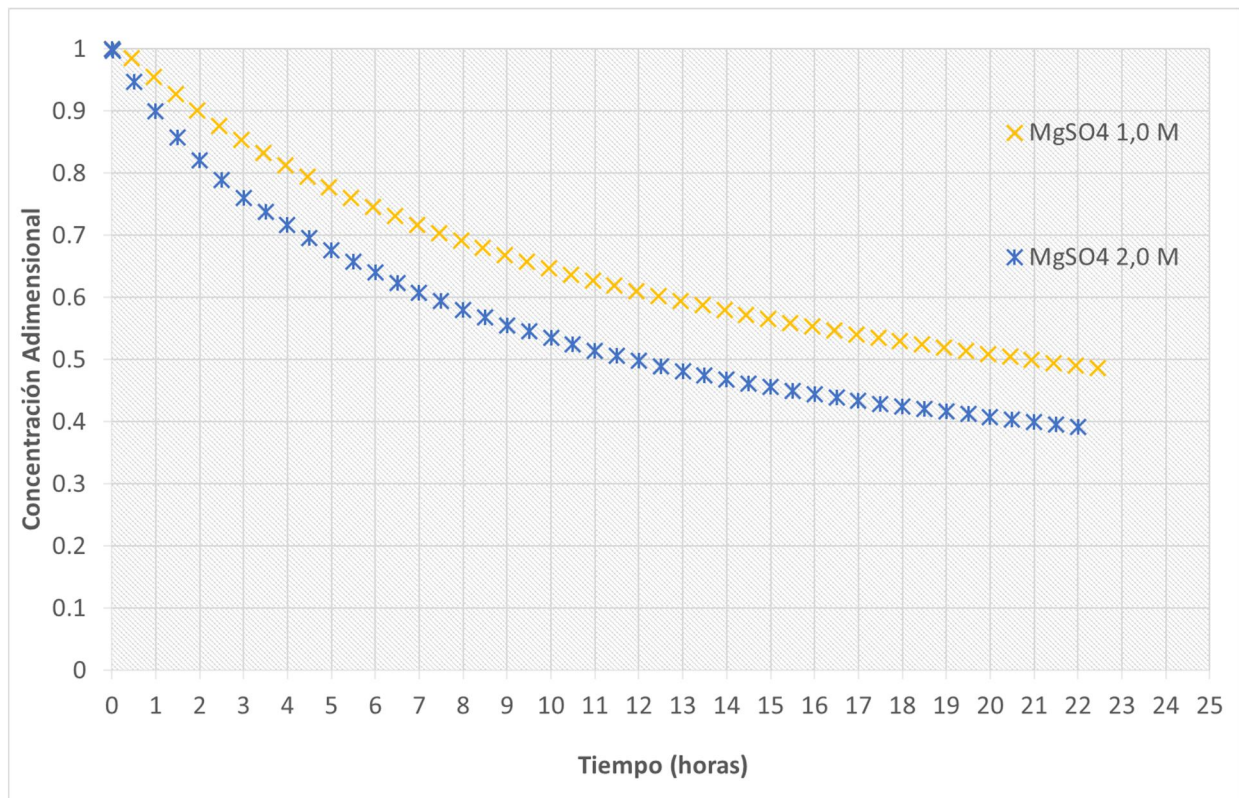


Figura 3.4. Evolución de la concentración adimensional de MgSO_4 con el tiempo en la draw solution para experimentos con concentración inicial de MgSO_4 1,0 y 2,0 M en la DS.

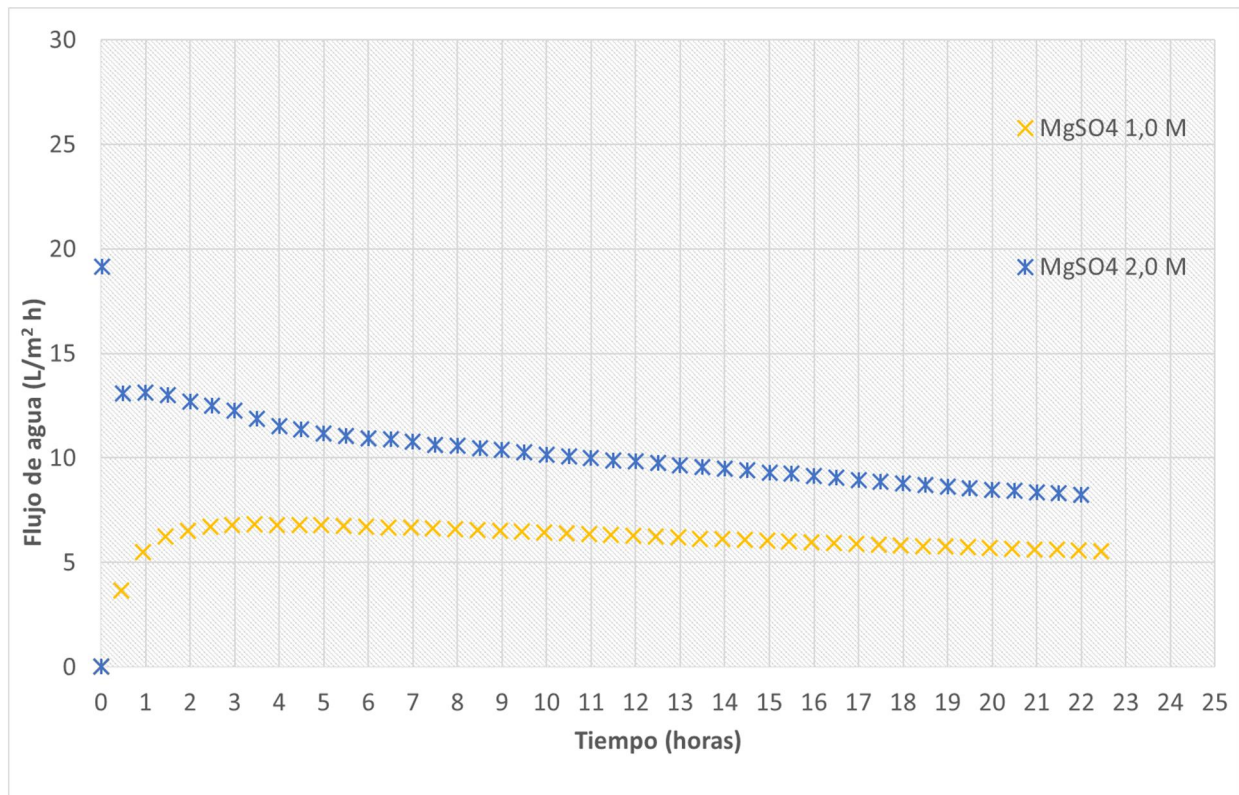


Figura 3.5. Flujo de agua con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial de MgSO_4 1,0 y 2,0 M en la DS.

En el caso de emplear MgSO_4 (Figura 3.4) y de igual forma que en el caso del NaCl , la evolución de la concentración adimensional de la sal disminuye asintóticamente con el tiempo tendiendo a alcanzar con el estado estacionario después de 20 horas de experimentación. Se observa como a medida que aumenta la concentración inicial del MgSO_4 de la draw solution disminuye la concentración de dicha sal con el tiempo en esta fase, lo que se debe al mayor flujo de agua procedente de la fase de alimentación tal y como se refleja en Figura 3.5. De esta forma tenemos un flujo de agua proporcional a la presión osmótica de cada disolución (Tabla 2.2). Al finalizar el experimento, entorno a las 22 horas, la concentración inicial de la draw solution 1,0 M se ha diluido un 50% alcanzándose un flujo final de $6,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Partiendo de una draw solution de 2,0 M la concentración final en dicha fase es 0,8 M, es decir se ha diluido un 60%, en términos generales este descenso mayor a medida que aumenta la concentración inicial lo que es indicativo de un mayor flujo de agua ($8,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$) desde la fase de alimentación hasta la draw solution (Figura 3.5). Los resultados obtenidos permiten concluir sistematizando que en el caso de una sal divalente como es el caso del MgSO_4 , el flujo de agua apenas aumenta ($\times 1,2$) siendo para ello necesario duplicar ($\times 2$) la concentración inicial de la sal en la draw solution.

El retroflujo inicial correspondiente a los dos experimentos de presiones osmóticas de 23,3 atm y 54,8 atm se muestra en la Figura 3.6 para las 2 primeras horas, tiempo en el que se alcanza el estado estacionario. El retroflujo de agua se ha calculado empleando las ecuaciones 4 y 5. El cálculo de la concentración del MgSO_4 que pasa de la draw solution a la alimentación se lleva a cabo empleando la ecuación del calibrado que se muestra en el Anexo I, Figura A2.

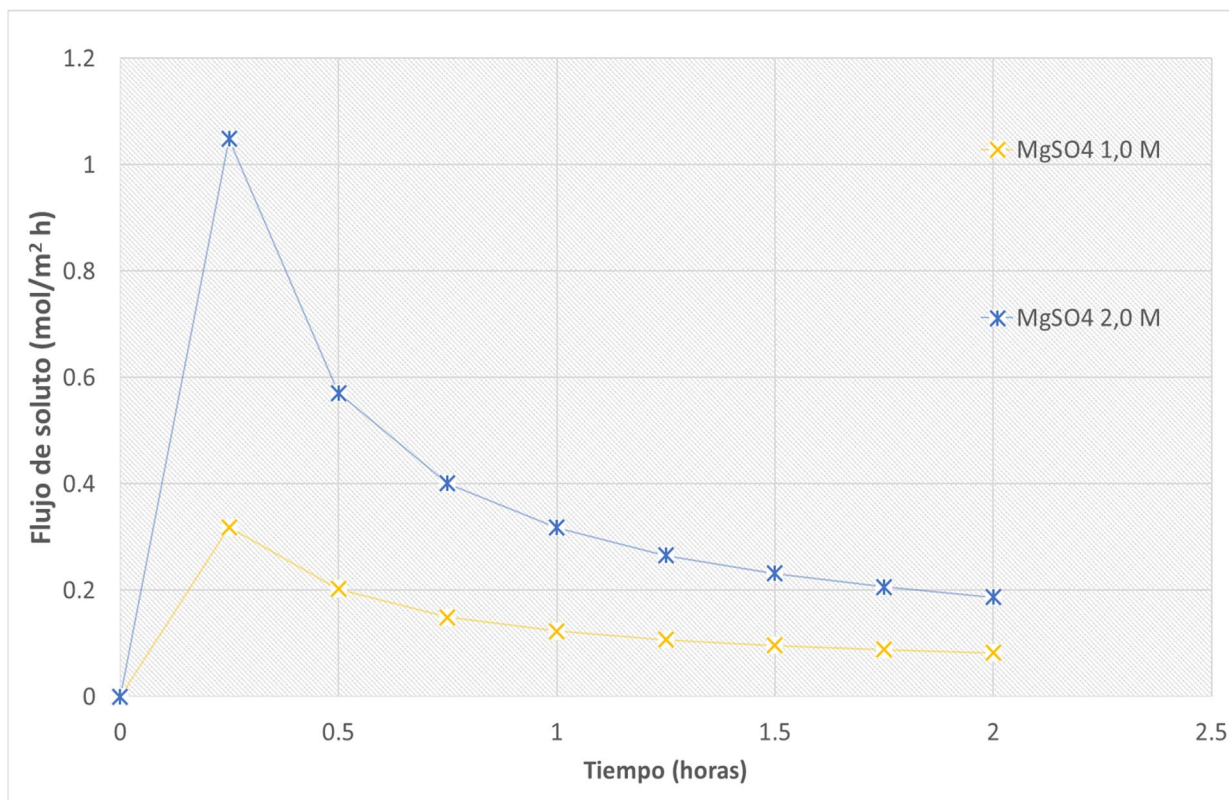


Figura 3.6. Retroflujo de sales con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial de MgSO_4 1,0 y 2,0 M en la DS.

Como se observa en la Figura 3.6 el retroflujo de MgSO_4 aumenta durante las primeras 0,5 horas y luego disminuye permaneciendo constante con el tiempo. Este comportamiento puede ser debido al tiempo de estabilización que requiere el sistema. El retroflujo de MgSO_4 cuando se parte de una disolución inicial de MgSO_4 de la draw solution de 2,0 M es de $0,2 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, la mitad que el retroflujo de MgSO_4 cuando se emplea una disolución inicial de MgSO_4 de la draw solution de 1,0M, lo que está en consonancia con los resultados observados en las Figuras 3.4 y 3.5, es decir con la concentración adimensional de MgSO_4 y el flujo de agua en la draw solution.

Al igual que en la Tabla 3.1, en la Tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos para los experimentos con concentración inicial de MgSO_4 en la DS de 1,0 y 2,0 M, con el fin de evaluar la capacidad de concentración/dilución de la tecnología de osmosis directa.

Tabla 3.2. Relación J_s/J_w para los experimentos realizados con draw solution MgSO_4 .

DS inicial MgSO_4 (M)	J_s/J_w (mol L^{-1})
1,0	0,0056
2,0	0.0076

En la Tabla 3.2 se compara el retroflujo de sales con el flujo de agua para medir la eficacia de la draw solution utilizada; esta relación debe ser lo más baja posible si nuestro objetivo es minimizar el retroflujo de sales y maximizar el flujo de agua.

3.2. Estudio de la influencia de la composición de la draw solution

El segundo estudio realizado en este TFG se centra en la influencia de la composición de la draw solution y se ha llevado a cabo comparando una de las sales más comunes encontradas en las salmueras como es el NaCl con otra sal común en las salmueras como es el MgSO₄. Los resultados obtenidos se han analizado a través de la evolución de la concentración adimensional de la sal en la fase de la draw solution (Figuras 3.7) y el flujo de permeado de agua desde la fase de alimentación hasta la draw solution (Figura 3.8) con el tiempo de experimentación.

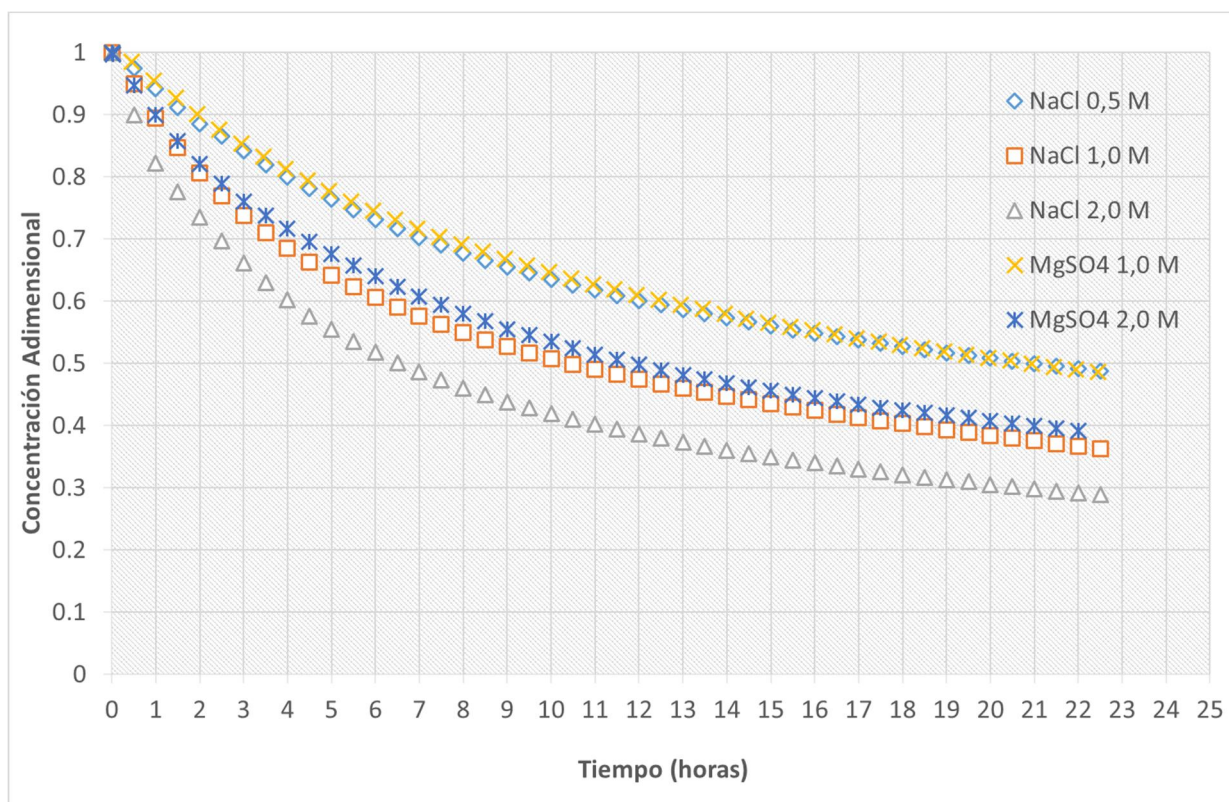


Figura 3.7. Evolución de la concentración adimensional con el tiempo en la draw solution para experimentos con concentración inicial de NaCl 0,5, 1,0 y 2,0 M y de MgSO₄ 1,0 y 2,0 M en la DS.

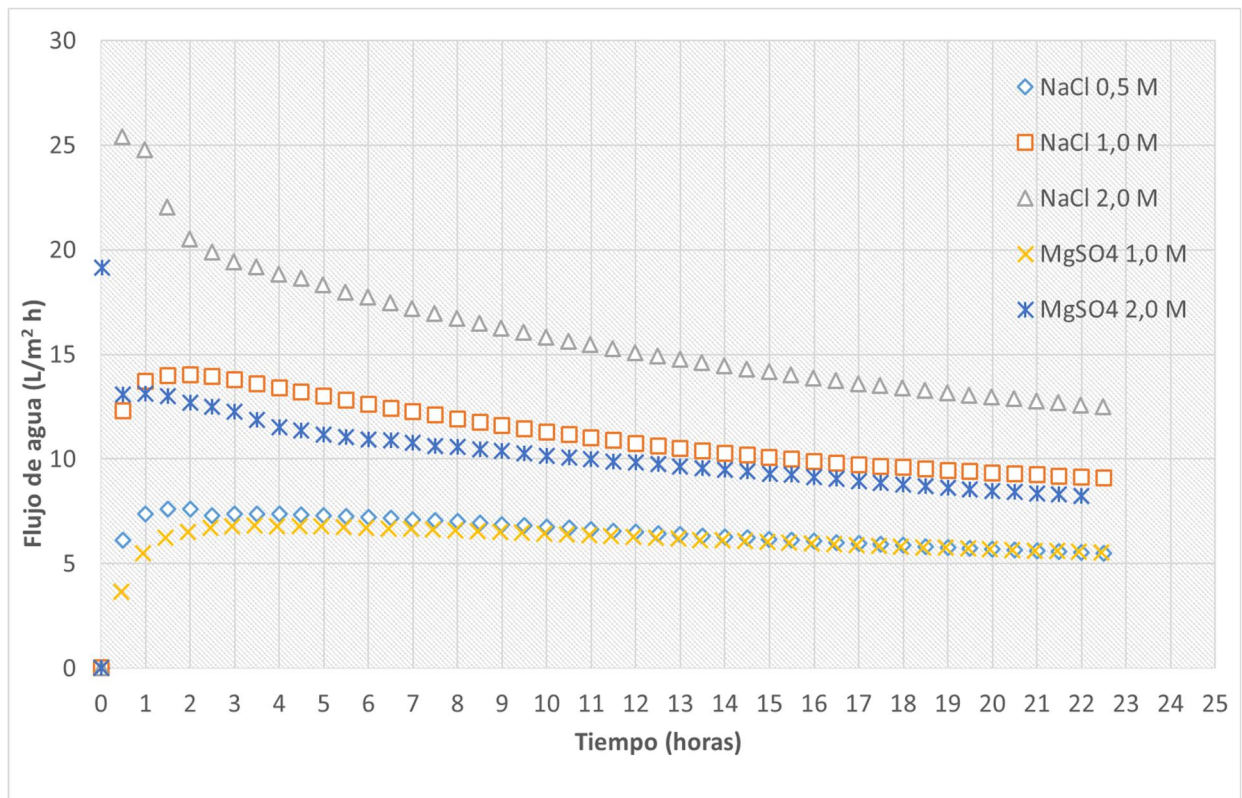


Figura 3.8. Flujo de agua con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial de NaCl 0,5, 1,0 y 2,0 M y de MgSO₄ 1,0 y 2,0 M en la DS.

Como se observa en la Figura 3.7 la evolución de la concentración adimensional disminuye asintóticamente con el tiempo tendiendo a alcanzar el estado estacionario después de 23 horas de experimentación. También podemos observar que el comportamiento de la disolución 1,0 M de MgSO₄ se asemeja a la disolución 0,5 M de NaCl. Esto se debe a que el flujo de agua a través de la membrana con el tiempo es prácticamente el mismo como se observa en la Figura 3.8. Analizando las presiones osmóticas de cada disolución era esperable que sus comportamientos fuesen similares (Tabla 2.2) (23.3 atm para el MgSO₄ 1,0 M y 22.8 atm para el NaCl 0,5 M).

El retroflujo inicial correspondiente a todos los experimentos, cuyas presiones osmóticas de se encuentran en la Tabla 2.2, se muestra en la Figura 3.9.

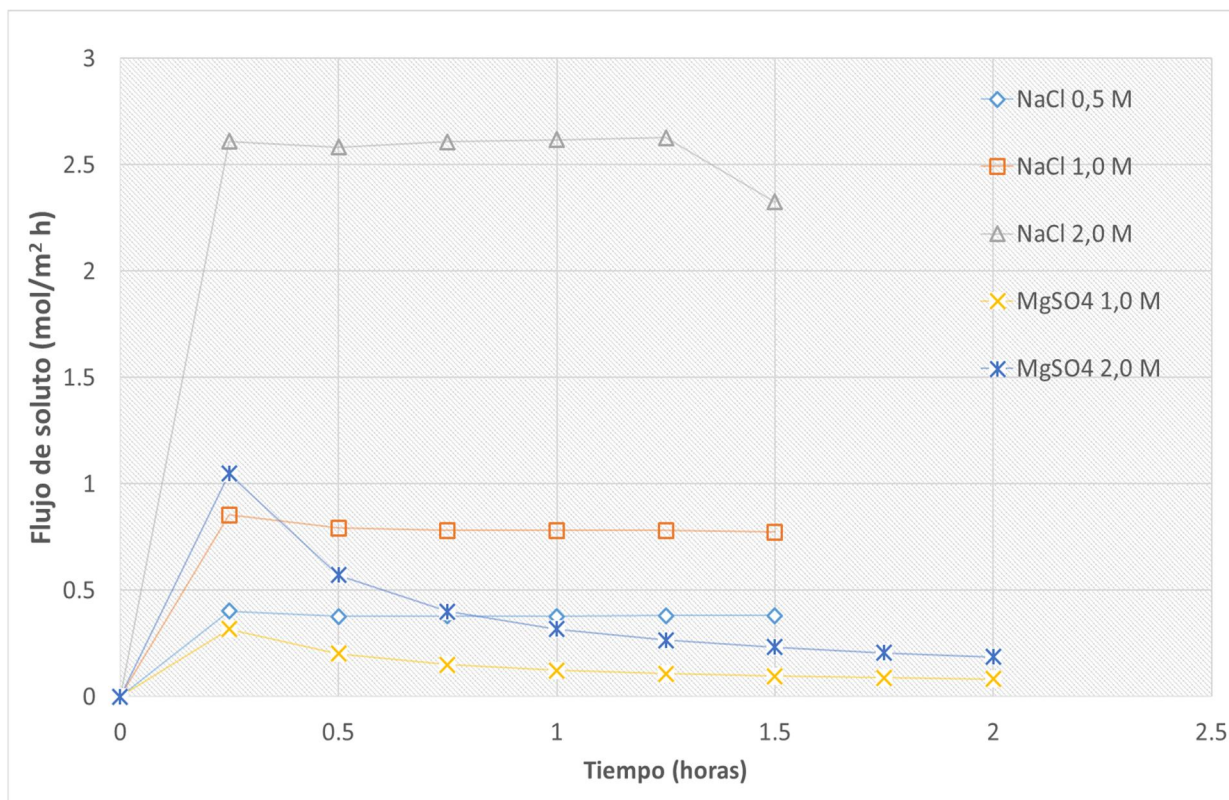


Figura 3.9. Retroflujo de sales con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial NaCl 0,5, 1,0 y 2,0 M y de MgSO₄ 1,0 y 2,0 M en la DS.

Como se observa en la Figura 3.9 el retroflujo del NaCl 2,0 M es considerablemente superior al resto de draw solutions. Este comportamiento se debe a la alta presión osmótica de dicha disolución (Tabla 2.2). Por otra parte, se observa que el retroflujo del MgSO₄ de las disoluciones 1,0 M y 2,0 M son inferiores si se comparan con el retroflujo de NaCl de las disoluciones 1,0 M y 2,0 M. Esto puede ser debido al mayor radio hidratado de la molécula de MgSO₄ [6]. El retroflujo de todas las draw solutions está en consonancia con los resultados observados en las Figuras 3.7 y 3.8, es decir con la concentración adimensional y el flujo de agua en las draw solutions.

3.3. Estudio de la influencia de mezclas de sales de la draw solution

El tercer estudio realizado en este TFG se centra en la influencia de mezclas de sales de la draw solution y se ha llevado a cabo realizando una disolución cuya composición se encuentra detallada en el apartado 2.1.4 de este documento (Tabla 2.2). Esta disolución mezcla se realiza con la finalidad de observar la influencia de esta composición en el retroflujo de sal a través de la membrana. Los resultados obtenidos se han analizado a través de la evolución de la concentración adimensional de la sal en la fase de la draw solution (Figuras 3.10) y el flujo de permeado de agua desde la fase de alimentación hasta la draw solution (Figura 3.11) con el tiempo de experimentación.

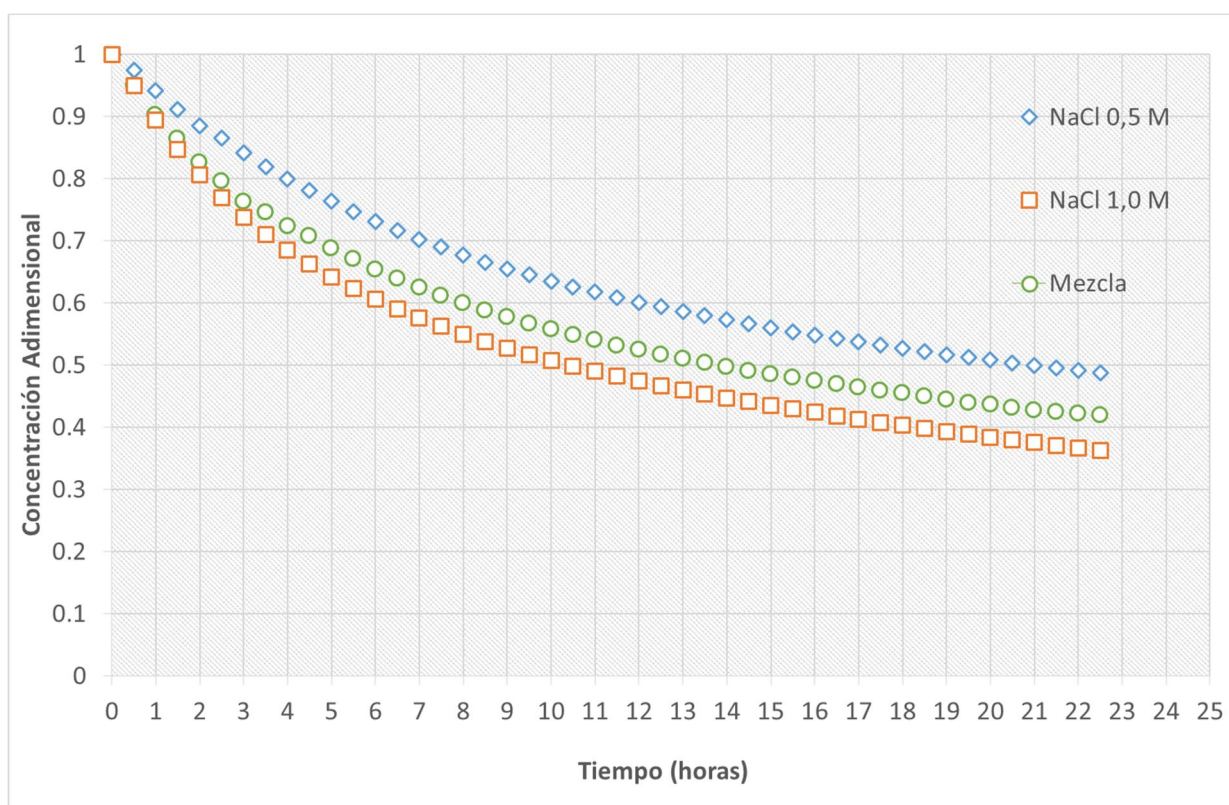


Figura 3.10. Evolución de la concentración adimensional con el tiempo en la draw solution para experimentos con concentración inicial de Mezcla de NaCl 0,76 M y de MgSO_4 0,18 M.

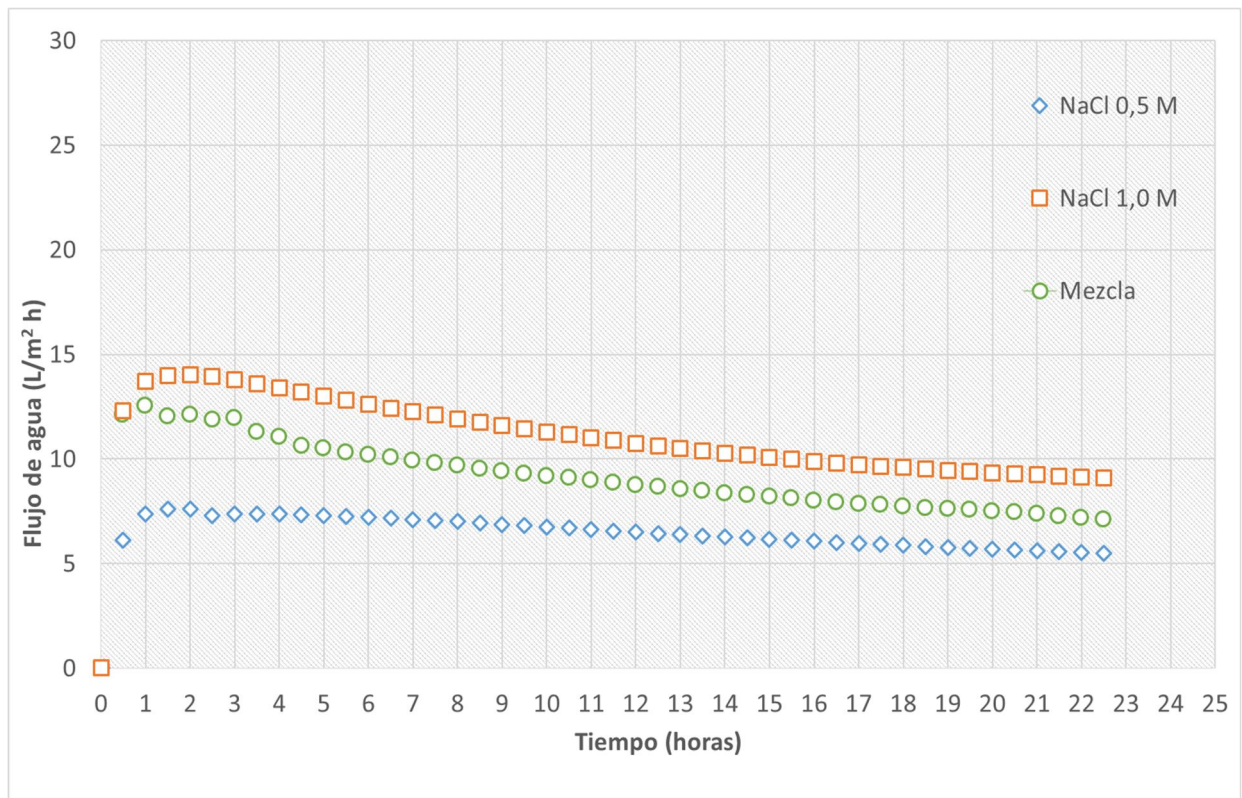


Figura 3.11. Flujo de agua con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial de Mezcla de NaCl con MgSO_4 1,0 M.

Como se observa en la Figura 3.10 la evolución de la concentración adimensional disminuye asintóticamente con el tiempo tendiendo a alcanzar el estado estacionario después de 23 horas de experimentación. En ella se representa la disolución mezcla junto con las disoluciones de NaCl 0,5 y 1,0 M ya que la disolución mezcla tiene una concentración en NaCl de 0,76M. La disminución de la concentración de las disoluciones se da acorde a sus presiones osmóticas (Tabla 2.2) ya que a mayor presión osmótica mayor flujo de agua (Figura 3.11) y más rápido cae la concentración.

La conductividad inicial correspondiente a los tres experimentos de NaCl 0,5 M, 1,0 M y mezcla se muestra en la Figura 3.12. No se ha podido cuantificar el retroflujo de sal debido a que no ha sido posible realizar un calibrado correcto para este tipo de disolución mezcla.

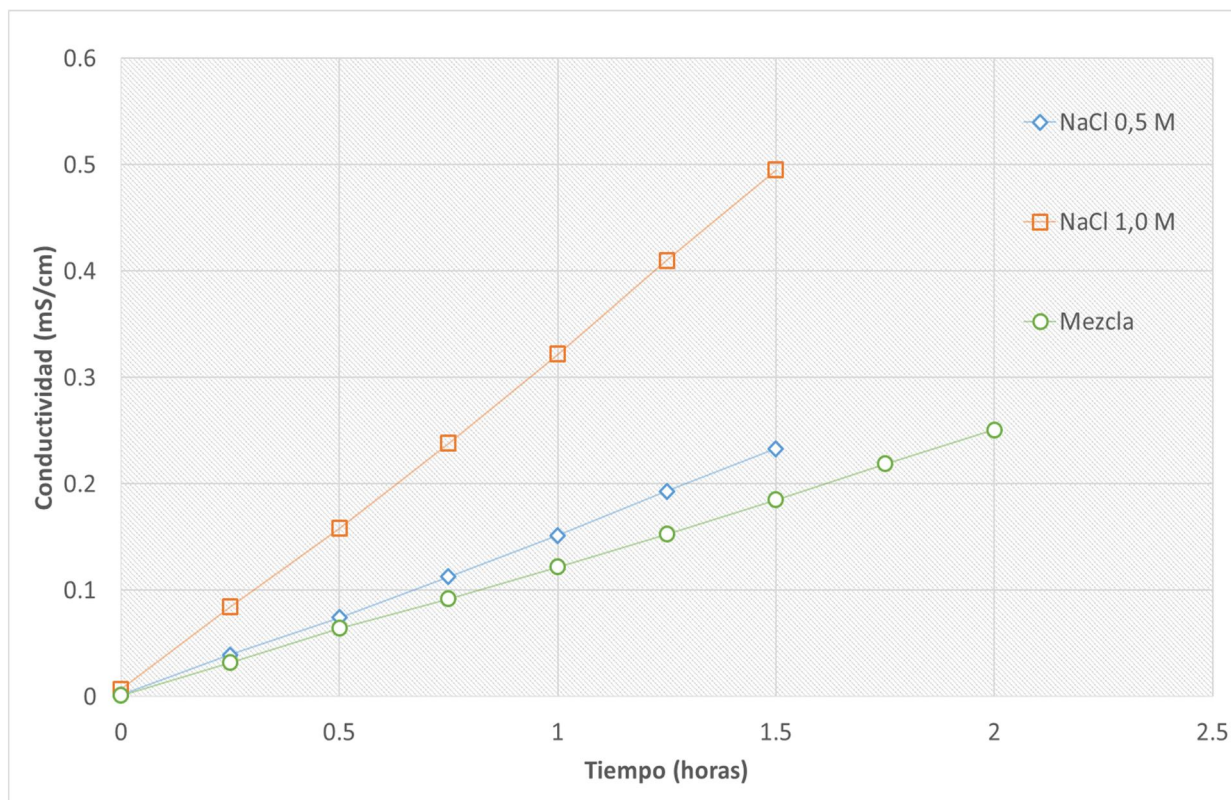


Figura 3.12. Conductividad de la fase de alimentación con el tiempo en la draw solution correspondiente a experimentos con concentración inicial de NaCl 0,5 y 1,0 M y con concentración inicial de Mezcla de NaCl con $MgSO_4$.

Como se observa en la Figura 3.12 la cantidad de sal que atraviesa la membrana para el caso de la mezcla es considerablemente inferior si se compara con la draw solution de NaCl 1,0 M e inferior a la draw solution de NaCl 0,5 M a pesar de que el flujo de agua de la mezcla se encuentre entre estas dos disoluciones (Figura 3.11). Esto puede ser debido a que al añadir una pequeña cantidad de $MgSO_4$ a una disolución de NaCl la molécula de $MgSO_4$ impide que la molécula de NaCl atraviese la membrana. Esto puede ser debido al mayor tamaño (Radio Hidratado) de la molécula de $MgSO_4$ y a unos valores menores del coeficiente de difusividad [6]

4. CONCLUSIONES

El presente TFG tiene como objetivo el comparar disoluciones osmóticas formuladas con sales monovalentes y divalentes y sus mezclas en procesos de ósmosis directa. La evaluación de las disoluciones osmóticas se ha realizado a través de la cuantificación del flujo de agua y del retroflujo de soluto. Tras la discusión de los resultados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- 1) Un aumento de la concentración de soluto en la draw solution provoca:
 - Un incremento del flujo de agua debido al mayor gradiente osmótico el cual es proporcional a la concentración. Así para una concentración inicial de la draw solution 0,5 M de NaCl se alcanza un flujo de $5,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, mientras que partiendo de una draw solution de concentración inicial 2,0 M de NaCl se alcanza un flujo de $12,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Para el caso de la draw solution de MgSO_4 1,0 M se alcanza un flujo de $5.533 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, mientras que para la draw solution de concentración inicial 2,0 M se alcanza un flujo de $8,252 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$.
 - Un aumento del retroflujo de soluto debido al mayor gradiente de concentración existente entre la draw solution y la fase de alimentación. Así para una concentración inicial de la draw solution 0,5 M de NaCl se alcanza un retroflujo de $0,098 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, mientras que partiendo de una draw solution de concentración inicial 2,0 M de NaCl se alcanza un retroflujo de $0,352 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Para el caso de la draw solution de MgSO_4 1,0 M se alcanza un retroflujo de soluto de $0,0313 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, mientras que para la draw solution de concentración inicial 2,0 M se alcanza un retroflujo de soluto de $0,0634 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$.
- 2) Al variar el tipo de sal, NaCl o MgSO_4 , para un mismo valor de concentración se observa:
 - Que al emplear MgSO_4 (sal divalente) los valores de flujo de agua son menores a los obtenidos cuando se utiliza NaCl (sal monovalente). Este comportamiento se asocia al menor gradiente osmótico generado por las sales divalentes. Así para una concentración inicial de draw solution 1,0 M de NaCl y de MgSO_4 con unas

presiones osmóticas de 46,8 atm y 23,3 atm, se alcanzan unos flujos de agua de 9 L h⁻¹ m⁻² y 5,53 L h⁻¹ m⁻² respectivamente.

- Un retroflujo de sal menor cuando se utiliza MgSO₄ (sal divalente) que cuando se utiliza NaCl (sal monovalente), para un mismo valor de concentración. Para la draw solution 1,0 M de NaCl se alcanza un retro flujo de 0,135 L h⁻¹ m⁻², mientras que partiendo de la draw solution 1,0 M de MgSO₄ se alcanza un retroflujo de 0,0313 L h⁻¹ m⁻². Esto se debe: i) al mayor tamaño de los iones divalentes cuando estos se encuentran disociados en fase acuosa (radio de hidratación), lo que conlleva un menor valor de la permeabilidad de la membrana hacia el soluto y ii) a los menores valores de los coeficientes de difusividad para las especies divalentes en comparación con los observados para los iones monovalentes.
- 3) Cuando se emplean disoluciones osmóticas mixtas conteniendo NaCl como electrolito mayoritario y MgSO₄ en menor concentración se observa:
- Que el flujo de agua obtenido con cada draw solution es proporcional al gradiente osmótico e independiente del tipo de sal empleado. En la draw solution con una concentración inicial de 0,76 M de NaCl y 0,018 M de MgSO₄ con una presión osmótica de 42,86 atm se alcanza un flujo de agua de 7,133 L h⁻¹ m⁻², mientras que para la draw solution de concentración 1,0 M de NaCl con una presión osmótica de 46,8 atm se alcanza un flujo de agua de 9,096 L h⁻¹ m⁻². Por otra parte, para la draw solution de MgSO₄ 2,0 M y de NaCl 1,0 M con unas presiones osmóticas de 54,8 atm y 46,8 atm se alcanza unos flujos de agua parecidos siendo estos de 8,252 L h⁻¹ m⁻² y de 9,096 L h⁻¹ m⁻². Esto se debe a que sus presiones osmóticas son parecidas; aunque la presión osmótica de la draw solution MgSO₄ 2,0 M es superior que la de NaCl 1,0 M, esto no se traduce en un mayor flujo de agua, debido a que el fenómeno de polarización de la concentración es mayor para la molécula de MgSO₄.
 - Un retroflujo de sal considerablemente más pequeño si se compara con una disolución cuya concentración en la sal mayoritaria es similar. Este efecto se

debe a que la presencia de iones divalentes entorpece la retro difusión de las especies monovalentes que son las que mayoritariamente hacen que aumente la conductividad de la alimentación

5. REFERENCIAS

- [1] Calleja, G. [et al.] 1999. *Introducción a la ingeniería química*. Madrid: Síntesis.
- [2] Baker, R. W. (2012). *Membrane technology and applications*. 3ª ed. Chichester (West Sussex): John Wiley and Sons.
- [3] Cath, T. Childress, A. E. Elimelech, M. (2006). Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments. *Journal Membrane Science*, volumen (281), pp. 70–87.
- [4] Shaffer, D. L. [et al.] (2015). Forward osmosis: Where are we now?. *Desalination*, volumen (356), pp. 271-284.
- [5] Chekli, L. [et al.] (2012). A review of draw solutes in forward osmosis process and their use in modern applications. *Desalination and Water Treatment*. volumen (43), pp.167-184.
- [6] Holloway, R. W. (2015). *Mixed draw solutions for improved forward osmosis performance*. *Journal of membrane science*, volumen (491), pp. 121–131.
- [7] Zhao, S.[et al.] (2012). Recent developments in forward osmosis: Opportunities and challenges. *Journal Membrane Science*, volumen (396), pp.1-21.
- [8] Jeffrey, R. McGinnis, R. L. Elimelech, M. (2006). Desalination by ammonia–carbon dioxide forward osmosis: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance. *Journal Membrane Science*, volumen (278), pp.114-123.
- [9] Tang, C. Y. [et al.] (2010). Coupled effects of internal concentration polarization and fouling on flux behaviour of forward osmosis membranes during humic acid filtration. *Journal of Membrane Science*, volumen (354), pp. 123–133.

ANEXO I

Rectas de calibrado de las disoluciones empleadas en el TFG

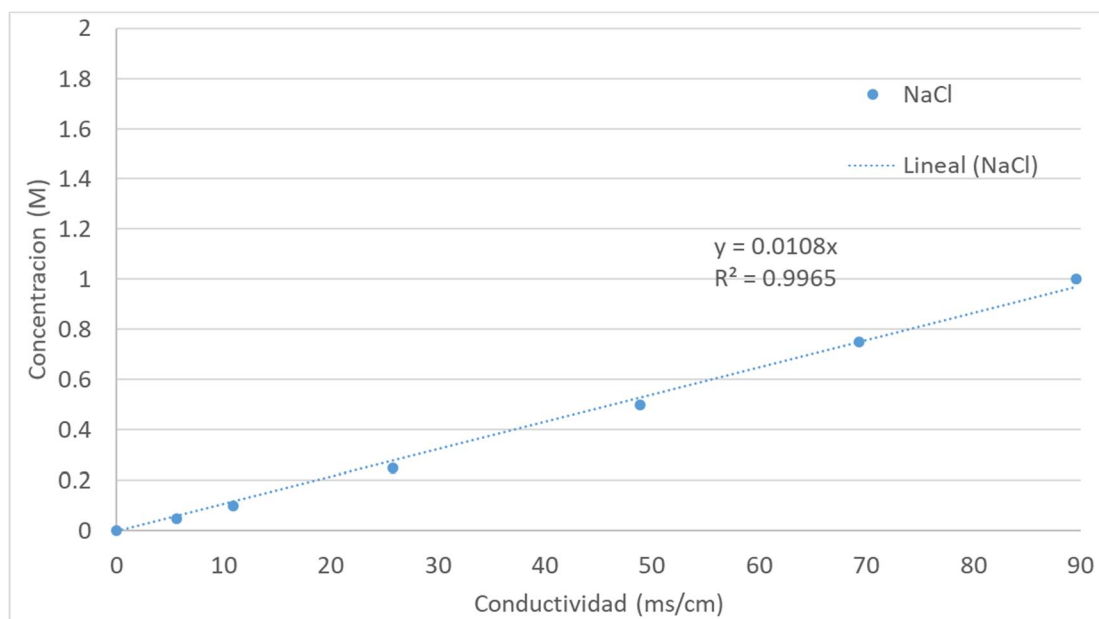


Figura A1. Recta de calibrado de la disolución de NaCl.

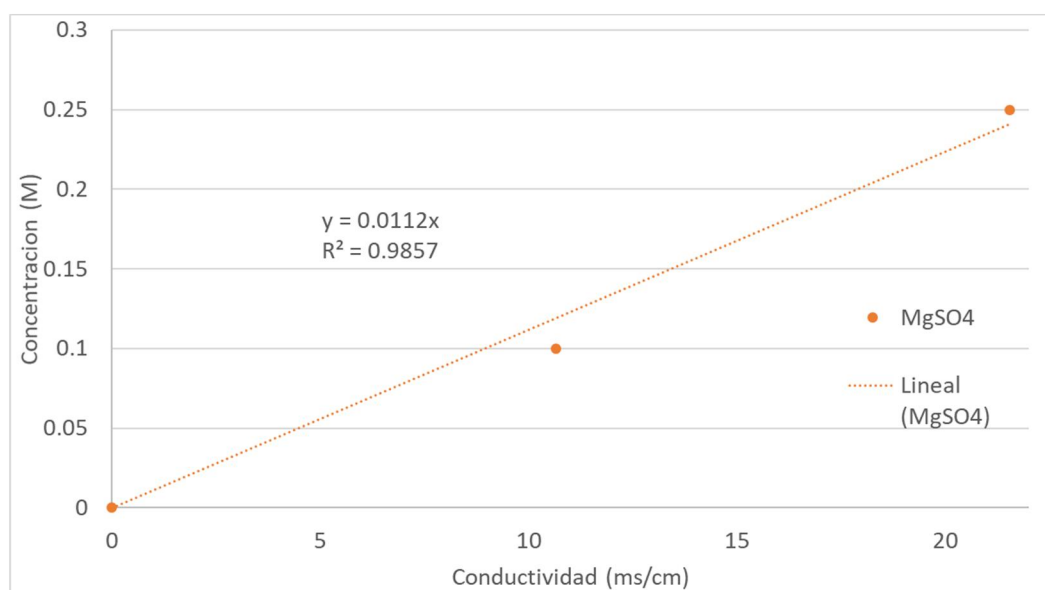


Figura A2. Recta de calibrado de la disolución de MgSO₄.

Tabla A.2 - Condiciones del ensayo NaCl

DRAW SOLUTION (DS)					
DS inicial NaCl (M)	Volumen inicial (L)	Volumen final (L)	Conductividad inicial ($\mu\text{S/cm}$)	Conductividad final ($\mu\text{S/cm}$)	Flujo agua J_w (L/h m^2)
0,5	0.5	1.022	47600	24200	5.495
1,0	0.5	1.131	91200	43400	9.096
2,0	0.5	1.689	156300	55000	12.485

FASE ALIMENTACIÓN					
Volumen inicial (L)	Volumen final (L)	Volumen Permeado (L)	Conductividad inicial ($\mu\text{S/cm}$)	Conductividad final ($\mu\text{S/cm}$)	Retroflujo J_s (L/h m^2)
1	0.478	0.522	0.9	1774	0.0980
1	0.369	0.631	1.56	3170	0.1352
2	0.811	1.189	1.11	3760	0.3524

Tabla A.3 - Condiciones del ensayo MgSO_4

DRAW SOLUTION (DS)					
DS inicial MgSO_4 (M)	Volumen inicial (L)	Volumen final (L)	Conductividad inicial ($\mu\text{S/cm}$)	Conductividad final ($\mu\text{S/cm}$)	Flujo agua J_w (L/h m^2)
1,0	0.5	1.032	52500	34500	5.536
2,0	0.5	1.268	57600	47100	8.252

FASE ALIMENTACIÓN					
Volumen inicial (L)	Volumen final (L)	Volumen Permeado (L)	Conductividad inicial ($\mu\text{S/cm}$)	Conductividad final ($\mu\text{S/cm}$)	Retroflujo J_s (L/h m^2)
1	0.468	0.532	0.83	575	0.0313
1	0.232	0.768	6.5	2280	0.0634

Tabla A.4 - Condiciones del ensayo Mezcla

DRAW SOLUTION (DS)					
DS inicial NaCl+MgSO ₄ (M)	Volumen inicial (L)	Volumen final (L)	Conductividad inicial (μs/cm)	Conductividad final (μs/cm)	Flujo agua J _w (L/h m ²)
0,76+0,018	0.5	1.1805	75300	35000	7.133

FASE ALIMENTACIÓN					
Volumen inicial (L)	Volumen final (L)	Volumen Permeado (L)	Conductividad inicial (μs/cm)	Conductividad final (μs/cm)	Retroflujo J _s (ms/cm h m ²)
1	0.3195	0.6805	1.18	5050	52.3913

Tabla A.5 - Datos NaCl 0.5M

Tiempo (h)	Masa agua (g)	Disolución DS (M)	Disolución DS Adimensional (M)	Flujo (L/ m ² h)
0	0	0.506708865	1	0
0.5	12.84	0.493872947	0.974668061	6.114285714
1	30.89	0.476890537	0.941152938	7.354761905
1.5	47.87	0.461947556	0.911662668	7.598412698
2	63.88	0.448691332	0.885501246	7.604761905
2.5	76.77	0.438558831	0.865504555	7.311428571
3	93.01	0.426426446	0.841561052	7.381746032
3.5	108.62	0.415381035	0.819762715	7.389115646
4	123.76	0.405201413	0.799673028	7.366666667
4.5	138.69	0.395640063	0.780803515	7.338095238
5	153.28	0.386722561	0.763204647	7.299047619
5.5	167.74	0.378272483	0.74652825	7.261471861
6	181.78	0.370413845	0.731019073	7.213492063
6.5	195.68	0.362948748	0.716286555	7.167765568
7	209.26	0.355940481	0.702455602	7.117687075
7.5	222.47	0.349378061	0.689504536	7.062539683
8	235.37	0.343199041	0.677310118	7.005059524
8.5	247.98	0.337366586	0.665799652	6.946218487
9	260.19	0.331904989	0.655021081	6.883333333
9.5	272.06	0.326762366	0.644872012	6.818546366
10	283.82	0.321822177	0.635122453	6.757619048
10.5	295.25	0.317161693	0.625924894	6.695011338
11	306.28	0.31279052	0.617298297	6.629437229
11.5	317.25	0.308561016	0.608951287	6.568322981
12	327.91	0.30455919	0.601053605	6.506150794
12.5	338.43	0.300710401	0.593457944	6.446285714
13	348.79	0.297014049	0.586163119	6.388095238
13.5	359.07	0.293434979	0.579099754	6.332804233
14	368.99	0.290062085	0.572443281	6.275340136
14.5	378.94	0.286755995	0.565918646	6.222331691
15	388.74	0.283572596	0.559636145	6.17047619
15.5	398.31	0.28053139	0.553634265	6.11843318
16	407.49	0.277674795	0.547996717	6.063839286
16.5	417	0.274776221	0.542276325	6.017316017
17	426.12	0.272052797	0.536901592	5.968067227
17.5	435.07	0.269432118	0.531729631	5.919319728
18	443.97	0.266875672	0.526684435	5.872619048
18.5	452.75	0.264400791	0.521800207	5.826898327
19	461.46	0.261990582	0.517043611	5.782706767
19.5	469.88	0.259702027	0.512527103	5.737240537
20	478.2	0.257479589	0.508141078	5.692857143
20.5	486.7	0.25524801	0.503737012	5.652729384
21	494.87	0.253139226	0.499575286	5.610770975
21.5	503.1	0.251049894	0.495451947	5.571428571
22	511.34	0.248992292	0.491391229	5.533982684
22.50	519.34	0.247026635	0.487511965	5.495593529

Tabla A.6 - Datos NaCl 1M

Tiempo (h)	Masa agua (g)	Disolución DS (M)	Disolución D Adimensional (M)	Flujo (L/m ² h)
0	0	1.02248422	1	0
0.5	25.84	0.971163385	0.9498077	12.3047619
1	57.63	0.914682011	0.894568339	13.72142857
1.5	88.11	0.866371509	0.847320175	13.98571429
2	117.83	0.823938851	0.805820603	14.02738095
2.5	146.29	0.787026515	0.769719962	13.93238095
3	173.5	0.754701023	0.738105301	13.76984127
3.5	199.7	0.725989333	0.710024975	13.58503401
4	224.98	0.700283397	0.684884307	13.39166667
4.5	249.13	0.677371034	0.662475783	13.18148148
5	272.99	0.65616013	0.641731302	12.99952381
5.5	295.72	0.637153478	0.623142602	12.8017316
6	317.81	0.619708145	0.606080888	12.61150794
6.5	339.1	0.603775401	0.590498503	12.42124542
7	359.98	0.588925667	0.575975311	12.24421769
7.5	380.77	0.574848329	0.562207531	12.08793651
8	400.47	0.56211629	0.549755467	11.91875
8.5	419.69	0.550226522	0.538127153	11.75602241
9	438.42	0.539114011	0.527259004	11.5984127
9.5	456.7	0.528692934	0.517067084	11.44611529
10	474.53	0.518909336	0.507498625	11.29833333
10.5	491.97	0.509683811	0.498475967	11.15578231
11	509.06	0.500956208	0.489940283	11.01861472
11.5	525.7	0.492740898	0.481905625	10.88405797
12	542.01	0.484945862	0.474282001	10.75416667
12.5	558.08	0.477503041	0.467002846	10.63009524
13	573.78	0.470448957	0.46010388	10.50879121
13.5	589.49	0.463595959	0.453401578	10.39664903
14	604.85	0.457085958	0.447034731	10.28656463
14.5	620.06	0.450817224	0.440903845	10.1816092
15	635.03	0.444813390	0.435032034	10.07982825
15.5	650.00	0.438966573	0.429313787	9.984645544
16	664.97	0.433271468	0.423743916	9.895411755
16.5	679.94	0.427722245	0.41831672	9.811586075
17	694.91	0.422313371	0.413026786	9.732691318
17.5	709.89	0.417039587	0.407868972	9.658304832
18	724.86	0.411895895	0.402838388	9.588050929
18.5	739.83	0.406877540	0.397930386	9.521594534
19	754.80	0.401979996	0.393140538	9.458635844
19.5	769.77	0.397198952	0.388464628	9.398905804
20	784.74	0.392530300	0.383898639	9.342162267
20.5	799.71	0.387970123	0.379438739	9.288186707
21	814.68	0.383514685	0.375081275	9.236781412
21.5	829.66	0.379160416	0.370822756	9.187767061
22	844.63	0.374903911	0.36665985	9.140980635
22.5	859.60	0.370741913	0.362589374	9.096273606

Tabla A.7 - Datos NaCl 2M

Tiempo (h)	Masa agua (g)	Disolución DS (M)	Disolución D Adimensional (M)	Flujo (L/m ² h)
0	0	2.088569649	1	0
0.5	53.35	1.879171821	0.899741037	25.4047619
1	104.05	1.715701652	0.821472079	24.77380952
1.5	138.74	1.619318601	0.775324204	22.02222222
2	172.42	1.535566573	0.73522402	20.52619048
2.5	208.96	1.453980138	0.696160714	19.90095238
3	244.72	1.38211434	0.661751616	19.42222222
3.5	281.98	1.314421346	0.629340442	19.18231293
4	316.34	1.257619892	0.6021441	18.8297619
4.5	352.33	1.203159983	0.576068882	18.64179894
5	385.02	1.157626683	0.554267694	18.33428571
5.5	415.61	1.118033086	0.535310415	17.99177489
6	446.57	1.080626047	0.517400053	17.72103175
6.5	476.48	1.046790447	0.501199683	17.45347985
7	505.4	1.016030397	0.486471877	17.19047619
7.5	533.59	0.987738248	0.472925693	16.93936508
8	561.2	0.961514991	0.460370087	16.70238095
8.5	587.98	0.937376886	0.448812845	16.47002801
9	614.25	0.914847705	0.43802595	16.25
9.5	639.92	0.893855206	0.427974813	16.03809524
10	665.03	0.874232313	0.418579439	15.83404762
10.5	689.69	0.855781932	0.40974546	15.63922902
11	713.81	0.838473722	0.401458348	15.4504329
11.5	737.45	0.822176106	0.393655106	15.26811594
12	760.66	0.806779773	0.386283394	15.09246032
12.5	783.46	0.792206716	0.379305865	14.92304762
13	805.84	0.778405206	0.372697748	14.75897436
13.5	827.88	0.765275428	0.366411256	14.6010582
14	849.54	0.752796533	0.360436403	14.44795918
14.5	871.17	0.740734541	0.354661163	14.30492611
15	892.26	0.729340138	0.349205562	14.16285714
15.5	913.01	0.718466447	0.343999276	14.02473118
16	930.52	0.709539732	0.339725195	13.84702381
16.5	952.18	0.698799588	0.334582851	13.73997114
17	971.85	0.689324075	0.330046008	13.61134454
17.5	993.67	0.679109037	0.325155083	13.51931973
18	1012.91	0.670349758	0.32096117	13.39828042
18.5	1031.69	0.662015111	0.316970569	13.27786358
19	1050.78	0.653752646	0.31301453	13.16766917
19.5	1069.6	0.645806478	0.309209931	13.05982906
20	1090.52	0.637197327	0.3050879	12.98238095
20.5	1108.34	0.630042913	0.301662391	12.87270616
21	1126.31	0.622989148	0.298285072	12.76995465
21.5	1146.16	0.615378778	0.294641253	12.69280177
22	1163.57	0.608855322	0.291517845	12.59274892
22.5	1179.85	0.602879178	0.288656487	12.48518519

Tabla A.8 - Datos $MgSO_4$ 1M

Tiempo (h)	Masa agua (g)	Disolución DS (M)	Disolución DS Adimensional (M)	Flujo (L/m ² h)
0	0	1.009833364	1	0
0.5	7.71	0.994341363	0.984658853	3.671428571
1	23.15	0.964703652	0.955309743	5.511904762
1.5	39.27	0.935588974	0.926478573	6.233333333
2	54.83	0.909105384	0.90025287	6.527380952
2.5	70.42	0.884032937	0.875424568	6.706666667
3	85.43	0.861166208	0.852780506	6.78015873
3.5	100.07	0.839974684	0.831795337	6.807482993
4	114.21	0.820474065	0.812484608	6.798214286
4.5	128.38	0.801819746	0.794011938	6.792592593
5	142.46	0.784105533	0.776470219	6.783809524
5.5	156.29	0.767451645	0.7599785	6.765800866
6	168.84	0.75293979	0.745607955	6.7
6.5	182.58	0.737668485	0.730485357	6.687912088
7	195.73	0.723622031	0.716575682	6.657482993
7.5	209.06	0.709918938	0.703006023	6.636825397
8	220.88	0.698195069	0.691396317	6.573809524
8.5	233.44	0.686154248	0.679472745	6.538935574
9	245.87	0.674640069	0.668070687	6.504497354
9.5	258.11	0.663673372	0.657210779	6.468922306
10	270.06	0.653305102	0.646943471	6.43
10.5	282.58	0.642784187	0.636525005	6.407709751
11	293.76	0.633671652	0.627501205	6.358441558
11.5	305.16	0.624642057	0.618559536	6.318012422
12	316.85	0.615646153	0.60965123	6.286706349
12.5	327.54	0.607643651	0.601726654	6.238857143
13	337.68	0.600242797	0.594397867	6.184615385
13.5	348.06	0.592851206	0.587078252	6.138624339
14	359.07	0.585207381	0.579508859	6.106632653
14.5	369.89	0.577885098	0.572257878	6.073727422
15	380.37	0.570965505	0.565405665	6.037619048
15.5	390.4	0.564496463	0.558999616	5.996927803
16	399.87	0.55852172	0.553083053	5.950446429
16.5	410.52	0.55195182	0.546577128	5.923809524
17	420.87	0.545713407	0.540399463	5.894537815
17.5	430.98	0.539754319	0.534498401	5.863673469
18	439.83	0.53464372	0.529437568	5.817857143
18.5	449.41	0.529219544	0.52406621	5.783912484
19	458.86	0.523975736	0.518873464	5.750125313
19.5	469.04	0.518441891	0.513393506	5.726984127
20	477.87	0.513735711	0.508733153	5.688928571
20.5	486.05	0.509451569	0.504490728	5.645180023
21	496.16	0.504254343	0.49934411	5.625396825
21.5	506	0.499296743	0.494434786	5.603543743
22	515.71	0.494499281	0.48968404	5.581277056
22.5	523.2	0.490861186	0.48608137	5.536507937

Tabla A.9 - Datos $MgSO_4$ 2M

Tiempo (h)	Masa agua (g)	Disolución DS (M)	Disolución DS Adimensional(M)	Flujo (L/m2 h)
0	0	2.040986729	1	0
0.5	27.47	1.932600738	0.946895298	13.08095238
1	55.09	1.834640685	0.898898881	13.11666667
1.5	81.83	1.748820428	0.856850465	12.98888889
2	106.76	1.675739158	0.821043633	12.70952381
2.5	131.05	1.610178961	0.788921818	12.48095238
3	154.26	1.552153818	0.760491872	12.24285714
3.5	174.73	1.504342417	0.737066241	11.88639456
4	193.28	1.463490476	0.717050462	11.5047619
4.5	215.11	1.418169026	0.694844805	11.38148148
5	234.55	1.380108937	0.676196919	11.16904762
5.5	255.52	1.341279312	0.657171991	11.06147186
6	275.67	1.305972344	0.639873021	10.93928571
6.5	297.07	1.270455101	0.622471025	10.88168498
7	317.19	1.238780309	0.606951673	10.78877551
7.5	334.84	1.21226667	0.593961074	10.62984127
8	354.93	1.18343598	0.579835216	10.56339286
8.5	373.74	1.157658166	0.567205142	10.46890756
9	392.3	1.133300506	0.555270885	10.37830688
9.5	408.89	1.112379781	0.545020585	10.24786967
10	426.94	1.090478003	0.53428961	10.1652381
10.5	444.28	1.070234891	0.524371313	10.07437642
11	462.41	1.049857921	0.514387431	10.00887446
11.5	477.45	1.0335336	0.506389182	9.885093168
12	494.85	1.015269951	0.497440741	9.818452381
12.5	511.55	0.99833797	0.489144763	9.743809524
13	527.49	0.982695085	0.481480389	9.660989011
13.5	542.93	0.968003282	0.474282007	9.575485009
14	557.98	0.954099304	0.467469627	9.489267503
14.5	573.06	0.940562542	0.460837167	9.409671955
15	586.01	0.929240681	0.455289918	9.30157378
15.5	601.69	0.915891626	0.448749427	9.242384289
16	614.07	0.905619913	0.443716708	9.137787786
16.5	627.03	0.895110947	0.438567745	9.047899627
17	639.37	0.88532892	0.433774952	8.954761905
17.5	652.44	0.875198695	0.428811556	8.876593796
18	664.55	0.866017282	0.424313039	8.790208264
18.5	676.45	0.857180825	0.419983537	8.705789488
19	687.18	0.849366358	0.416154768	8.611152301
19.5	699.36	0.840666776	0.411892328	8.5390725
20	711.36	0.832268296	0.407777417	8.468453811
20.5	724.35	0.823364062	0.403414706	8.412777992
21	737.79	0.814349714	0.398998045	8.36485534
21.5	750.45	0.80603721	0.394925258	8.310631229
22	762.48	0.798294093	0.391131447	8.251948052

Tabla A.10 - Datos Mezcla

Tiempo (h)	Masa agua (g)	Disolución DS (M)	Disolución DS Adimensional(M)	Flujo (L/m2 h)
0	0	1.019835459	1	0
0.5	25.47	0.969468576	0.950612736	12.12857143
1	52.8	0.920678269	0.902771384	12.57142857
1.5	75.99	0.882972475	0.865798955	12.06190476
2	102.12	0.844023725	0.827607745	12.15714286
2.5	125.23	0.812332381	0.796532787	11.92666667
3	151.3	0.779322475	0.764164913	12.00793651
3.5	166.41	0.761389964	0.746581184	11.32040816
4	186.35	0.738951129	0.724578776	11.0922619
4.5	201.8	0.722454063	0.708402572	10.67724868
5	221.51	0.702447923	0.688785546	10.54809524
5.5	239.22	0.685393963	0.672063279	10.35584416
6	257.93	0.668254075	0.655256756	10.23531746
6.5	275.56	0.652869947	0.640171844	10.09377289
7	292.83	0.638471592	0.626053532	9.960204082
7.5	309.66	0.625038234	0.612881449	9.83047619
8	325.93	0.612578517	0.600664069	9.700297619
8.5	341.86	0.60085125	0.589164894	9.575910364
9	357.38	0.589849739	0.578377358	9.454497354
9.5	372.57	0.579465397	0.568194989	9.337593985
10	387.37	0.569693414	0.558613067	9.223095238
10.5	401.92	0.56040254	0.549502897	9.1138322
11	416.02	0.551683642	0.540953579	9.004761905
11.5	429.77	0.543438549	0.532868851	8.897929607
12	443.1	0.535677221	0.525258478	8.791666667
12.5	456.31	0.528201418	0.517928076	8.691619048
13	469.1	0.521159466	0.511023089	8.591575092
13.5	481.74	0.514382179	0.504377617	8.496296296
14	494.28	0.507830471	0.497953338	8.406122449
14.5	506.3	0.501705217	0.491947218	8.3136289
15	518.34	0.495716132	0.486074619	8.227619048
15.5	529.81	0.490142084	0.480608984	8.138402458
16	541.17	0.484743687	0.475315584	8.053125
16.5	552.83	0.479325012	0.470002301	7.977344877
17	563.96	0.474264458	0.465040172	7.89859944
17.5	575.08	0.469314047	0.460186046	7.824217687
18	586.16	0.464483175	0.455449132	7.753439153
18.5	597.58	0.459607047	0.450667843	7.690862291
19	610.65	0.454150544	0.445317468	7.652255639
19.5	621.99	0.449520188	0.44077717	7.594505495
20	630.87	0.445959696	0.437285928	7.510357143
20.5	643.39	0.441034485	0.432456512	7.472590012
21	653.02	0.437319561	0.428813841	7.403854875
21.5	660.35	0.434533577	0.426082044	7.312846069
22	668.05	0.43164494	0.42324959	7.229978355
22.5	674.13	0.429391036	0.421039523	7.133650794

