

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales



MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES

Proyecto: ZERODESOL
(Grant Agreement PID2022-139571OB-I00).



Análisis experimental de los mecanismos de transporte en desalación mediante ósmosis inversa a contracorriente

Autor: Alfonso Martínez García

Tutores: Rafael González Almenara

Lourdes García Rodríguez

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

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis experimental de los mecanismos de transporte en desalación mediante ósmosis inversa a contracorriente

Autor:

Alfonso Martínez García

Tutores:

Rafael González Almenara
Lourdes García Rodríguez

Profesores Titulares

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

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Análisis experimental de los mecanismos de transporte en desalación mediante ósmosis inversa a contracorriente.

Autor: Alfonso Martínez García
Tutores: Rafael González Almenara
 Lourdes García Rodríguez

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

A todas las personas que me han acompañado durante estos años de aprendizaje y formación. Amigos, familiares, pareja y profesores, sin ellos no hubiera sido posible estar hoy entregando este proyecto.

Alfonso Martínez García
Sevilla, 2024

Resumen

En el siguiente proyecto se llevará a cabo la experimentación sobre una unidad de desalación mediante ósmosis inversa para evaluar los mecanismos de transporte propios del proceso. Esta unidad a contracorriente cuenta con una membrana experimental del fabricante TORAY, modelo FO4040.

Mediante ensayos experimentales, se obtendrán los valores del caudal de agua y sales transferidos a través de la membrana. Estos ensayos se realizarán manteniendo constante la presión a ambos lados de la membrana (se irá corrigiendo manualmente) mientras varía el caudal de entrada de las corrientes (manualmente con los variadores de frecuencia del cuadro de control). El objetivo de este método es comprobar cómo afecta el caudal sobre las ecuaciones de transporte en la membrana. Una vez obtenidos los caudales transferidos, mediante las ecuaciones de transporte se averiguarán mediante cálculo teórico las permeabilidades al agua y sales de la membrana.

Abstract

In the next project, experimentation will be carried out on a desalination unit using reverse osmosis to evaluate the transport mechanisms of the process. This countercurrent unit has an experimental membrane from the manufacturer TORAY, model FO4040.

Through experimental tests, the values of the flow rate of water and salts transferred through the membrane will be obtained. These tests will be carried out keeping the pressure constant on both sides of the membrane (it will be corrected manually) while the inlet flow of the currents varies (manually with the frequency converters in the control panel). The objective of this method is to verify how the flow rate affects the transport equations in the membrane. Once the transferred flow rates have been obtained, the permeability of the membrane to water and salts will be determined by theoretical calculation using the transport equations.

... -translation by google-

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice de Figuras</i>	VIII
<i>Índice de Tablas</i>	XI
1 Introducción	1
1.1 Proyecto SOLMIDIFF	1
1.2 Proyecto ZERODESOL	2
1.2.1 Datos del proyecto	2
1.2.2 Resumen del proyecto	2
2 Principios fundamentales del proceso de ósmosis	5
2.1 La desalación de agua mediante ósmosis inversa	5
2.2 CCRO: Ósmosis inversa a contracorriente	6
2.3 Ecuaciones de transporte	7
3 Instalación experimental	9
3.1 Componentes e instrumentación	9
3.1.1 Componentes	9
Válvulas	11
Bombas	12
Módulo de membranas	13
3.1.2 Instrumentación	14
Manómetros	14
Presostato	15
Transmisor de presión	15
Transmisor de caudal	16
Analizador de conductividad	17
3.2 Gestión de datos	19
4 Teoría de cálculo	21
4.1 Hipótesis previas al cálculo	21
4.2 Cálculo teórico y experimental	21
4.2.1 Datos de partida	21
4.2.2 Cálculo teórico	22

4.2.3	Cálculo experimental	24
5	Ensayos e interpretación	27
5.1	Ensayo 1	28
5.1.1	Resultados Ensayo 1 para CPF=1	29
5.1.2	Resultados Ensayo 1 para CPF=1,2	31
5.2	Ensayo 2	32
5.2.1	Resultados Ensayo 2 para CPF=1	34
5.2.2	Resultados Ensayo 2 para CPF=1,2	35
6	Conclusiones	37
	Posibles futuros avances	38
	<i>Bibliografía</i>	39

Índice de Figuras

1.1	Diagrama conceptual de la tecnología SOLMIDIFF [5]	2
2.1	Ósmosis directa vs. ósmosis inversa[6]	5
2.2	RO frente a otros métodos de filtración [4]	6
2.3	Desalación por membrana vs. desalación térmica [1]	6
2.4	Diagrama conceptual de un proceso de ccRO [3]	7
3.1	Instalación experimental de desalación [3]	10
3.2	Válvula de esfera	11
3.3	Válvula de aguja	12
3.4	Bombas de circulación	12
3.5	Bomba del proceso. Bomba alternativas	13
3.6	Membranas FO-4040 TORAY	13
3.7	Manómetros	15
3.8	Transmisor de presión	16
3.9	Transmisor de caudal	17
3.10	Analizador de conductividad	18
3.11	Registrados de datos Multicon CMC-99/141	19
4.1	Hoja de instrucciones para la obtención de resultados [2]	22
4.2	Aclaración de caudales	25
5.1	CPF frente a recuperación de permeado [8]	27
5.2	Caudal volumétrico de las corrientes respecto al tiempo en el Ensayo 1	28
5.3	Presiones de las corrientes respecto al tiempo en el Ensayo 1	29
5.4	$f \cdot L_w$, NDP y $q_{v,w}$ frente al tiempo en el Ensayo 1. CPF=1	30
5.5	L_s y q_s frente al tiempo en el Ensayo 1. CPF=1	30
5.6	$f \cdot L_w$ y L_s frente al tiempo en el Ensayo 1. CPF=1,2	31
5.7	Valores de permeabilidades en membranas comerciales [7]	32
5.8	Caudal volumétrico de las corrientes respecto al tiempo en el Ensayo 2	33
5.9	Presiones de las corrientes respecto al tiempo en el Ensayo 2	33
5.10	$f \cdot L_w$, NDP y $q_{v,w}$ frente al tiempo en el Ensayo 2. CPF=1	34
5.11	L_s frente a q_s en el Ensayo 2. CPF=1	35
5.12	$f \cdot L_w$ y L_s frente al tiempo en el Ensayo 2. CPF=1,2	36

Índice de Tablas

3.1	Dispositivos de instrumentación	14
3.2	Características de los manómetros	14
3.3	Características del presostato	15
3.4	Características del transmisor de presión	16
3.5	Características del transmisor de caudal	17
3.6	Características del analizador de conductividad	18

1 Introducción

En el siguiente documento se seguirá un índice que facilite la comprensión del objeto de estudio de este trabajo.

En primer lugar, se presentarán los proyectos SOLMIDIFF y ZERODESOL, proyectos base de toda la experimentación que se lleva a cabo en la unidad desaladora.

Posteriormente, se aclararán los términos necesarios para comprender la desalación de agua por ósmosis inversa, en especial a contracorriente. Estos conceptos teóricos son básicos e imprescindibles de cara al entendimiento del comportamiento de las corrientes en este método de desalación. Además, se presentarán los mecanismos de transporte, término de vital importancia para la comprensión del proyecto.

En el siguiente capítulo de la presente memoria se detallarán las gráficas de cada uno de los ensayos realizados en el laboratorio. Estos ensayos, con su respectiva recopilación y desarrollo de datos, ayudarán a obtener los valores experimentales de caudal de agua y sales transferidos a través de la membrana. Con estos valores, se puede entrar en el cálculo teórico para obtener los valores de permeabilidad al agua y sales de la membrana, L_w y L_s , también objeto de estudio de este proyecto.

Por último, se sacarán unas conclusiones sobre el trabajo realizado y sus resultados, además de una introducción a futuros trabajos para avanzar en el estudio planteado.

1.1 Proyecto SOLMIDIFF

El proyecto SOLMIDIFF abarca el desarrollo conceptual y la demostración experimental de una tecnología innovadora para producir agua por desalación a pequeña escala en localizaciones remotas sin acceso a la red, mediante el uso de microturbinas de gas solares como generadores de energía eléctrica.

Las microturbinas de gas solares que se emplean producen electricidad solar a 0,10-0,15 €/kWh y energía térmica a 250°C. Esto permite su hibridación con combustibles líquidos o gaseosos, lo que las hacen muy útiles para su empleo en regiones con pocos recursos y accesos complicados a la red, debido a sus bajos costes de operación y mantenimiento.

Es así, entonces, como se conseguiría una fuente de agua potable para localidades necesitadas mediante una solución económica en cuanto a costes de electricidad, instalación, operación y mantenimiento.

SOLMIDIFF cuenta con un grupo de investigación con experiencia directa en el desarrollo de la microturbina de gas en Europa, y en el ámbito de los sistemas de producción de potencia y desalación en general, que presenta este desarrollo de la integración de una microturbina de gas solar y una unidad de desalación en cola, compuesta por un sistema de ósmosis inversa, concepto que será explicado en el siguiente apartado de la memoria, y una unidad de Vertido Cero. Esta unidad ZLD (Zero Liquid Discharge), consigue, mediante una unidad de borboteo específica para

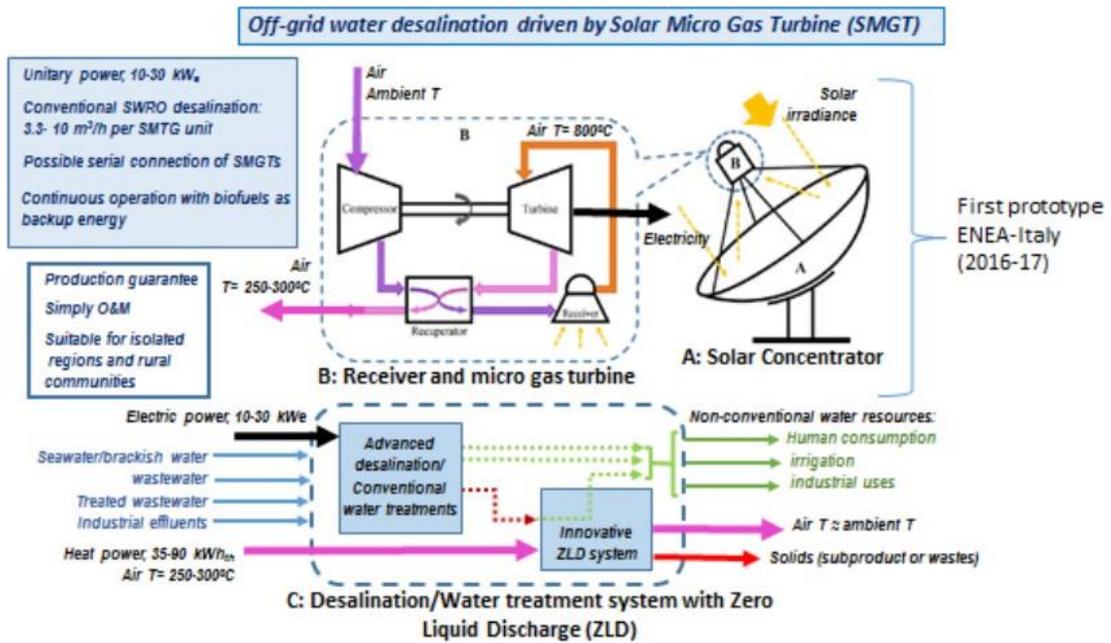


Figura 1.1 Diagrama conceptual de la tecnología SOLMIDEFF [5].

este proyecto, concentrar efluentes acuosos, ya sean salmueras o aguas industriales, hasta obtener residuos secos (Figura 1.1)

Relativo a este proyecto, cabe destacar la eficiencia de la unidad de ósmosis, que aprovecha una parte de la energía producida en la microturbina de gas. Su tecnología permite reducir hasta un 20 % el consumo específico de electricidad del proceso respecto a otros métodos más convencionales. La eficiencia del proceso y de la membrana utilizada será puesta a prueba durante la realización de este proyecto.

1.2 Proyecto ZERODESOL

1.2.1 Datos del proyecto

ZERODESOL “Development of a novel technology for ZERO-liquid discharge DEsalination and water reuse with zero-carbon emissions driven by advanced concentrated SOLar power” ERDF/-Ministry of Science and Innovation – Spanish Research Agency, National Programme of R+D+I (Grant Agreement PID2022-139571OB-I00). Funding: 200.000,00 €. (01/09/2023-31/08/2026). PI: Lourdes García Rodríguez (Universidad de Sevilla)

1.2.2 Resumen del proyecto

ZERODESOL es un Proyecto multidisciplinario que desarrolla conceptualmente en base una amplia fase experimental, una tecnología para la producción de recursos no convencionales de agua en lugares remotos, con operación autónoma gracias a su integración en plantas de concentración solar basadas en turbinas de gas. El objetivo de coste económico para la producción de agua es menor que 2.0 /m³. Este proyecto avanza sobre resultados obtenidos de dos proyectos en ejecución, SOLMIDEFF project (Grant Agreement RTI2018-102196-B-I00) y EERES4WATER (EAPA_-1058/2018). El proyecto ZERODESOL incluye tareas conceptuales y experimentales enfocadas en evaluar experimentalmente procesos innovadores de ósmosis inversa, concentración de salmuera hasta de descarga líquida nula (ZLD) y la precipitación selectiva de componentes de salmueras.

Para lograrlo se realizan inicialmente las correspondientes pruebas de concepto. Se desarrollarán:

- i) un proceso de desalación innovador basado en ósmosis inversa que reducirá en un 30 % el consumo energético respecto a la tecnología convencional, ii) un proceso de ZLD en tres etapas, evaporación, recuperación energética y precalentamiento, alimentado por gases de escape de turbinas de gas solares, y iii) un proceso de valorización de salmuera mediante energía solar. El proyecto ZERODESOL une a un equipo de investigación con experiencia técnica en los campos de la desalación solar y de la producción de potencia (y trabajo previo en el Desarrollo de una instalación piloto de microturbina de gas solar en Europa) así como experiencia en el campo de la comunicación que aporta su experiencia en difusión y en evaluación de impacto en proyectos internacionales. Además, a fin de acelerar una adecuada hoja de ruta para el futuro desarrollo del TRL de la tecnología hasta su comercialización, el proyecto se apoya en participantes del equipo de trabajo y en expertos externos con amplísima experiencia.

2 Principios fundamentales del proceso de ósmosis

La ósmosis directa es el proceso en el que una solución hipotónica (menor concentración de soluto) cede agua a una hipertónica (mayor concentración de soluto) para dar lugar a dos soluciones isotónicas.

Esto es un fenómeno natural que se da en los organismos, con el que se consigue depurar el agua utilizando la presión osmótica, que es la presión natural creada por el movimiento de las moléculas de agua desde una zona de alta concentración a otra de baja concentración. Las plantas aprovechan este principio para absorber agua y nutrientes del suelo, mientras que el cuerpo humano lo utiliza para mantener el equilibrio de líquidos y electrolitos.

En la ósmosis inversa ocurre lo contrario, y al no ser un proceso natural, hay que aplicar una presión para impulsar el proceso de purificación mayor que la presión osmótica, con el objetivo de invertir el proceso. Con este método, conseguiríamos que la solución hipertónica ceda agua a la hipotónica, resultando soluciones con mayor divergencia de concentración de soluto respecto al inicio, al contrario que en la ósmosis directa.

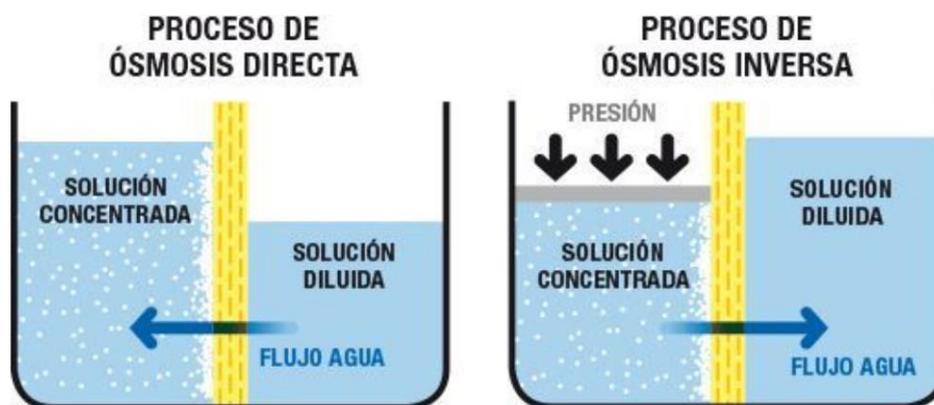


Figura 2.1 Ósmosis directa vs. ósmosis inversa[6].

2.1 La desalación de agua mediante ósmosis inversa

La ósmosis inversa (RO) es una técnica de desalación cuyo objetivo es separar solutos que se encuentran en solución con disolventes. Los solutos se definen como iones disueltos en agua, que sería el disolvente. La importancia de la RO recae sobre una membrana semipermeable encargada de la separación de estos componentes.

Hoy en día, la RO es la técnica de filtración más eficiente en cuanto a paso de partículas, por delante de otras tecnologías que podemos ver en la Figura 2.2.

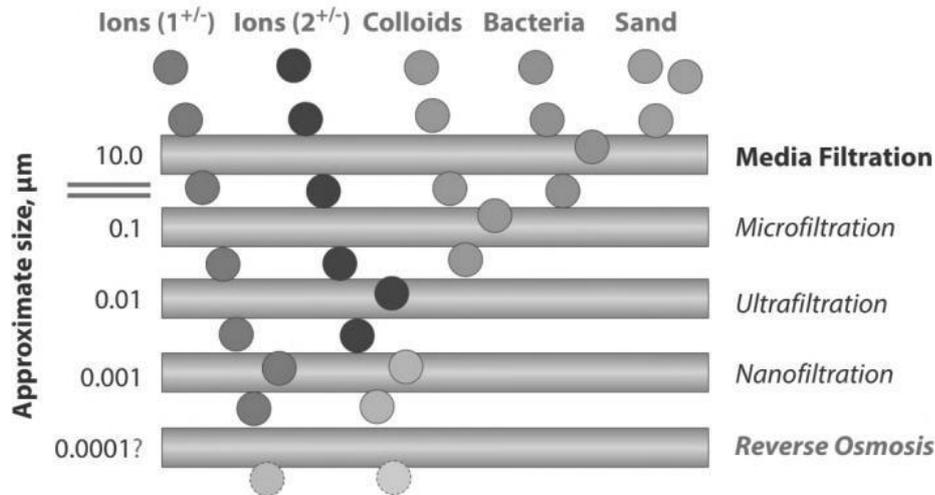


Figura 2.2 RO frente a otros métodos de filtración [4].

Además, desde el año 2000, las técnicas que emplean membranas para desalación han experimentado un auge importante, mientras que las técnicas convencionales (térmicas), que utilizan el calor para el mismo fin, han ido en decadencia. Esto se debe principalmente a los avances tecnológicos en cuanto a membranas, que han conseguido que esta técnica reduzca el consumo de energía con respecto a la solución térmica, además de la reducción de la emisión de contaminantes que esto conlleva. Si a este efecto le añadimos que pudiéramos conseguir un método renovable de obtención de energía, conseguimos llegar a cero emisiones de gases contaminantes. Podemos ver una comparativa de estas dos técnicas de desalación en la Figura 2.3.

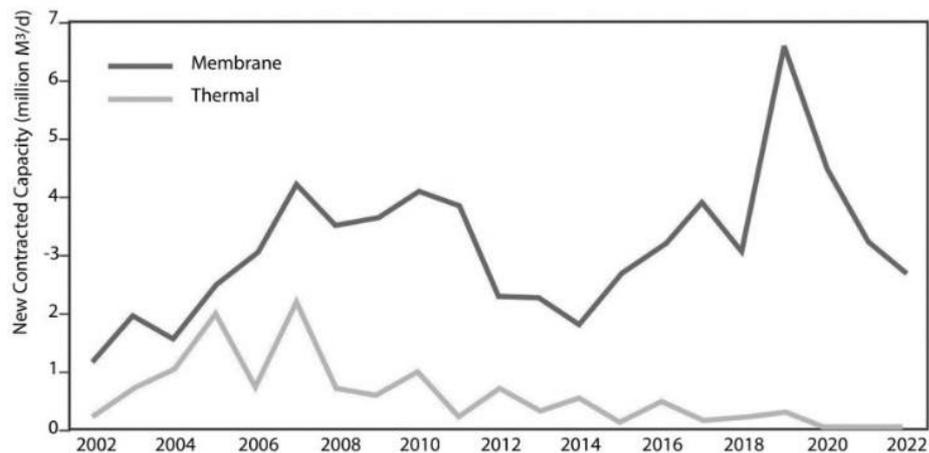


Figura 2.3 Desalación por membrana vs. desalación térmica [1].

2.2 CCRO: Ósmosis inversa a contracorriente

Existen varios métodos de desalación basados en la ósmosis inversa. En este proyecto se estudiarán los efectos experimentales de una membrana específica sobre una instalación de ósmosis inversa a contracorriente, por lo que el resto de configuraciones de la RO no serán tema de estudio.

El objetivo del proceso no es más que, como bien se comenta en la Sección 2.1, vencer la presión osmótica entre las corrientes con la presión aplicada, forzando así el paso de disolvente (agua), desde el lado de mayor concentración hacia el lado de menor concentración. Gracias a esto, en el canal de baja concentración, se obtiene como flujo de salida una corriente de solución más pobre en soluto que la corriente inicial. Mientras tanto, el canal de mayor concentración contendrá aún más soluto en su salida que en su entrada.

En la Figura 2.4 se pueden ver fácilmente las dos corrientes de entrada, S1 y S3, y como tras pasar por la membrana dan lugar a las corrientes de salida, S2 y S4, respectivamente.

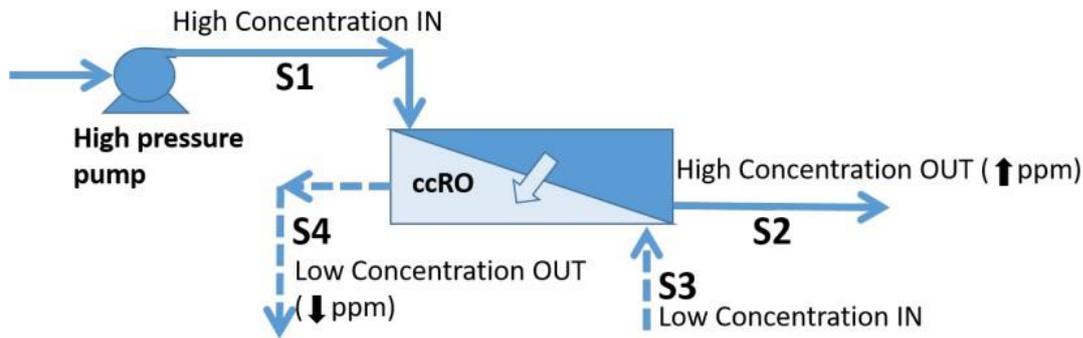


Figura 2.4 Diagrama conceptual de un proceso de ccRO [3].

La ecuación que permite el flujo de permeado (agua) desde la corriente de mayor concentración a la de menor concentración es la siguiente:

$$p_{S1-S2} - p_{S3-S4} > \Pi_{S1-S2} - \Pi_{S3-S4} \quad (2.1)$$

Siendo Π_{i-j} la presión osmótica de cada una de las corrientes.

Decir que ha de cumplirse esta desigualdad es lo mismo que decir que la NDP (Net Driving Pressure) ha de ser mayor que 0 para que ocurra el fenómeno de ósmosis inversa, ya que:

$$NDP = p_{S1-S2} - p_{S3-S4} - (\Pi_{S1-S2} - \Pi_{S3-S4}) > 0 \quad (2.2)$$

Tal y como vemos en la Figura 2.4, tenemos dos corrientes diferenciadas:

- **Corriente 1-2:** corriente de salmuera presurizada, la cual cede parte de agua pura (disolvente) para dar lugar a una corriente de mayor concentración (↑ ppm).
- **Corriente 2-3:** corriente de agua salobre (agua de mar normalmente), cuya composición de soluto disminuirá tras su paso por la membrana, resultando así una corriente con mayor porcentaje de agua pura. (↓ ppm).

2.3 Ecuaciones de transporte

Las ecuaciones de transporte de agua y sales a través de la membrana juegan un papel fundamental en este proyecto, por lo que su entendimiento es de vital importancia. Se podrá calcular el caudal volumétrico de agua que atraviesa la membrana y el caudal másico de sales que penetra, según las siguientes ecuaciones.

$$q_{Vw} = f \cdot Lw \cdot A \cdot NDP \quad (2.3)$$

Siendo:

- q_{vw} [L/h]: Caudal volumétrico de agua transferida.
- f : factor de ensuciamiento de la membrana
- L_w [$\text{Lm}^{-2}\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}$]: permeabilidad al agua de la membrana.
- A [m^2]: área efectiva de la membrana.
- NDP [bar]: Net Driving Pressure

Vista la ecuación referida al caudal de agua transferido (lo que nos interesa), pasamos a ver el caudal de sales transferido. Como la membrana no es ideal, además de agua permitirá el paso de sales, lo cual podemos calcular según la siguiente ecuación:

$$q_s = L_s \cdot A \cdot (C_{s1-s2} - C_{s3-s4}) \quad (2.4)$$

Siendo:

- q_s [mg/h]: Caudal másico de sales transferidas.
- L_s [$\text{Lm}^{-2}\text{h}^{-1}$]: permeabilidad a las sales de la membrana.
- A [m^2]: área efectiva de la membrana.
- C_{s1-sj} [mg/L]: Concentración de sales del canal i-j

Cabe destacar que tanto las concentraciones como las presiones osmóticas de ambas corrientes han de ser calculadas en la superficie de la membrana. En la práctica, se van a medir a cierta distancia de la membrana, es por eso que entra en juego el efecto de la polarización de la concentración. Debido a la transferencia de disolvente a través de la membrana, en la superficie de la membrana del canal de alta concentración hay una mayor concentración de sales. Para esto se define el CPF (Concentration Polarization Factor), que compara la salinidad en la superficie de la membrana y a cierta distancia de ella.

Más adelante en esta memoria se especificará este marco teórico con datos experimentales, y la comprensión de estas ecuaciones será más sencilla.

3 Instalación experimental

En este capítulo se va a presentar la instalación de desalación de agua de la que se hablaba en el Capítulo 1.

La instalación se trata de un modelo experimental de desalación basado en el proceso de ósmosis inversa a contracorriente. Como ya se ha comentado en el Sección 2.2, se tienen dos corrientes separadas, una que simularía el agua de mar y otra de salmuera con alta concentración. Durante el proceso, la corriente de salmuera cederá agua a la corriente de agua de mar disminuyendo así la concentración de sales de esta última. Para ello, la instalación cuenta con dos bombas alternativas que aumentarán la presión de los flujos lo necesario para vencer la presión osmótica, dentro de unas condiciones de operación.

La cesión de agua se llevará a cabo a través de una membrana semipermeable, concretamente el Modelo FO4040 del fabricante TORAY. Se plantea la posibilidad de repetir el contenido de este trabajo experimental con otros modelos de membranas para comparar eficiencia y consumo específico de energía.

3.1 Componentes e instrumentación

El objetivo de este capítulo es presentar los componentes más importantes de la instalación experimental, así como la instrumentación (sensores y medidores) con el fin de tener una visión general clave para la comprensión del funcionamiento de la misma.

3.1.1 Componentes

En primer lugar, se presenta un diagrama de flujo de proceso de la instalación completa. Con este, se puede seguir fácilmente el proceso y visualizar todos los componentes y su posición mientras se van explicando.

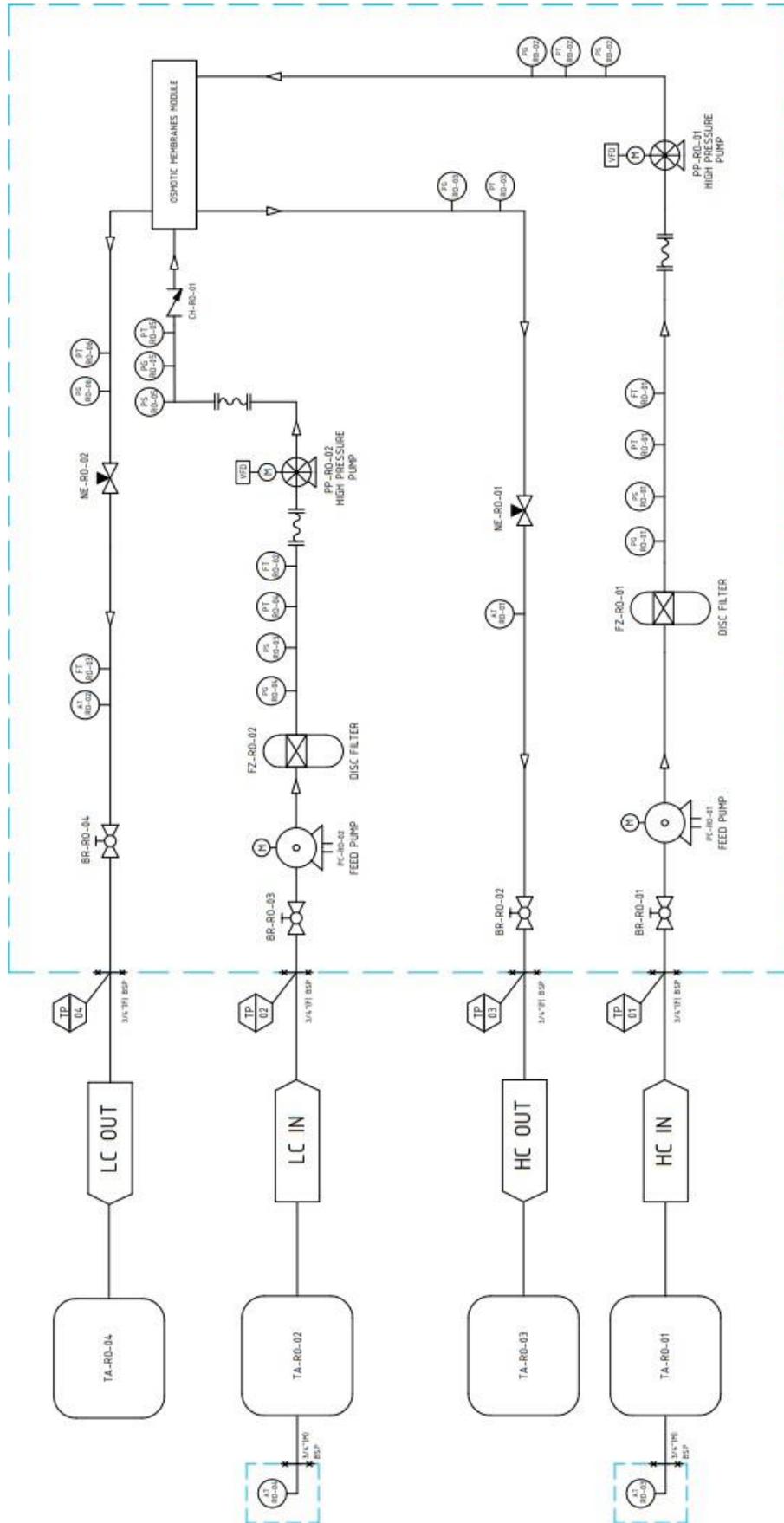


Figura 3.1 Instalación experimental de desalación [3].

Como se ve en el diagrama de la instalación (Figura 3.1), existen dos corrientes de entrada y dos de salida. Por un lado, está la corriente de alta presión, cuyo flujo de entrada es 1 y flujo de salida 2. La corriente de baja presión tiene 3 como flujo de entrada y 4 como salida.

- **Corriente 1:** Entrada de agua de alta concentración en sales o salmuera. Esta corriente, a su paso por el módulo de membranas, cederá agua pura a la corriente 3 y saldrá aún más concentrada (por la pérdida de agua)
- **Corriente 2:** Salida de agua de alta concentración o salmuera. Su contenido en sales es aún mayor que en la entrada 1 por lo comentado anteriormente.
- **Corriente 3:** Corriente de agua salada que a su paso por el módulo de membranas recibe agua pura de la corriente 1 y reduce su contenido en sales a su salida por la corriente 4
- **Corriente 4:** Corriente de salida de agua salada. Su contenido en sales es menor que en la entrada 3 por lo comentado anteriormente.

Válvulas

En la instalación se cuenta con dos tipos de válvulas, que son las válvulas de esfera y las reguladoras de presión.

- Las válvulas de esfera se abren mediante el giro de un eje unido a una bola perforada, de tal forma que cuando la perforación está unida a la entrada y salida de la válvula, permite el paso del fluido.

Cuando la palanca está alineada con el paso del fluido, la válvula se encuentra completamente abierta. Por el contrario, cuando la posición es transversal al flujo, la válvula está cerrada.

Estas válvulas tienen que estar completamente abiertas cuando se inicia el funcionamiento de la instalación. Se corresponden a la nomenclatura BR-RO-0X en el diagrama.



Figura 3.2 Válvula de esfera.

- Las válvulas reguladoras de presión (válvulas de aguja) se utilizan para controlar y mantener la presión en una línea de corriente dentro de unos límites preestablecidos. Con ellas se permite regular la presión de salida del fluido según las necesidades instantáneas del proceso. Se corresponden a la nomenclatura NE-RO-0X en el diagrama.



Figura 3.3 Válvula de aguja.

Bombas

La instalación cuenta con dos tipos de bombas con distinta funcionalidad. Estas son las bombas de circulación y las bombas principales del proceso.

- Las bombas de circulación permiten transportar las soluciones desde los tanques de alimentación hasta la entrada del proceso, con el objetivo de que las corrientes lleguen a la aspiración de las bombas del proceso con presión suficiente.

Se corresponden a la nomenclatura PC-RO-0X en el diagrama.

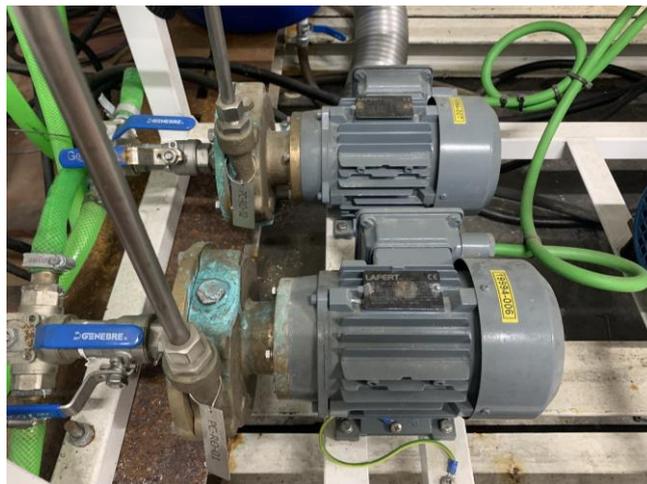


Figura 3.4 Bombas de circulación.

- Las bombas del proceso son bombas de desplazamiento positivo. Ambas son iguales, pero trabajan a distinta presión, siendo la de la corriente 1 la bomba de mayor presión.

Estas bombas cuentan con un mecanismo de cilindro y pistón alternativo con el que consiguen la presión de operación. Serán las encargadas de llevar a la corriente 1 y 3 al módulo de membranas a la presión necesaria para vencer la presión osmótica y provocar la ósmosis inversa.



Figura 3.5 Bomba del proceso. Bomba alternativa.

Módulo de membranas

El componente más destacable de la instalación es indudablemente el módulo de membranas. Este permitirá el paso selectivo de agua, mientras retiene las sales y los contaminantes no deseados. El módulo está compuesto por una carcasa, un conjunto de membranas semipermeables, espaciadores, entradas y salidas de agua y un sellado conveniente para garantizar el funcionamiento eficiente y estable del proceso.

Estos módulos son membranas enrolladas en forma de espiral. El agua entra y fluye de forma tangencial a ellas, de forma que cierta cantidad de agua pasa hacia el colector de permeado, y otra cantidad sale por el otro extremo de la membrana con mayor porcentaje de sales.



Figura 3.6 Membranas FO-4040 TORAY .

3.1.2 Instrumentación

Con respecto a la instrumentación, la instalación cuenta con distintos dispositivos. A continuación, se presentan cada uno de ellos para posteriormente detallarlos individualmente

Tabla 3.1 Dispositivos de instrumentación.

Dispositivo	Cantidad	Nomenclatura en diagrama
Manómetro	6	PG-RO-0X
Presostato	4	PS-RO-0X
Transmisor de presión	6	PT-RO-0X
Transmisor de caudal	3	FT-RO-0X
Analizador de conductividad	4	AT-RO-0X

Manómetros

Los manómetros son instrumentos de medida de la presión de fluidos en circuitos cerrados. Son los encargados de comparar la presión atmosférica con la interior del circuito por donde circula el fluido. En el caso de la instalación a estudio, los manómetros pueden ayudar a identificar posibles problemas o fluctuaciones en la presión, lo que puede indicar obstrucciones en los filtros, problemas en las bombas o cualquier otro inconveniente que afecte en la eficiencia del proceso de purificación.

Tabla 3.2 Características de los manómetros.

Tipo	Burdon
Clase precisión	1.6
Protección	IP65
Dial	DN63
Conexión	Posterior 1/4 in BSP-M
Material	Inox. 316
Relleno	Glicerina



Figura 3.7 Manómetros.

Presostato

El presostato desempeña un papel fundamental en la protección del sistema y en la optimización de su rendimiento. Al controlar la presión, evita daños en los componentes sensibles, como la membrana de ósmosis inversa, al tiempo que garantiza un flujo constante y una producción eficiente de agua purificada. Es un dispositivo que se utiliza para cerrar o abrir un circuito eléctrico en función de la presión que ejerce un fluido sobre un pistón interno, que se mueve hasta que se unen dos contactos. Es un interruptor de presión que actúa dependiendo de la presión del agua.

Los presostatos están situados en la aspiración y descarga de las bombas para detener el equipo en caso de baja presión de aspiración o por alta presión en la descarga.

Tabla 3.3 Características del presostato.

Tipo	Ajustable por tornillo
Histéresis fija a 25°	0.3
Precisión	$\pm 0,5$ % span
Contacto	NC (sin presión)
Máximo voltaje de contacto	48 Vac/dc
Máxima corriente de contacto	0.5/0.2 A
Conexión	1/8 in BSP-M
Salida de cable	Cap tipo 3
Protección	IP65

Transmisor de presión

Un transmisor de presión es un dispositivo utilizado para medir y transmitir la presión del agua en tiempo real a través de una señal eléctrica.

Cuando se aplica presión al transmisor, este utiliza un sensor interno para medir la presión y luego convierte esta medida en una señal eléctrica, como una corriente de salida de 4-20 mA o una señal

de voltaje. Esta señal eléctrica es utilizada para monitorear la presión en un panel de control. Estos transmisores no disponen de indicador local. Como medida de seguridad, el equipo dispone de manómetros analógicos con indicación local según el estándar de Gefico.

Tabla 3.4 Características del transmisor de presión.

Modelo	A-10
Material partes mojadas	Inox. 316L
Material de la caja	Inox. 316L
Tipo de medida	Presión relativa
Conexión a proceso	1/2 in BSP-M
Señal de salida	4-20 mA
Tensión de alimentación	8-30 Vdc
Salida de cable	Prensa M12
Protección	IP65
Precisión	$\pm 0,5$ % span



Figura 3.8 Transmisor de presión.

Transmisor de caudal

Un transmisor de caudal es un dispositivo utilizado para medir y transmitir la tasa de flujo del agua en tiempo real a través de una señal eléctrica. Este dispositivo proporciona información precisa sobre la cantidad de agua que circula a través del sistema.

El transmisor de caudal se instala generalmente en la línea de alimentación de agua cruda o en la línea de salida de agua purificada. Está diseñado para resistir las condiciones y los fluidos corrosivos

asociados con el proceso de ósmosis inversa.

Cuando el agua fluye a través del transmisor de caudal, este utiliza un sensor interno, para medir la velocidad o el volumen del flujo. Luego, convierte esta medida en una señal eléctrica, como una corriente de salida de 4-20 mA o una señal de voltaje, que puede ser utilizada para monitorear y controlar el flujo de agua.

Tabla 3.5 Características del transmisor de caudal.

Tipo	Electromagnético
Alimentación	100-240 Vac/dc
Señal de salida	4-20 mA
Entrada cable	M20
Conexión a proceso	Brida EN1092-1.PN16
Protección	IP66
Precisión	$\pm 0,5$ % span



Figura 3.9 Transmisor de caudal.

Analizador de conductividad

Existen dos tipos de sensores utilizados para medir la conductividad: de contacto e inductivos. Los usados para esta instalación son los inductivos debido a que se utilizan para medir la conductividad electrolítica, un parámetro analítico para determinar la pureza del agua.

Un analizador de conductividad es un dispositivo utilizado para medir la conductividad del agua en tiempo real. La conductividad es una medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad

y se utiliza como indicador de la calidad del agua y del rendimiento del sistema de ósmosis inversa. El analizador de conductividad utiliza una sonda o electrodo de conductividad sumergido en el agua para medir la conductividad eléctrica. La sonda contiene dos electrodos, y al aplicar una corriente eléctrica a través del agua, se mide la resistencia al flujo de la corriente. Esta resistencia está directamente relacionada con la conductividad del agua.

Este equipo se refiere a un termistor de platino que se utiliza en el analizador de conductividad para medir y compensar la temperatura del agua. La conductividad del agua varía con la temperatura, por lo que el analizador ayuda a corregir la medición de conductividad en función de la temperatura actual. Por tanto, proporciona una lectura precisa de la conductividad del agua y puede mostrarla en unidades como microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) o milisiemens por centímetro (mS/cm). Esta información es esencial para controlar y ajustar el sistema de ósmosis inversa, ya que una conductividad alta puede indicar una menor eficiencia de remoción de sales y una posible necesidad de mantenimiento o limpieza de los componentes del sistema.

Tabla 3.6 Características del analizador de conductividad.

Tipo	Inductiva
Alimentación	100-240 Vac/dc
Comunicaciones	4-20 mA
Entrada cable	M20
Protección	IP66



Figura 3.10 Analizador de conductividad.

3.2 Gestión de datos

Para la gestión de los datos se ha utilizado el registrador de datos MultiCon CMC-99/141 (Figura 3.11). Este registrador de datos es una unidad multicanal sofisticada que permite la medición simultánea, visualización y control de numerosos canales. Este dispositivo puede funcionar de forma autónoma o en cooperación con dispositivos de medición externos y actuadores.

El MultiCon CMC-99/141 cuenta con una pantalla a color y una interfaz de usuario intuitiva que facilita la configuración y visualización de los datos. Puede mostrar gráficos, tendencias históricas y valores en tiempo real, lo que permite un monitoreo detallado de las variables del proceso.

Este registrador de datos ofrece múltiples canales de entrada para conectar sensores y transmisores de diferentes tipos, lo que permite una amplia gama de aplicaciones. Puede adquirir datos a través de señales analógicas, digitales y de comunicación, como RS-485, Ethernet o Modbus.

Además de la adquisición y visualización de datos, el MultiCon CMC-99/141 también tiene capacidades de registro y almacenamiento de datos a largo plazo. Puede almacenar datos en una memoria interna o en una tarjeta SD opcional, lo que permite el análisis posterior y el seguimiento del rendimiento del proceso a lo largo del tiempo.

El MultiCon CMC-99/141 ofrece opciones de comunicación flexibles, lo que facilita su integración con otros sistemas y redes de control. Puede conectarse a sistemas SCADA o PLC, y también admite la comunicación con dispositivos remotos a través de Ethernet, RS-485 y otros protocolos de comunicación.

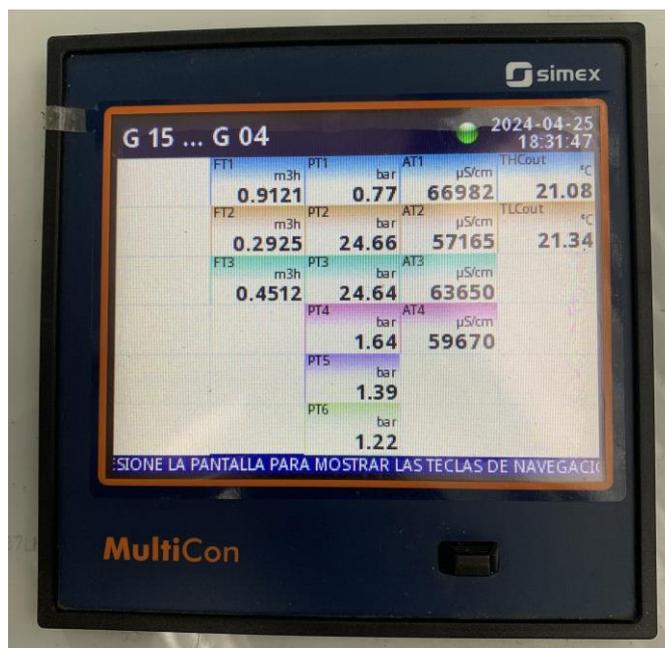


Figura 3.11 Registrados de datos Multicon CMC-99/141.

4 Teoría de cálculo

En este apartado de la memoria se expondrán los cálculos necesarios para comprender los mecanismos de transporte. Y así, posteriormente, añadirle los valores pertinentes para la obtención de resultados mediante experimentación en la unidad desaladora de ósmosis inversa a contracorriente.

4.1 Hipótesis previas al cálculo

Antes de calcular las ecuaciones de transporte tanto experimental como teóricamente, hay que aclarar algunas hipótesis que pueden llevarnos a errores intrínsecos no asociados al error de los datos de permeabilidades. Estas hipótesis son las siguientes:

- Existe un factor CPF para corregir el hecho de que estemos midiendo salinidades en un punto separado de la membrana. Recordar que, para el cálculo de las ecuaciones de transporte, la salinidad y la presión osmótica ha de medirse en la superficie de la membrana (ver Sección 2.3). Este CPF toma mayor trascendencia en la corriente de alta concentración, y suele estar comprendido entre 1,1 y 1,2, y es despreciable en la de baja.
En la primera parte de este trabajo se supone que la salinidad y la presión osmótica en la superficie de la membrana es igual a la de la zona donde se está midiendo, cosa que se sabe que no es así. En el último apartado de la memoria se retomará este concepto.
- En el cálculo de la ecuación 2.3 aparece el factor de ensuciamiento de la membrana "f". Este factor suele adquirir un valor de 0,86 en instalaciones de ósmosis inversa. No obstante, al no conocer realmente este valor, se tomará junto al valor de la permeabilidad al agua para la obtención del conjunto de ambos parámetros, y no por separado.
- Se asume que las ecuaciones de transporte sirven de aplicación tanto en membranas de ósmosis inversa como en aquellas de ósmosis directa (la membrana a estudio es una membrana fabricada para ósmosis directa).

4.2 Cálculo teórico y experimental

4.2.1 Datos de partida

Al realizar los ensayos, los dispositivos de instrumentación van proporcionándole información al gestor de datos, y este va guardando los datos en una memoria interna. Estos se recogen en una carpeta mediante USB, la cual contiene toda la información que el gestor ha recogido durante el ensayo. Utilizando la aplicación de escritorio DAQ Manager, se puede transformar esta carpeta

en archivos en formato excel donde aparecen todos los datos recopilados ordenadamente, además de observar gráficamente las variaciones temporales de los parámetros. Concretamente, con esta aplicación se sacan archivos de excel de temperatura, presión, caudal y conductividad de cada línea en cada instante.

Una vez generados los archivos, pueden introducirse en la herramienta implementada en Excel a través de Visual Basics for Applications, programada por D^a Carmen Belén Navarro González en su Trabajo Fin de Grado.

⚠ **NOTA: LOS ARCHIVOS QUE VAMOS A IMPORTAR TIENEN QUE ESTAR EN FORMATO LIBRO DE EXCEL NO EN .csv**

2.1 Para importar el archivo con los datos de Presión haga click en el botón y seleccione el libro excel que desea importar **Importar archivo Presión**

2.2 Para importar el archivo con los datos de Temperatura haga click en el botón y seleccione el libro excel que desea importar **Importar archivo Temperatura**

2.3 Para importar el archivo con los datos de Flujo haga click en el botón y seleccione el libro excel que desea importar **Importar archivo Flujo**

2.4 Para importar el archivo con los datos de conductividad haga click en el botón y seleccione el libro excel que desea importar **Importar archivo Conductividad**

Estos datos se encuentran en las hojas 3,4,5 y 6 respectivamente. Si se desea cambiar el numero de la hoja deberá abrir VSB, el módulo 2 y cambiar la hoja del libro destino:

`LibroOrigen.Sheets(1).Cells.Copy Destination:=LibroDestino.Sheets(3).Range("A1")`

3. Calculo de Salinidad. Para ello pulse el botón de calcular las salinidades **Cálculo Salinidades**

NOTA: Este proceso puede llegar a tardar hasta 30 min aprox

4. Finalmente en la hoja de datos ordenados aparecerán todos los datos calculados y representados en las gráficas.

Figura 4.1 Hoja de instrucciones para la obtención de resultados [2].

Tras introducir los cuatro archivos que se piden, se pulsa el botón "Calcular salinidades", y se obtienen los resultados necesarios para la realización de este proyecto. Estos datos, para cada una de las corrientes, son los siguientes:

- Concentración [C] [ppm]: se obtiene a partir de las conductividades.
- Densidad [ρ_{sw}] [g/L]
- Coeficiente osmótico [Φ]: importante para el cálculo de la presión osmótica, se verá más adelante.
- Presión osmótica [bar]
- NDP [bar]: fuerza motriz del proceso.
- Qv [m³/h]: caudal volumétrico total transferido a través de la membrana. Contiene agua y sales.

Para el cálculo de la presión osmótica, la herramienta utiliza las salinidades de las corrientes de entrada de alta y baja concentración, cosa que aproxima los resultados pero conlleva cierto error. Para mejorar este trabajo, se corregirá y se utilizarán las concentraciones promedio del canal en el cálculo teórico, que es un valor más correcto que si se toma el valor de concentración de la corriente de entrada del canal.

Antes de iniciar la explicación de los cálculos, hay que destacar que se cuenta con el área efectiva de la membrana, dato proporcionado por el fabricante a la hora de comprar el módulo de membranas.

4.2.2 Cálculo teórico

El cálculo teórico se explica para la corriente de alta concentración, la corriente 1-2. El cálculo para la corriente de baja concentración es análogo.

En primer lugar, se revisa la ecuación que permite calcular el caudal de agua transferida:

$$q_{vw} = f \cdot Lw \cdot A \cdot NDP \quad (4.1)$$

- q_{vw} [L/h]: caudal volumétrico de agua transferida a través de la membrana.
- f : factor de ensuciamiento de la membrana.
- A [m²]: área efectiva de la membrana. $A = 3 \text{ m}^2$
- Lw [L/(h·m²·bar)]: permeabilidad al agua de la membrana.
- NDP [bar]: fuerza motriz del proceso.

Los valores de f , A y Lw , son teóricamente conocidos (no es el caso), ya sea por ser dato de fabricante (área) o dato experimental (f y Lw). Para plantas de ósmosis inversa de agua de mar, f toma un valor de diseño de 0,86. Sin embargo, en la membrana testada, que ha operado muy esporádicamente, debe tomar un valor muy cercano a 1. No obstante, dado que no se dispone de ensayos comparativos en sus primeros días de operación, no es posible suponer un valor de f como hipótesis, por eso experimentalmente se determinará el producto $f \cdot Lw$.

La importancia de esta ecuación recae sobre el cálculo de la NDP, la cual se calculará del siguiente modo, teniendo en cuenta las concentraciones promedio del canal:

$$NDP = p_{S1-S2} - p_{S3-S4} - (\Pi_{S1-S2} - \Pi_{S3-S4}) \quad (4.2)$$

Siendo las presiones osmóticas calculadas de la siguiente forma:

$$\Pi_{S1-S2} = 2 \cdot \Phi \cdot \rho_1 \cdot R \cdot T_2 \cdot \frac{S_{1-2}}{Ms \cdot (1 - S_{1-2})} \quad (4.3)$$

- Φ : coeficiente osmótico.
- ρ_1 [g/L]: densidad de entrada de la corriente.
- R [J/(mol·K)]: constante universal de los gases. : $R = 8,314472 \text{ J/(mol·K)}$
- T_2 [K]: temperatura de salida de la corriente.
- Ms [kg/mol]: masa molar aparente de las sales del agua de mar. $Ms = 0,062808 \text{ kg/mol}$
- S_{1-2} [kg/kg]: salinidad promedio de la corriente.

Todos los componentes de la ecuación son datos conocidos, o bien se han calculado gracias a la herramienta utilizada, excepto la salinidad promedio, la cual se calcularía teóricamente de la siguiente manera.

$$S_{1-2} = S_1 \cdot \frac{\ln \frac{1}{1-r}}{r} \quad (4.4)$$

- S_1 : salinidad de la corriente de entrada del canal.
- r : se define como la división entre el caudal másico transferido a través de la membrana y el caudal másico de entrada de la corriente.

$$r = \frac{q_t}{q_1} \quad (4.5)$$

En un proceso convencional de ósmosis inversa de agua de mar, la NDP decrece rápidamente a su paso por el módulo de membranas. Es por eso que habría que utilizar este método en el cálculo de la

NDP en instalaciones industriales, con módulos de membranas de mucha mayor área efectiva que la estudiada. Como la membrana experimental es de 3 m^2 (muy pequeña), para simplificar los cálculos se utilizará la media aritmética de la salinidad entre ambos extremos del canal (entrada-salida), que es una aproximación bastante correcta en el caso de este proyecto.

Vistas las ecuaciones necesarias para el cálculo del caudal de agua transferida a través de la membrana, se expondrán a continuación las ecuaciones necesarias para el cálculo teórico del caudal de sales transferidas.

$$q_s = L_s \cdot A \cdot (C_{S1-S2} - C_{S3-S4}) \quad (4.6)$$

- q_s [mg/h]: caudal másico de sales transferidas a través de la membrana.
- A [m^2]: área efectiva de la membrana. $A = 3 \text{ m}^2$
- L_s [$\text{L}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$]: permeabilidad a las sales de la membrana.
- C_{Si-Sj} [mg/L]: concentración de la corriente i-j.

Al igual que pasaba con las presiones osmóticas en el cálculo de la primera ecuación de transporte, en el cálculo del caudal de sales transferido adquieren gran importancia las concentraciones. Puesto que los datos de área y permeabilidad son conocidos, el único término que hay que desglosar es el relativo a estas concentraciones.

Recordando lo visto anteriormente, de la herramienta implementada en VBA se obtuvo la salinidad a la entrada y salida de cada corriente para cada instante de tiempo. Estos datos se mejoraron calculando el valor de la salinidad promedio de cada canal mediante iteración del parámetro r . Estos datos mejorados son necesarios en el cálculo de la concentración, pues esta no es más que:

$$C_{S1-S2} = 10^3 \cdot \rho_1 \cdot S_{1-2} \quad (4.7)$$

- C_{S1-S2} [mg/L]: concentración promedio del canal de alta concentración.
- ρ_1 [kg/m^3]: densidad de la corriente de entrada del canal de alta concentración.
- S_{1-2} [kg/kg]: salinidad promedio del canal de alta concentración.

El cálculo sería análogo para el canal de baja concentración (3-4).

La forma de calcular la salinidad promedio se ha comentado anteriormente en el cálculo del caudal volumétrico de agua transferida a través de la membrana.

Los caudales transferidos, q_{vw} y q_s se obtendrán mediante experimentación según se verá en el próximo subapartado, por lo que los valores resultantes del cálculo teórico serán la permeabilidad al agua multiplicada por el factor de ensuciamiento ($f \cdot L_w$) y L_s .

4.2.3 Cálculo experimental

Para el cálculo experimental, habrá que partir de los resultados proporcionados por la herramienta en VBA para cada uno de los ensayos. El dato inicial del que se dispone es el caudal volumétrico transferido a través de la membrana (q_t), mezcla de agua y sales, que como se menciona anteriormente, es la diferencia entre la corriente de entrada y salida del canal de alta concentración, o viceversa para el de baja concentración.

$$q_{S1} = q_{S2} + q_t \quad (4.8)$$

Para cada instante, se dispone de un valor de q_t , el cual habrá que multiplicar por la densidad para obtener el caudal másico total transferido, y así poder realizar el balance de materia que desglose este caudal en agua y sales por separado.

$$q_t = q_{vw} \cdot \rho_1 + q_s \quad (4.9)$$

- q_t [kg/s]: caudal másico total transferido a través de la membrana.
- q_{vw} [m³/s]: caudal volumétrico de agua transferida a través de la membrana.
- ρ_1 [kg/m³]: densidad de la corriente de entrada del canal de alta concentración.
- q_s [kg/s]: caudal másico de sales transferidas a través de la membrana.

Como puede observarse, en esta ecuación están los dos términos necesarios para concluir el cálculo, q_{vw} y q_s . Para poder entrar en esta ecuación, hay que calcular previamente q_s como el caudal total transferido multiplicado por la salinidad de esa corriente transferida a través de la membrana. Para ello, se hará un balance de materia referido a las sales que entran y salen del canal de alta concentración, se puede ver fácilmente en el siguiente esquema de aclaración:

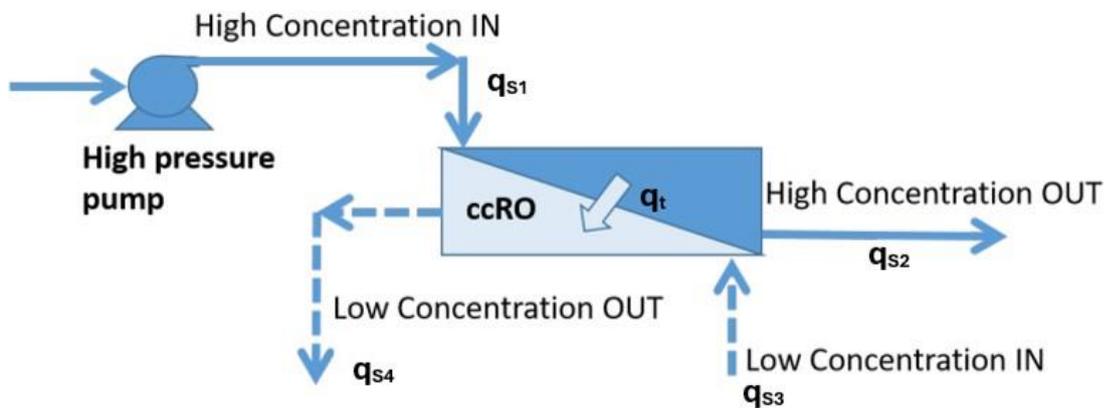


Figura 4.2 Aclaración de caudales.

De las corrientes presentes en el esquema de la instalación, a excepción de la corriente transferida (t), se conocen, ya sea por medición directa o por cálculo gracias a la herramienta de cálculo:

- Salinidad de cada corriente.
- Densidades.
- Caudales volumétricos (con la densidad podría obtenerse el másico)
- Presiones.
- Temperaturas en las corrientes de salida.

Aplicando un balance de materia de sales al canal de alta concentración:

$$q_{s1} \cdot S_{s1} = q_t \cdot S_t + q_{s2} \cdot S_{s2} \quad (4.10)$$

Donde S_i es la salinidad de cada una de las corrientes. Estas salinidades contienen las unidades de [kg_{sales}/kg_{disolucion}] mientras que los caudales másicos de las corrientes poseían unidades de [kg_{disolucion}/s].

De la Ecuación 4.10 puede obtenerse la salinidad de la corriente transferida a través de la membrana, pues el resto de términos son conocidos tras introducir los datos del ensayo en la herramienta y compilar. Una vez tenemos dicha salinidad, se multiplica por el caudal másico transferido para obtener el caudal de sales transferido, q_s .

Una vez obtenido el valor de q_s , puede introducirse en la Ecuación 4.9 para despejar el caudal volumétrico de agua transferida, q_{vw} . Así quedaría definido el cálculo experimental de los caudales de agua y sales transferidos a través de la membrana.

El cálculo experimental será de vital importancia para obtener los valores de los mecanismos de transporte, q_{vw} y q_s . Una vez se obtengan dichos valores, los únicos parámetros desconocidos serán la permeabilidad al agua y a las sales, por lo cual mediante el cálculo teórico, se podrán obtener, y eso es lo que se hará en la próxima sección.

Para el orden de actuación de este proyecto, como se ha comentado anteriormente, habría que realizar el cálculo experimental a primera instancia, para obtener los valores de los caudales de agua y sales transferidos a través de la membrana. Una vez hecho, se pasa al cálculo teórico para obtener los valores de $f \cdot L_w$ y L_s .

5 Ensayos e interpretación

Para concluir el proyecto, se procede a calcular los parámetros permeabilidad al agua y permeabilidad a las sales, además de los mecanismos de transporte, teniendo en cuenta diferentes factores. En primer lugar, se despreciará el transitorio (inicio del ensayo), donde se obtiene un comportamiento distinto al que se observa pasado cierto tiempo. Además, se observarán las diferencias entre tener en cuenta o no el factor de polarización (CPF).

Si se toma $CPF=1$, se asume que la salinidad en la pared de la membrana es la misma que a cierta distancia de ella (no hay efecto de polarización). En el otro extremo se sitúa el que según Mark Wilf es el máximo valor recomendado para el CPF en la industria de la ósmosis inversa, 1,2, que corresponde a un valor de recuperación de permeado del 18 % para membranas de un metro de longitud. En los ensayos, se adelanta que el caudal transferido es alrededor del 15 % del caudal de entrada del canal de alta concentración, por lo que cabe esperar como máximo un valor para CPF de 1,2.

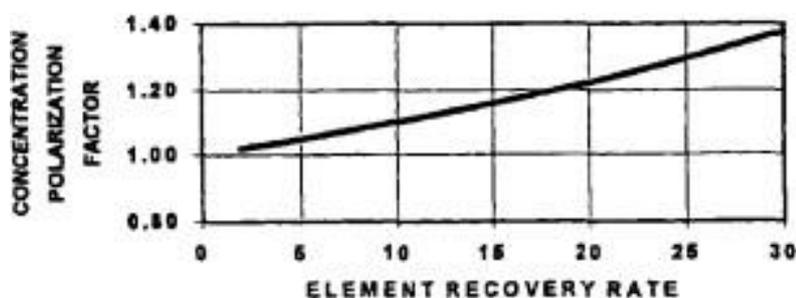


Figura 5.1 CPF frente a recuperación de permeado [8].

Entre estos dos valores estará comprendido el valor real, es por eso que se trabajará con ambos extremos.

Otro aspecto importante de este apartado es que se tomará el factor de ensuciamiento de la membrana (f) junto a la permeabilidad al agua (L_w) en el cálculo experimental. Es decir, resultarán valores para $f \cdot L_w$, como bien se menciona en el capítulo anterior.

Los resultados se obtendrán para ambos ensayos, y se verá si concuerdan. Si no fueran semejantes, habría que realizar más ensayos para ver cómo varían de un ensayo a otro.

El objetivo de los ensayos propuestos no es más que recopilar datos para llevar a cabo el estudio analítico que se propuso en el Capítulo 4. Tras esto, podrán introducirse en la herramienta y automáticamente, después de haber implementado una hoja Excel con todos los cálculos, se obtendrán

los resultados necesarios. Empleando esta hoja Excel se sacarán gráficas con los valores tanto de los mecanismos de transporte como de las permeabilidades al agua y sales.

5.1 Ensayo 1

Fecha	Duración
23/04/2024	25 min

En primer lugar, se presenta la siguiente gráfica, en la que se observan las variaciones de caudal en las corrientes de entrada (IN) y salida (OUT) de ambos canales, alta concentración (HC) y baja concentración (LC). El objetivo de la presentación de esta gráfica es ver cuál ha sido el patrón de variación de frecuencia en este ensayo, pues la variación de frecuencia de la bomba volumétrica que impulsa la corriente de alta concentración será proporcional a su caudal.

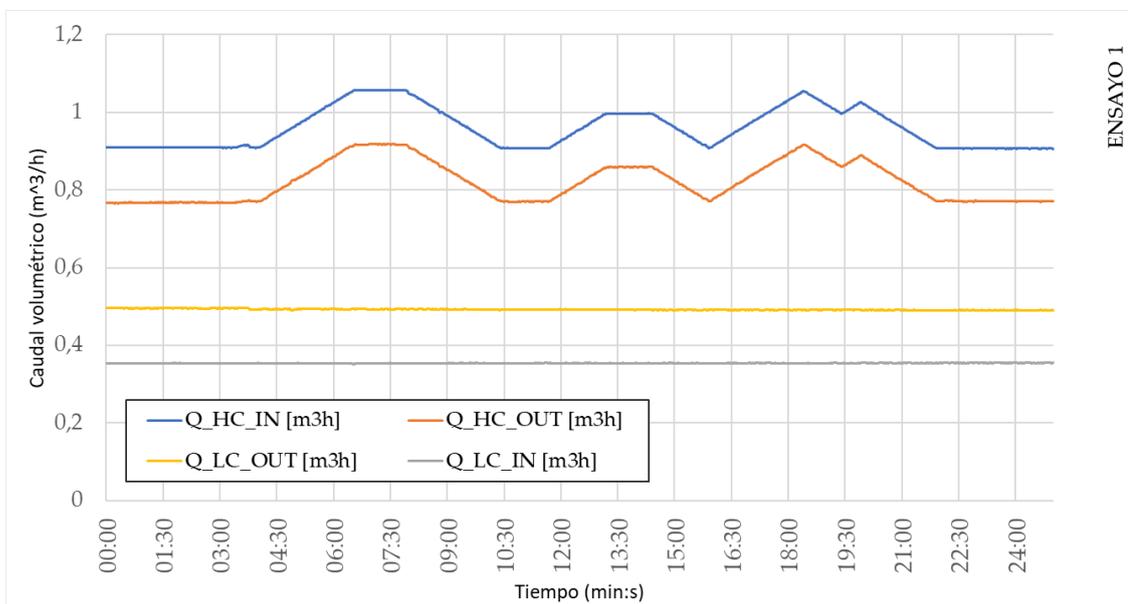


Figura 5.2 Caudal volumétrico de las corrientes respecto al tiempo en el Ensayo 1.

Se observa como varía el caudal de la corriente de alta concentración debido a las variaciones de frecuencia que vamos estableciendo manualmente. Este patrón es totalmente aleatorio e improvisado, siempre manteniendo unos márgenes de seguridad para no perder presión y bajar del límite inferior de operación. Se recuerda que el objetivo de estas variaciones de frecuencia es la comprobación de su influencia sobre los mecanismos de transporte.

Por otro lado, se representa la gráfica que muestra las presiones en cada una de las corrientes:

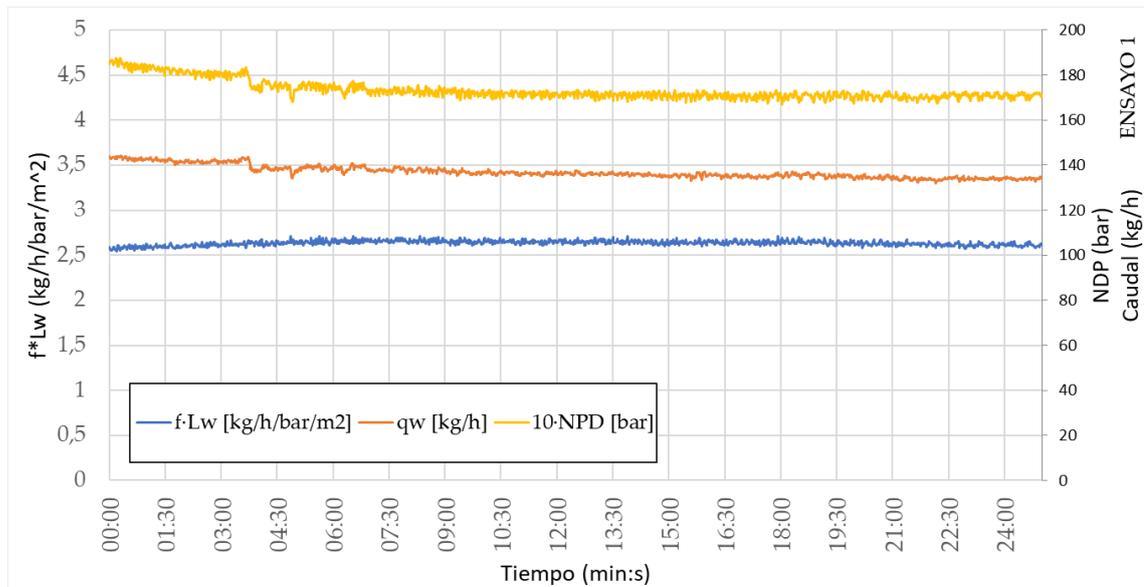


Figura 5.4 $f \cdot L_w$, NDP y q_w frente al tiempo en el Ensayo 1. CPF=1.

Se observa un valor de caudal de agua transferida que desciende ligeramente a medida que avanza el tiempo de ensayo. Su valor medio se sitúa en torno a los 140 kg/h, y es bastante uniforme al paso del tiempo.

El resultado medio para $f \cdot L_w$ es algo superior a $2,5 \text{ kg}/(\text{h} \cdot \text{bar} \cdot \text{m}^2)$. Para llegar a él, se ha considerado que no hay efecto de la polarización, CPF=1, que es el mínimo considerado.

Por otro lado, se observan los valores de NDP, en torno a unos 17 bar medios.

En segundo lugar, se implementa otra gráfica de resultados asociados a la segunda ecuación de transporte:

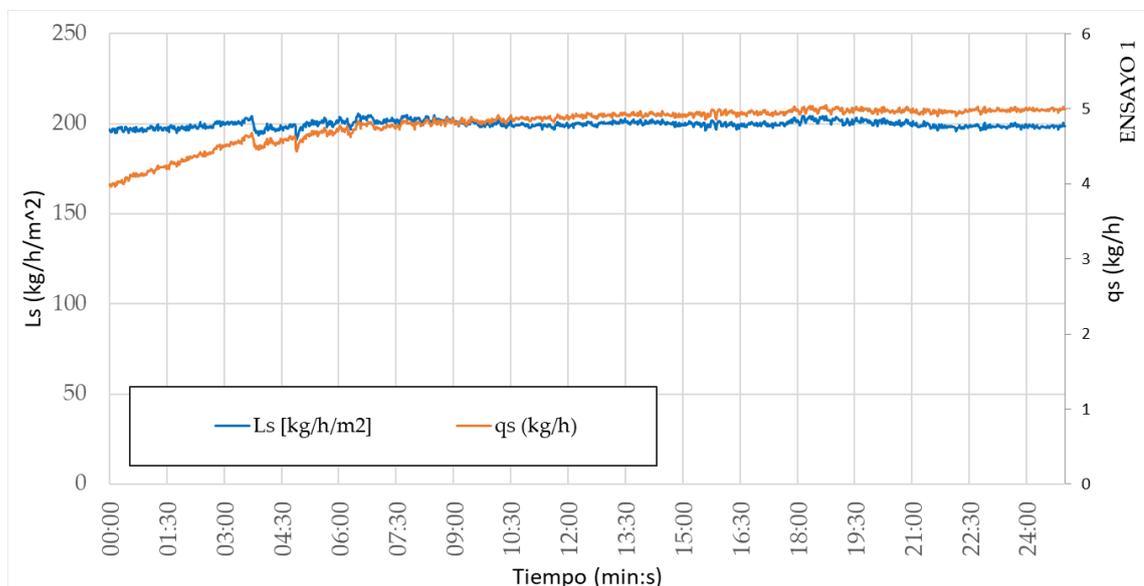


Figura 5.5 L_s y q_s frente al tiempo en el Ensayo 1. CPF=1.

El valor de q_s presenta cierta uniformidad a partir del minuto 8 aproximadamente, este será el instante de tiempo que se empezará a tener en cuenta para el cálculo promedio de permeabilidades, se supondrá que justo en ese instante acaba el régimen transitorio. Se asume, por tanto, que existe un período de tiempo desde que se pone en marcha el ensayo en el que se estabiliza el proceso.

Al contrario que ocurría con el caudal de agua, ahora las sales transferidas van aumentando ligeramente. Resumiendo, a medida que avanza el tiempo, aumenta el caudal de sales transferidas y disminuye el de agua transferida, muy poco a poco. Esto puede deberse a las deposiciones de sal que se acumulan en la membrana y no permiten el paso de agua a través de ella. Es por esta razón que antes de cada ensayo habrá que limpiar la instalación con agua pura para reiniciar el proceso, y así controlar el ensuciamiento.

Se puede sacar una conclusión más de ambas gráficas, y es que el hecho de variar la frecuencia de los motores de las bombas con el objetivo de aumentar su caudal no influye sobre los mecanismos de transporte, se ve claramente como los valores de q_s y q_{Vw} siguen una trayectoria recta con el paso del tiempo. Esto se debe a que, fijándonos en las ecuaciones de transporte en la Sección 4.2, el caudal no influye en ningún parámetro.

Para el dato de la permeabilidad a las sales (L_s), se obtiene un valor promedio de 200 ($\text{kg}/\text{h}/\text{m}^2$), el cuál se comparará con el obtenido en el siguiente apartado.

5.1.2 Resultados Ensayo 1 para CPF=1,2

Para interpretar los resultados de permeabilidad al agua y sales, se observará como varían los resultados si aumentamos el CPF al máximo comentado:

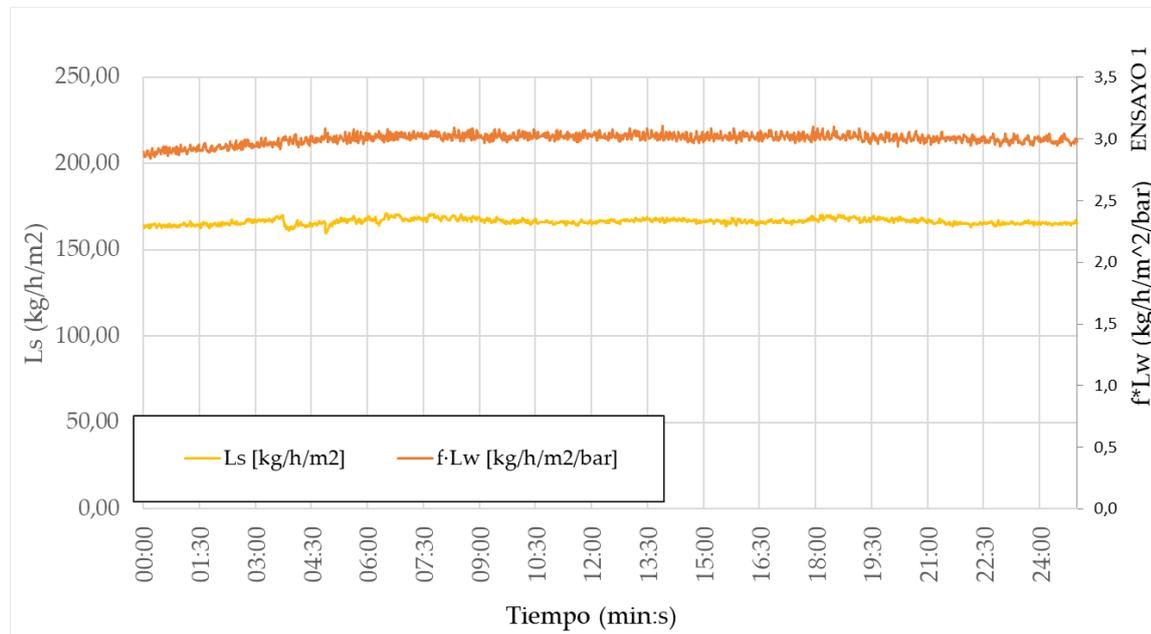


Figura 5.6 $f \cdot L_w$ y L_s frente al tiempo en el Ensayo 1. CPF=1,2.

En esta gráfica para CPF=1,2, vuelve a observarse ese intervalo de tiempo de estabilización en torno a 8 minutos que se comentaba anteriormente, lo que afianza esta hipótesis.

Se obtiene un valor medio en torno a $3 \text{ kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar})$ frente a ese 2,5 visto para CPF=1. Este rango es razonable para membranas comerciales, teniendo en cuenta la siguiente gráfica que expone valores de permeabilidades de membranas comerciales de ósmosis directa, y sabiendo que estamos en un proceso de ósmosis inversa.

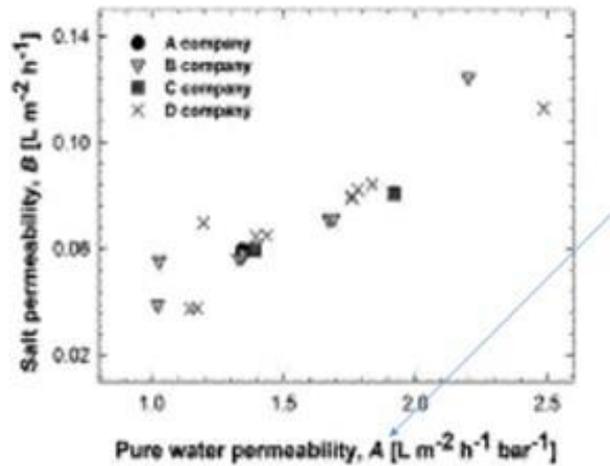


Figura 5.7 Valores de permeabilidades en membranas comerciales [7].

No obstante, se observa que el valor de L_s es muy elevado, no concuerda con los valores expuestos en la Figura 5.8. Esto puede deberse a un error de fabricación, a una fuga que esté permitiendo el paso de sales, o simplemente a que la membrana a estudio no esté capacitada para ósmosis inversa, y sea óptima para otros procesos de filtrado como puede ser la nanofiltración.

Entrando en la comparación de ambas suposiciones, $CPF=1$ y $CPF=1,2$, se puede observar lo siguiente. El valor de permeabilidad al agua aumenta al aumentar el CPF, ocurriendo lo contrario para el valor de L_s , que disminuye de unos 200 a 160 $kg/(h \cdot m^2)$.

5.2 Ensayo 2

Fecha	Duración
25/04/2024	34 min

Al igual que se hizo para el primer ensayo, se presenta la gráfica en la que se observan las variaciones de caudal en las corrientes de entrada (IN) y salida (OUT) de ambos canales, alta concentración (HC) y baja concentración (LC). Se puede ver el nuevo patrón de variación de frecuencia de la bomba de alimentación de alta presión, y su influencia sobre el caudal asociado.

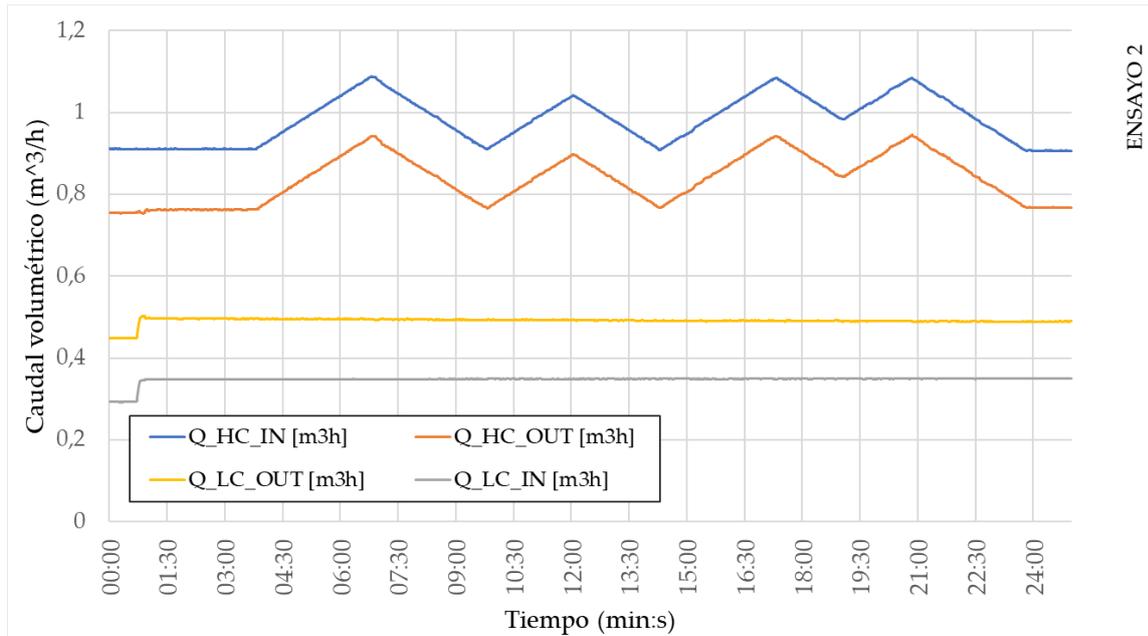


Figura 5.8 Caudal volumétrico de las corrientes respecto al tiempo en el Ensayo 2.

De la misma manera, se representa la gráfica que muestra las presiones en cada una de las corrientes, en la que se observa la bajada de presión en el canal de alta presión análoga a las variaciones de frecuencia:

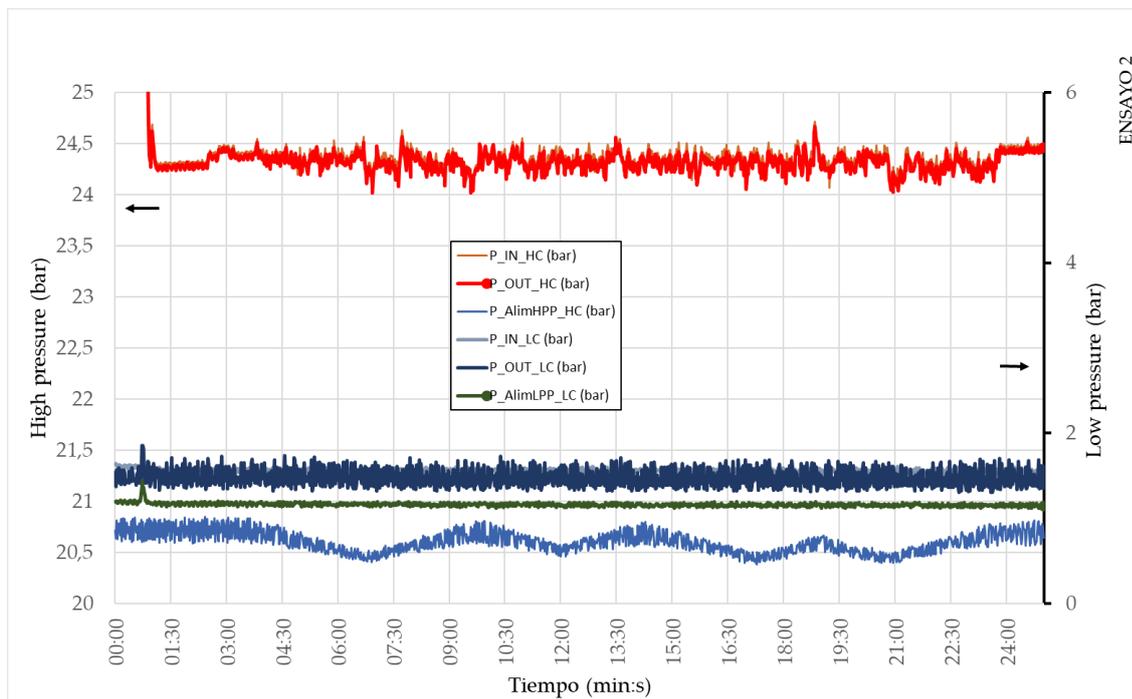


Figura 5.9 Presiones de las corrientes respecto al tiempo en el Ensayo 2.

Se observa claramente ese efecto de la variación de frecuencia sobre la presión de alimentación a la HPP, y como se ha intentado mantener constante la presión en el canal de alta concentración mediante la válvula de aguja, como se vio en el primer ensayo.

5.2.1 Resultados Ensayo 2 para CPF=1

Del mismo modo que en el ensayo anterior, se calculan en un principio los resultados sin tener en cuenta la polarización (CPF=1).

Las gráficas obtenidas para este ensayo contienen los mismos parámetros que las obtenidas para el anterior. En primer lugar, la gráfica compuesta por los miembros que entran en juego en el cálculo del agua transferida (primera ecuación de transporte) es la siguiente:

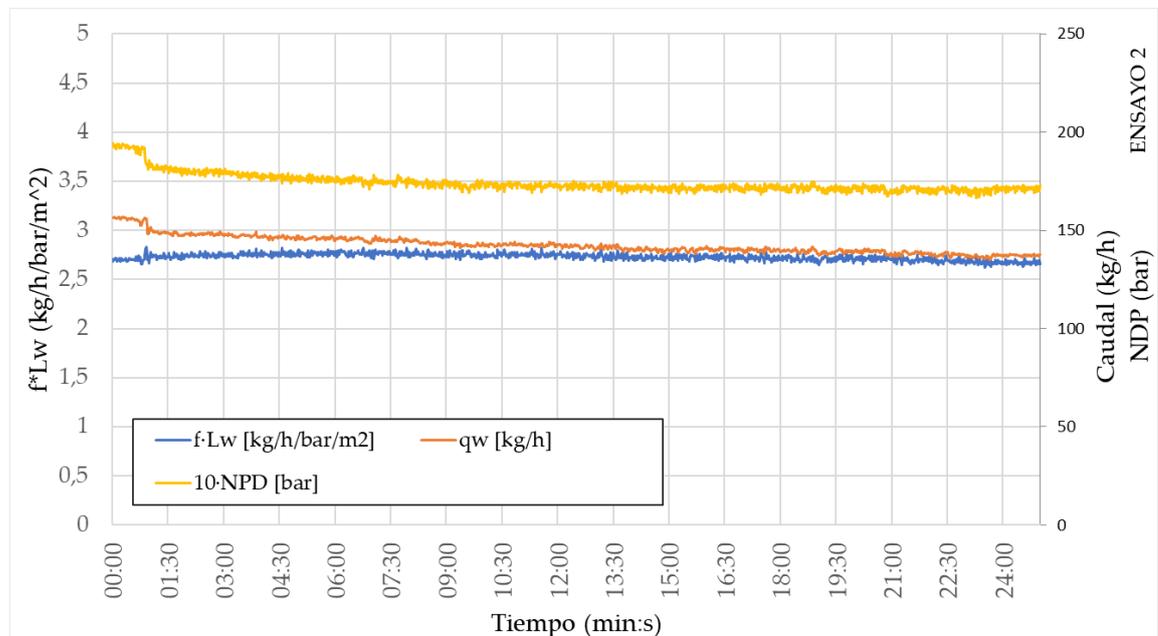


Figura 5.10 $f \cdot L_w$, NDP y q_{vw} frente al tiempo en el Ensayo 2. CPF=1.

Al igual que en el primer ensayo, se observa ese ligero descenso del valor de q_{vw} con el tiempo, asociado a las deposiciones que se van acumulando. En este caso, el caudal toma un valor medio de unos 140 kg/h, mismo valor que se obtuvo para el ensayo 1, como no puede ser de otro modo, puesto que se ha visto que las variaciones de frecuencia no influyen sobre los mecanismos de transporte.

El resultado medio para $f \cdot L_w$ en este caso es de unos 2,7 kg/(h·bar·m²). Difiere ligeramente de los 2,5 obtenidos en el ensayo anterior, pero no deja de ser una diferencia de menos del 10%, lo que es asumible.

El valor medio de NDP vuelve a estar en torno a 17 bares.

En segundo lugar, se implementa la gráfica de resultados asociados a la segunda ecuación de transporte, relativa al caudal de sales transferido a través de la membrana:

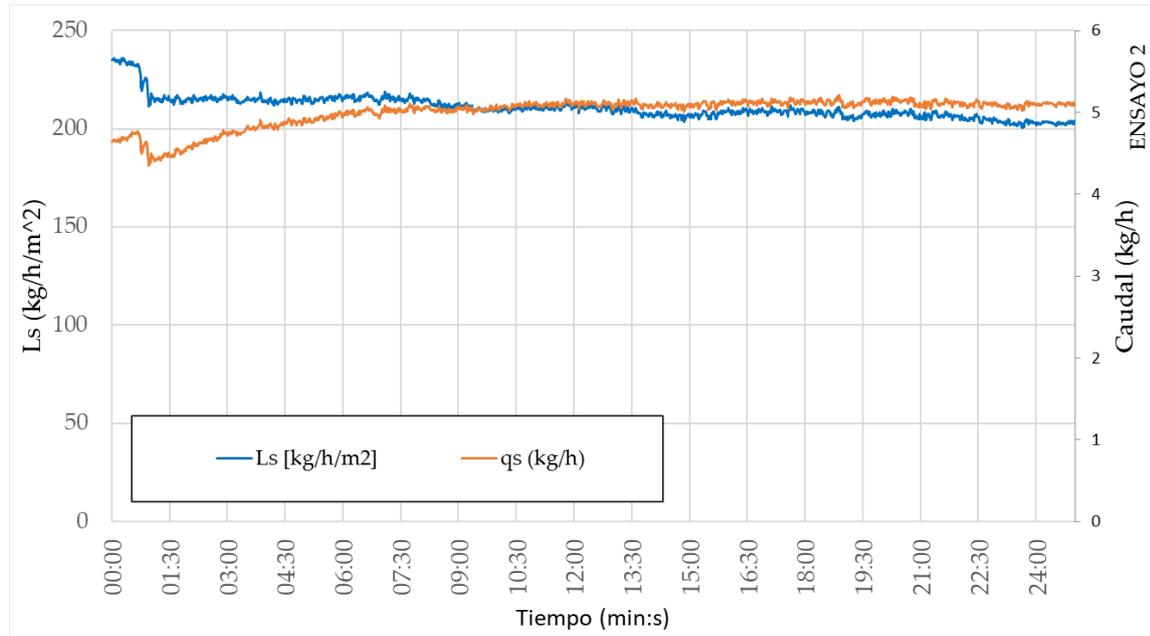


Figura 5.11 L_s frente a q_s en el Ensayo 2. CPF=1.

El valor de q_s vuelve a presentar uniformidad a partir del minuto 8 aproximadamente, por lo que adquiere más sentido el hecho de despreciar este primer intervalo de tiempo de estabilización.

Esta gráfica sirve para afianzar conclusiones que se vieron en el ensayo uno. En concreto, el hecho de que la variación de frecuencia no afecta en absoluto, pues vuelve a verse que los caudales transferidos no dependen de estas variaciones efectuadas en el laboratorio.

La permeabilidad a las sales toma un valor medio de unos $205 \text{ (kg/h/m}^2\text{)}$ en este caso, muy similar al obtenido en el primer ensayo despreciando polarización.

Igualmente, los valores de caudal de agua y sales transferidas disminuyen y aumentan con el tiempo de ensayo, respectivamente, por el motivo comentado anteriormente.

Se obtienen los siguientes resultados exactos y se observa su diferencia con los obtenidos en el primer ensayo, ya comentada anteriormente.

Parámetro y ensayo	Resultado	Unidad
$f \cdot L_w$ Ensayo 1, CPF=1	2,64	$\text{kg}/(\text{hm}^2\text{bar})$
L_s Ensayo 1, CPF=1	200,00	$\text{kg}/(\text{hm}^2)$
$f \cdot L_w$ Ensayo 2, CPF=1	2,70	$\text{kg}/(\text{hm}^2\text{bar})$
L_s Ensayo 2, CPF=1	206,10	$\text{kg}/(\text{hm}^2)$

5.2.2 Resultados Ensayo 2 para CPF=1,2

A continuación, se disponen la gráfica de resultados para el caso en el que el CPF es el máximo:

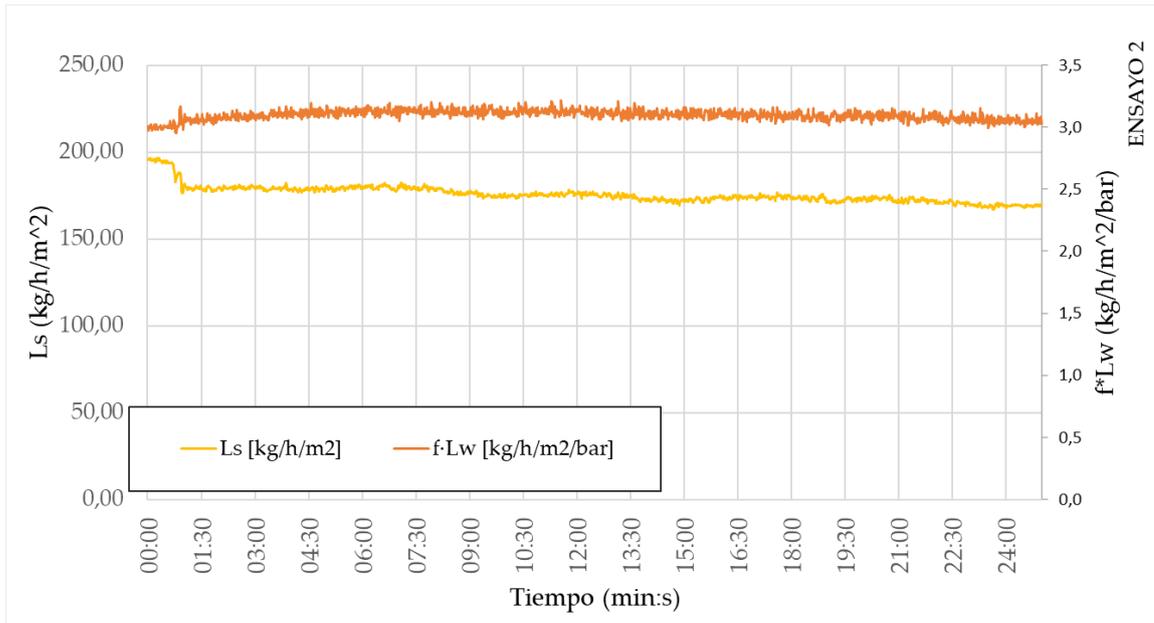


Figura 5.12 $f \cdot L_w$ y L_s frente al tiempo en el Ensayo 2. CPF=1,2.

Los resultados son muy semejantes al ensayo 1, el valor de $f \cdot L_w$ es ligeramente mayor de 3 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{bar})$, mientras que L_s se coloca en unos 170 $\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$. Los resultados exactos son los siguientes, que afianzan la interpretación de los resultados del primer ensayo, debido a su muy cercano valor.

Parámetro y ensayo	Resultado	Unidad
$f \cdot L_w$ Ensayo 1, CPF=1,2	3,01	$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{bar})$
L_s Ensayo 1, CPF=1,2	166,66	$\text{kg}/(\text{hm}^2)$
$f \cdot L_w$ Ensayo 2, CPF=1,2	3,06	$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{bar})$
L_s Ensayo 2, CPF=1,2	171,41	$\text{kg}/(\text{hm}^2)$

6 Conclusiones

Como objetivo del proyecto se propuso analizar experimentalmente los mecanismos de transporte sobre una unidad experimental de desalación mediante ósmosis inversa a contracorriente. Mediante experimentación, se han sacado unos valores para los caudales de agua y sales transferidos a través del módulo de membranas FO4040 de Toray. Gracias a esos valores y a una herramienta de cálculo, han podido obtenerse valores experimentales de permeabilidad al agua y sales de la membrana, meta principal del proyecto. El objetivo era observar cómo respondían esos valores ante una variación de caudal promovida por la variación de frecuencia en una de las bombas, en concreto en la de alta presión (lado de alta concentración).

A pesar de la similitud de los resultados en ambos ensayos, no se puede llegar a un valor concreto de permeabilidades, puesto que no se cuenta con el factor de polarización (CPF), que influye en las salinidades de las corrientes. Sin embargo, se han obtenido los valores máximo y mínimo, entre los cuáles se encuentra el real y sería conocido si se tuviera dicho factor.

Las conclusiones se sacan de los resultados que se presentan a continuación, para ambos ensayos.

- Ensayo 1

Parámetro y ensayo	Resultado	Unidad
f·Lw Ensayo 1, CPF=1	2,64	kg/(hm ² bar)
Ls Ensayo 1, CPF=1	200,00	kg/(hm ²)
f·Lw Ensayo 2, CPF=1	2,70	kg/(hm ² bar)
Ls Ensayo 2, CPF=1	206,10	kg/(hm ²)

- Ensayo 2

Parámetro y ensayo	Resultado	Unidad
f·Lw Ensayo 1, CPF=1,2	3,01	kg/(hm ² bar)
Ls Ensayo 1, CPF=1,2	166,66	kg/(hm ²)
f·Lw Ensayo 2, CPF=1,2	3,06	kg/(hm ² bar)
Ls Ensayo 2, CPF=1,2	171,41	kg/(hm ²)

A la hora de obtener los resultados expuestos, se ha llegado a una serie de conclusiones.

- En primer lugar, ambos ensayos son coherentes, en el sentido de que, como ocurre en la mayoría de ensayos de laboratorio, existe un tiempo de estabilización. En concreto, se ha llegado a la conclusión de que la instalación toma unos 8 minutos de tiempo que puede tomarse como transitorio hasta que los valores se estabilizan.
- El hecho de variar la frecuencia de la bomba de alimentación del canal de alta presión no ha influido en absoluto en los mecanismos de transporte, sino que estos han tomado un valor constante en el tiempo. Esto era algo esperado, pues vistas las ecuaciones de transporte, se comentó que el caudal era algo que no influía en el cálculo.
- Gracias al estudio experimental en los dos ensayos, y a los resultados obtenidos, se pueden tomar unos valores de permeabilidad al agua y sales que estarán comprendidos entre los hallados para los valores mínimo y máximo de CPF.
- El valor calculado para la permeabilidad al agua de la membrana (L_w), está acompañado del factor de ensuciamiento de la membrana (f), puesto que es imposible saber cuánto vale dicho factor sin haber hecho un estudio de referencia previo a la utilización de la membrana. Su valor estará comprendido entre 0,86 (valor de diseño en plantas de ósmosis inversa de 2-3 años de antigüedad) y 1 (membrana nueva)

Como se comenta en el último punto, los resultados de permeabilidad al agua y sales en ambos ensayos son muy parejos, cosa que afianza la idea de que estén bien calculados. El valor real de L_s (permeabilidad a las sales de la membrana) estará entre 170 y 205, mientras que el valor real de $f \cdot L_w$ estará entre 2,65 y 3,05.

El valor de $f \cdot L_w$ es un valor asumible y podría considerarse correcto. No obstante, el valor de L_s se presenta muy elevado, lo cual puede deberse a varias razones. En primer lugar, podría ser que existiera una fuga en la misma membrana o en las juntas, que esté haciendo pasar más sales de lo común. Por otro lado, podría ser que esta membrana no esté diseñada para ósmosis inversa, y su utilización para este mecanismo no sea útil.

Posibles futuros avances

Para avanzar en el proyecto, pueden llevarse a cabo varios puntos que afinarían los resultados presentados en este proyecto. Los dos valores que no se han podido calcular en este trabajo son el factor de polarización (CPF) y el factor de ensuciamiento de la membrana (f).

- Para conocer el efecto de la polarización, bastaría con medir la transferencia de masa a través de la membrana empleando agua pura en ambos canales, no habiendo entonces polarización. Conocido el valor de $f \cdot L_w$ tras la experimentación, se podría obtener el valor real de CPF y ver si es cercano a 1 o a 1,2. Esta medición podría hacerse bien vaciando los tanques de la instalación y llenándolos de agua pura, o bien empleando un tubo en U en el laboratorio, y aplicando más presión a un lado de la membrana ver cuál es la transferencia de masa.
- Para averiguar el factor de ensuciamiento, como es sabido, hay que tener un dato de referencia que ha de calcularse con la membrana nueva, el cual no se tiene. La única solución para obtenerlo es comprar otro módulo y tomar los datos de esa nueva membrana. Si se consiguiera una nueva membrana, podría hacerse el estudio de CPF previo para posteriormente introducirla con factor de ensuciamiento igual a 1 (nueva).

Con estas dos nuevas consideraciones, se podría volver a entrar en la hoja de cálculo y obtener unos valores reales de permeabilidades tras varios ensayos en la unidad desaladora.

Bibliografía

- [1] International Desalination Association, *Ida-desalination reuse handbook*, 11 2023.
- [2] Carmen Belén Navarro González, *Análisis experimental de la permeabilidad de las sales en módulos de membranas para desalación eficiente de agua de mar*, (2023).
- [3] Rafael González, Lourdes García, and David Sánchez, *Procedimiento de operación solmideff ccro*.
- [4] Jane Kucera, *Reverse osmosis third edition*, vol. 3, John Wiley Sons and Scrivener Publishing, 2023.
- [5] David Sánchez Martínez, Rafael González Almenara, and Lourdes García Rodríguez, *Resumen del proyecto y plan de explotación*, 2022.
- [6] Carlos Mayer, *Diferencias entre ósmosis inversa y ósmosis directa*.
- [7] Lourdes García Rodríguez, *Introducción a los mecanismos de transporte a través de una membrana ro*.
- [8] Mark Wilf, *Design consequences of recent improvements in membrane performance*, *Desalination* **113** (1997), no. 2, 157–163, Workshop on Membranes in Drinking Water Production Technical Innovations and Health Aspects.