

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de la Energía

Análisis experimental de la permeabilidad de las sales en módulos de membranas para desalación eficiente de agua de mar.

Autor: Carmen Belén Navarro González

Tutores: Rafael González Almenara

Lourdes García Rodríguez

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

Sevilla, 2023





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de la Energía

# **Análisis experimental de la permeabilidad de las sales en módulos de membranas para desalación eficiente de agua de mar.**

Autor:

Carmen Belén Navarro González

Tutores:

Rafael González Almenara

Lourdes García Rodríguez

Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado: Análisis experimental de la permeabilidad de las sales en módulos de membranas para desalación eficiente de agua de mar.

Autor: Carmen Belén Navarro González

Tutores: Rafael González Almenara  
          Lourdes García Rodríguez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal







# Agradecimientos

---

*En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, por darme la oportunidad de elegir qué y quién quiero ser. Por apoyarme siempre y nunca dejar que me rinda, por confiar en mí cuando quizás ni yo misma lo hacía y por enseñarme que todo se puede conseguir con esfuerzo.*

*A mi hermana mayor, Paula, por acompañarme y guiarme durante el camino recorrido.*

*A mi familia en general, estaré siempre agradecida con vosotros por vuestra confianza en mí, vuestro apoyo constante y vuestra compañía a cada logro conseguido.*

*A mis amigos, María, Miriam y Hugo por estar siempre juntos. Por ese 'A por todas' que tanto nos decíamos para alcanzar todas nuestras metas.*

*Gracias a mis tutores, Rafa y Lourdes por darme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto, gracias por vuestro tiempo, dedicación y confianza. Especialmente a Rafa, por guiarme con sus conocimientos y ayudarme siempre.*

*Muchas gracias a todos por acompañarme en esta etapa.*

*Carmen Belén Navarro González.*

*Sevilla, 2023.*

# Resumen

---

**E**L objetivo final de este trabajo es el análisis experimental de la permeabilidad a las sales en módulos de membranas con el objetivo de lograr una desalación eficiente del agua de mar.

En primer lugar, se hablará sobre el material y la metodología de la instalación experimental de osmosis inversa a contracorriente y de la gestión de los datos proporcionados.

En segundo lugar, se calculará de forma experimental la salinidad del agua a cada instante de tiempo en todos los ensayos de prueba, y se hará un estudio de la evolución temporal de los parámetros clave de este tipo de instalaciones como son las presiones osmóticas o la fuerza motriz del proceso. Para ello se ha desarrollado una herramienta de Excel a través de macros programadas en Visual Basic (VBA), que nos permitirá calcular y representar automáticamente todos estos valores.

En tercer lugar, se llevará a cabo un análisis experimental mediante un banco de ensayos, realizados en régimen estacionario y transitorio, donde se evaluará el comportamiento de las diferentes variables recogidas por el sensor de la instalación como son las presiones, temperaturas, caudales y conductividades eléctricas, a la entrada y salida del sistema. Además, se obtendrá de forma experimental la permeabilidad a las sales en la membrana.

Para esta instalación se ha utilizado la membrana FO4040 de Toray diseñada para la desalación de agua de mar.

Finalmente, se realizará una discusión de resultados obtenidos y se propondrán en las conclusiones determinadas aportaciones a realizar para futuros proyectos.

The ultimate goal of this work is the experimental analysis of salt permeability in membrane modules with the aim of achieving efficient desalination of seawater.

Firstly, we will discuss the material and methodology of the experimental installation of counter-current reverse osmosis and the management of the provided data.

Secondly, the salinity of the water will be experimentally calculated at each moment in all test trials, and a study of the temporal evolution of key parameters in this type of installation, such as osmotic pressures or the driving force of the process, will be conducted. For this purpose, an Excel tool has been developed using programmed macros in Visual Basic (VBA), which will allow us to automatically calculate and represent all these values.

Thirdly, an experimental analysis will be carried out using a test bench, performed under steady-state and transient conditions, where the behavior of different variables collected by the installation sensor, such as pressures, temperatures, flow rates, and electrical conductivities, at the system's inlet and outlet will be evaluated. Additionally, the salt permeability in the membrane will be experimentally obtained.

The FO4040 membrane from Toray, designed for seawater desalination, was used for this installation.

Finally, a discussion of the obtained results will be conducted, and specific contributions for future projects will be proposed in the conclusions.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>x</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xiv</b>
<b>Notación</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>19</b>
1.1 Proyecto SOLMIDIFF y MONSIEUR	19
<b>2 Instalación experimental</b>	<b>21</b>
2.1 Introducción	21
2.2 Material y método	22
2.2.1 Componentes	22
2.2.2 Instrumentación	26
2.3 Gestión de datos	29
<b>3 Herramienta de cálculo</b>	<b>31</b>
3.1 Hoja de Instrucciones.	31
3.1.1 Importación de los archivos del DAQ.	31
3.2 Cálculo experimental de la salinidad.	34
3.3 Datos ordenados y representación de gráficos.	37
<b>4 Determinación experimental de la permeabilidad de las sales en la membrana FO4040</b>	<b>40</b>
4.1 Resultado de ensayos.	40
4.1.1 Ensayo 1	42
4.1.2 Ensayo 2	45
4.1.3 Ensayo 3	48
4.1.4 Ensayo 4	51
4.1.5 Ensayo 5	54
4.1.6 Ensayo 6	57
4.1.7 Ensayo 7	60
4.1.8 Ensayo 8	63
4.1.9 Ensayo 9	66
4.2 Discusión de resultados.	69
<b>5. Conclusiones</b>	<b>71</b>
<b>Referencias</b>	<b>72</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<i>Tabla 1. Explicación nomenclaturas.</i>	41
<i>Tabla 2. Comparativa de los resultados de permeabilidades obtenidos</i>	69

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<i>Figura 1. Diagrama conceptual de la membrana de ósmosis inversa a contracorriente.</i>	21
<i>Figura 2. Válvula de esfera.</i>	22
<i>Figura 3. Válvula de regulación de presión.</i>	23
<i>Figura 4. Diagrama de procesos e instrumentación de la instalación.</i>	24
<i>Figura 5. Bomba de alimentación.</i>	25
<i>Figura 6. Bomba de alta presión.</i>	26
<i>Figura 7. Membrana Toray F4040</i>	26
<i>Figura 8. Manómetros</i>	27
<i>Figura 9. Presostato</i>	27
<i>Figura 10. Transmisor de presión.</i>	28
<i>Figura 11. Transmisor de caudal</i>	28
<i>Figura 12. Analizador de conductividad (PT100)</i>	29
<i>Figura 13. Registrador de datos MultiCon CMC-99/141.</i>	29
<i>Figura 14. Grupos y canales lógicos</i>	30
<i>Figura 15. Hoja de instrucciones de la herramienta Excel.</i>	31
<i>Figura 16. Código importación de archivos. (1)</i>	32
<i>Figura 17. Código importación de archivos. (2)</i>	33
<i>Figura 18: Valores de las constantes a y b de la ecuación de densidad del agua salina de la correlación de Sharqawy. [2].</i>	34
<i>Figura 19. Ejemplo cálculo de salinidad de la herramienta de Excel.</i>	35
<i>Figura 20: Código cálculo de salinidad</i>	36
<i>Figura 21. Valores de la constante a de la ecuación de coeficiente osmótico del agua de la correlación Sharqawy.[2].</i>	37
<i>Figura 22. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 1. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como <math>Q_{HC\_IN}</math> y <math>Q_{HC\_OUT}</math> (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como <math>Q_{LC\_IN}</math> y <math>Q_{LC\_OUT}</math></i>	42
<i>Figura 23. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 1 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; <math>T_{HC}</math>, temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; <math>T_{LC}</math>, temperatura de salida de dicha corriente</i>	42
<i>Figura 24. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 1 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; <math>P_{AlimHPP\_HC}</math>, alimentación de la bomba HPP. <math>P_{IN\_HC}</math> y <math>P_{OUT\_HC}</math>, entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.</i>	43
<i>Figura 25. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 1 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.</i>	43
<i>Figura 26. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 1. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido, <math>q_v</math>.</i>	44
<i>Figura 27. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 1. Para la corriente de alta y baja</i>	

<i>concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.</i>	44
<i>Figura 28. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 2 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; T<sub>HC</sub>, temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; T<sub>LC</sub>, temperatura de salida de dicha corriente</i>	45
<i>Figura 29. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 2. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como Q<sub>HC_IN</sub> y Q<sub>HC_OUT</sub> (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como Q<sub>LC_IN</sub> y Q<sub>LC_OUT</sub></i>	45
<i>Figura 30. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 2 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; P<sub>AlimHPP_HC</sub>, alimentación de la bomba HPP. P<sub>IN_HC</sub> y P<sub>OUT_HC</sub>, entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.</i>	46
<i>Figura 31. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 2 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.</i>	46
<i>Figura 32. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 2. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido, qv.</i>	47
<i>Figura 33. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 2. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.</i>	47
<i>Figura 34. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 3 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; T<sub>HC</sub>, temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; T<sub>LC</sub>, temperatura de salida de dicha corriente.</i>	48
<i>Figura 35. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 3. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como Q<sub>HC_IN</sub> y Q<sub>HC_OUT</sub> (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como Q<sub>LC_IN</sub> y Q<sub>LC_OUT</sub></i>	48
<i>Figura 36. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 3 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; P<sub>AlimHPP_HC</sub>, alimentación de la bomba HPP. P<sub>IN_HC</sub> y P<sub>OUT_HC</sub>, entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.</i>	49
<i>Figura 37. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 3 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.</i>	49
<i>Figura 38. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 3. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido, qv.</i>	50
<i>Figura 39. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 3. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.</i>	50
<i>Figura 40. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 4 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; T<sub>HC</sub>, temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; T<sub>LC</sub>, temperatura de salida de dicha corriente.</i>	51
<i>Figura 41. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 4. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como Q<sub>HC_IN</sub> y Q<sub>HC_OUT</sub> (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como Q<sub>LC_IN</sub> y Q<sub>LC_OUT</sub></i>	51
<i>Figura 42. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 4 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; P<sub>AlimHPP_HC</sub>, alimentación de la bomba HPP. P<sub>IN_HC</sub> y P<sub>OUT_HC</sub>, entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.</i>	52
<i>Figura 43. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 4 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.</i>	52
<i>Figura 44. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 4. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido, qv.</i>	53
<i>Figura 45. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 4. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.</i>	53

- Figura 46. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 5 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $T_{HC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión;  $T_{LC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. 54
- Figura 47. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 5. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como  $Q_{HC\_IN}$  y  $Q_{HC\_OUT}$  (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como  $Q_{LC\_IN}$  y  $Q_{LC\_OUT}$  54
- Figura 48. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 5 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $P_{AlimHPP\_HC}$ , alimentación de la bomba HPP.  $P_{IN\_HC}$  y  $P_{OUT\_HC}$ , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión. 55
- Figura 49. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 5 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida. 55
- Figura 50. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 5. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido,  $qv$ . 56
- Figura 51. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 5. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida. 56
- Figura 52. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 6 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $T_{HC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión;  $T_{LC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. 57
- Figura 53. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 6. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como  $Q_{HC\_IN}$  y  $Q_{HC\_OUT}$  (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como  $Q_{LC\_IN}$  y  $Q_{LC\_OUT}$  57
- Figura 54. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 6 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $P_{AlimHPP\_HC}$ , alimentación de la bomba HPP.  $P_{IN\_HC}$  y  $P_{OUT\_HC}$ , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión. 58
- Figura 55. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 6 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida. 58
- Figura 56. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 6. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido,  $qv$ . 59
- Figura 57. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 6. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida. 59
- Figura 58. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 7 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $T_{HC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión;  $T_{LC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. 60
- Figura 59. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 7. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como  $Q_{HC\_IN}$  y  $Q_{HC\_OUT}$  (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como  $Q_{LC\_IN}$  y  $Q_{LC\_OUT}$  60
- Figura 60. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 7 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida. 61
- Figura 61. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 7 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $P_{AlimHPP\_HC}$ , alimentación de la bomba HPP.  $P_{IN\_HC}$  y  $P_{OUT\_HC}$ , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión. 61
- Figura 62. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 7. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida. 62
- Figura 63. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 7. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido,  $qv$ . 62
- Figura 64. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 8 en los siguientes puntos. Para la corriente de



- alta presión;  $T_{HC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión;  $T_{LC}$ , temperatura de salida de dicha corriente.* 63
- Figura 65. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 8. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como  $Q_{HC\_IN}$  y  $Q_{HC\_OUT}$  (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como  $Q_{LC\_IN}$  y  $Q_{LC\_OUT}$*  63
- Figura 66. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 8 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $P_{AlimHPP\_HC}$ , alimentación de la bomba HPP.  $P_{IN\_HC}$  y  $P_{OUT\_HC}$ , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.* 64
- Figura 67. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 8 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.* 64
- Figura 68. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 8. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido,  $qv$ .* 65
- Figura 69. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 8. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.* 65
- Figura 70. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 9 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $T_{HC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión;  $T_{LC}$ , temperatura de salida de dicha corriente.* 66
- Figura 71. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 9. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como  $Q_{HC\_IN}$  y  $Q_{HC\_OUT}$  (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como  $Q_{LC\_IN}$  y  $Q_{LC\_OUT}$*  66
- Figura 72. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 9 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $P_{AlimHPP\_HC}$ , alimentación de la bomba HPP.  $P_{IN\_HC}$  y  $P_{OUT\_HC}$ , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.* 67
- Figura 73. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 9 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.* 67
- Figura 74. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 9. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido,  $qv$ .* 68
- Figura 75. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 9. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.* 68
- Figura 76. Evolución de la temperatura frente a la permeabilidad en los diferentes ensayos.* 70

# Notación

---

$A^*$	Conjugado
c.t.p.	En casi todos los puntos
c.q.d.	Como queríamos demostrar
■	Como queríamos demostrar
e.o.c.	En cualquier otro caso
e	número e
Re	Parte real
Im	Parte imaginaria
sen	Función seno
tg	Función tangente
arctg	Función arco tangente
sen	Función seno
$\sin^x y$	Función seno de $x$ elevado a $y$
$\cos^x y$	Función coseno de $x$ elevado a $y$
Sa	Función sampling
sgn	Función signo
rect	Función rectángulo
Sinc	Función sinc
$\partial y \partial x$	Derivada parcial de $y$ respecto
$x^\circ$	Notación de grado, $x$ grados.
$\Pr(A)$	Probabilidad del suceso $A$
SNR	Signal-to-noise ratio
MSE	Minimum square error
:	Tal que
<	Menor o igual
>	Mayor o igual
\	Backslash
$\Leftrightarrow$	Si y sólo si

# 1 INTRODUCCIÓN

---

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es evaluar experimentalmente un sistema de membranas de a contracorriente mediante el banco de ensayos del proyecto SOLMIDIFF, en particular se evalúa la membrana TORAY FO4040. La motivación del estudio de esta membrana es su integración en un sistema de desalación de agua de mar por ósmosis inversa para mejorar la eficiencia energética del proceso. Este proyecto se desarrolla en el en el marco de los proyectos de investigación SOLMIDIFF y MONSIEUR

Este documento se estructura en cinco capítulos, el primero que sería este, haremos una breve introducción al proyecto de investigación SOLMIDIFF Y MONSIEUR, en el segundo capítulo se comenta la instalación experimental y se explican las principales configuraciones y la membrana a utilizar.

En el tercer capítulo, aparecerá la creación de una herramienta en Excel desarrollada a través de macros para la interpretación y cálculo de los parámetros fundamentales en este tipo de instalaciones. A continuación, en el cuarto capítulo se describen y analizan los resultados de los ensayos realizados.

Finalmente, en el último capítulo se presentarán las conclusiones y posibles aportaciones para realizar en futuros proyectos de fin de grado.

## 1.1 Proyecto SOLMIDIFF y MONSIEUR

En el concepto establecido en el proyecto SOLMIDIFF se utiliza un colector de disco parabólico para recoger y concentrar la energía solar en un plano focal donde se instala la Unidad de Conversión de Energía, compuesta por un motor de microturbina de gas (MTG) y un receptor solar. El compresor de la MTG opera con aire atmosférico que se comprime y alimenta al receptor solar tras atravesar el intercambiador de calor de recuperación, llamado regenerador que es un componente opcional. Este aire, luego se expande a través de la turbina donde se produce energía para impulsar tanto el compresor como el generador eléctrico. Tras la expansión en la turbina el aire alimenta el regenerador si existe.

El sistema de fondo del concepto SOLMIDIFF consta de dos elementos. Una unidad de desalación avanzada basada en la tecnología de ósmosis inversa es impulsada por la energía eléctrica producida por la microturbina de gas. Esta unidad de ósmosis inversa produce agua dulce y una salmuera con alta concentración de sales, que se trata posteriormente en un sistema de vertido líquido nulo (ZLD, el inglés *Zero Liquid Discharge*). Ambas tecnologías, la RO avanzada y la unidad ZLD, se demostrarán experimentalmente en SOLMIDIFF.

El proyecto MONSIEUR aborda el desarrollo teórico y experimental de un sistema de producción combinada de electricidad y agua potable orientado a aplicaciones no conectadas a red, típicamente en localizaciones remotas, y con la característica exclusiva de facilitar el vertido líquido nulo. MONSIEUR se construye sobre los resultados y la instalación experimental obtenidos en el proyecto SOLMIDIFF, se abordan aspectos de la tecnología que resultan críticos para garantizar la viabilidad técnica de un sistema complejo que debe funcionar de manera autónoma a partir de un recurso energético variable. Para ello, la instalación existente se completa con una nueva turbina de gas, totalmente instrumentada y capaz de reproducir, las condiciones típicas de una instalación solar en condiciones de operación normal y en condiciones de emergencia. Además, se analizan los beneficios económicos y ambientales, y se busca crear una tecnología con especificaciones operativas y un impacto ambiental mínimo.

En la primera parte del proyecto SOLMIDIFF la lleva a cabo mi compañera María Cascajo. En su Trabajo Fin de Carrera utilizando un prototipo de módulo de membranas a escala de laboratorio, evaluará experimentalmente su comportamiento respecto al transporte de disolvente a través de las membranas.

La segunda parte del proyecto SOLMIDEFF se continuará con este Trabajo Fin de Grado donde se evaluarán:

- El comportamiento del módulo de membranas respecto al transporte de sales a través de las membranas.
- El comportamiento experimental en diversas condiciones de operación y también durante maniobras fuertemente transitorias, permitiendo así un análisis más profundo del módulo de membranas ensayado.

Además, se implementa una herramienta de simulación de la tecnología analizada en el módulo de membranas, que consiste en realizar el proceso de ósmosis inversa entre dos flujos salinos que circulan a contracorriente. El interés de este proceso es su uso como pretratamiento en plantas de desalación de agua de mar, dado que permitiría diluir el agua de mar a partir de parte del disolvente presente en la salmuera de salida de la planta. Esta dilución permitiría lograr una cierta reducción en el consumo específico de una planta de desalación.

El trabajo realizado en este proyecto es esencial para la valoración de la explotación de los resultados de los proyectos SOLMIDEFF y MONSIEUR, dado que permitirá en trabajos futuros diseñar sistemas piloto de desalación solar.

## 2 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El objetivo de este trabajo es determinar experimentalmente la permeabilidad a las sales de una membrana mediante una serie de ensayos realizados con un prototipo de módulo de membrana por la cual circulan dos corrientes salinas a contracorriente. Se trata del modelo FO4040 de uno de los líderes mundiales de fabricantes de membranas, la empresa TORAY. Con este prototipo, se realizarán ensayos en condiciones de operación tales que se producirá transferencia de disolvente acompañado de una cierta porción de sales a través de la membrana, desde el lado de la corriente de mayor concentración hasta el lado de menor concentración. Esta transferencia de materia se realiza por tanto en sentido contrario al flujo espontáneo, denominándose proceso de ósmosis inversa.

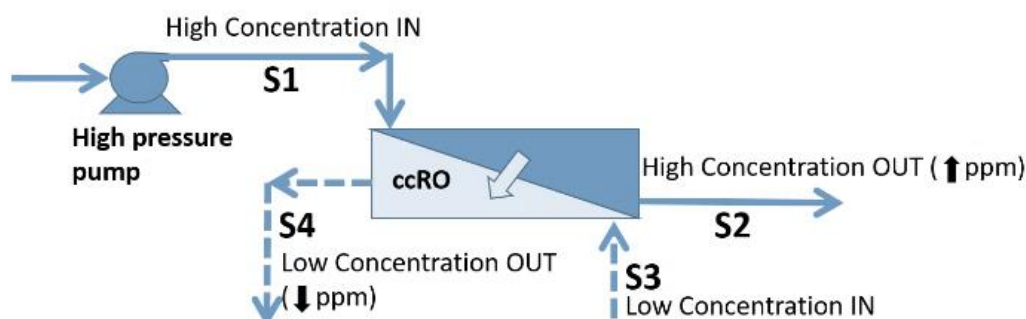
### 2.1 Introducción

El módulo de membranas FO4040 fabricado por Toray se estudia por su potencial interés como pretratamiento de procesos de desalación de agua de mar por ósmosis inversa. Este pretratamiento tendría como objetivo reducir la salinidad del agua de mar que va a desalarse en el proceso de ósmosis inversa convencional. En una planta real, circularían en un módulo tipo FO4040 las siguientes corrientes:

- El concentrado saliente del bastidor convencional de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.
- El agua de mar procedente del sistema de captación y del pretratamiento convencional, previamente a su entrada en el bastidor convencional.

Aplicando una presión adecuada, parte del disolvente acompañado de cierta porción de sales sería transferida desde el concentrado hasta el agua de mar logrando diluir el agua de mar antes de su entrada en el bastidor convencional de desalación de agua de mar. Dado que el consumo energético del proceso de desalación de agua de mar depende fundamentalmente de la concentración de la alimentación de agua de mar, existe un gran potencial de reducción del consumo energético del proceso gracias a la dilución del agua de mar.

En el siguiente diagrama (*Figura 1*) se observan de forma conceptual las diferentes corrientes que se mencionaban anteriormente, agua de mar (S3) y salmuera (S1) en la instalación experimental que se utilizará en el trabajo.



*Figura 1. Diagrama conceptual de la membrana de ósmosis inversa a contracorriente.*

- Corriente 1-2: corriente de salmuera presurizada, la cual cede una cierta cantidad de agua pura, resultando así una salmuera de mayor concentración.

- Corriente 3-4: Corriente de agua de mar (o agua salobre en su defecto) que resulta ser diluida gracias a la mezcla con el agua pura procedente de la corriente 1-2.

Cabe señalar que el proceso descrito en la figura anterior no es en sí mismo un proceso de desalación, sino un proceso de dilución de la corriente de agua de mar utilizando como recurso salmuera presurizada.

En una planta real, la bomba mostrada en la anterior figura no es necesaria puesto que la salmuera sale presurizada del bastidor convencional de desalación. Por otra parte, el agua de mar diluida sería la alimentación del bastidor convencional de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.

Considerando el eje OX a lo largo del eje del cilindro constituido por el módulo de membranas y su carcasa exterior (tubo de presión), para que se produzca un flujo de corriente con menos salinidad (permeado) desde la corriente 1-2 hasta la corriente 3-4, las condiciones de operación necesarias son, en cualquier punto x:

$$p_{s1-s2}(x) - p_{s3-s4}(x) > \Pi_{s1-s2}(x) - \Pi_{s3-s4}(x) \quad (1)$$

En la ecuación anterior,  $p_{s1-s2}(x)$  es la presión en la corriente s1-s2 dentro del módulo de membrana en un punto x del eje del cilindro. Análogo significado tiene el símbolo  $p_{s3-s4}(x)$ . Por otra parte,  $\Pi_{s1-s2}(x)$  y  $\Pi_{s3-s4}(x)$  son las correspondientes presiones osmóticas.

## 2.2 Material y método

En este capítulo, se llevará a cabo una descripción detallada de los componentes e instrumentación de la instalación. El objetivo principal es proporcionar una visión clara y completa de los elementos clave que conforman esta infraestructura y la instrumentación utilizada para su funcionamiento eficiente.

### 2.2.1 Componentes

En primer lugar, se presentarán los componentes principales de la instalación, incluyendo válvulas, bombas y módulo de membranas. Se explicará la función y el papel de cada uno de ellos, así como su interacción con el sistema en su conjunto.

- Válvulas

La instalación consta con dos tipos de válvulas, las válvulas de esfera (*Figura 2*) y las válvulas de regulación de presión (*Figura 3*)

Una válvula de esfera es un tipo de válvula que utiliza una bola perforada para controlar el flujo de fluido.



*Figura 2. Válvula de esfera.*

Las válvulas de regulación de presión son dispositivos que se utilizan para controlar y mantener la presión del fluido dentro de un sistema dentro de ciertos límites predeterminados. Estas válvulas permiten ajustar la presión de salida del fluido según las necesidades del proceso o sistema en el que se utilizan.



*Figura 3. Válvula de regulación de presión.*

La instalación consta con seis válvulas, dos de regulación en el lado de alta y baja concentración y dos de entrada y salida en el lado de alta y baja concentración. Estas desempeñan un papel esencial en el control del flujo de agua, la regulación de la presión con la finalidad de variar y fijar condiciones de operación deseadas en los diversos ensayos.

La siguiente figura muestra el esquema de la instalación experimental.

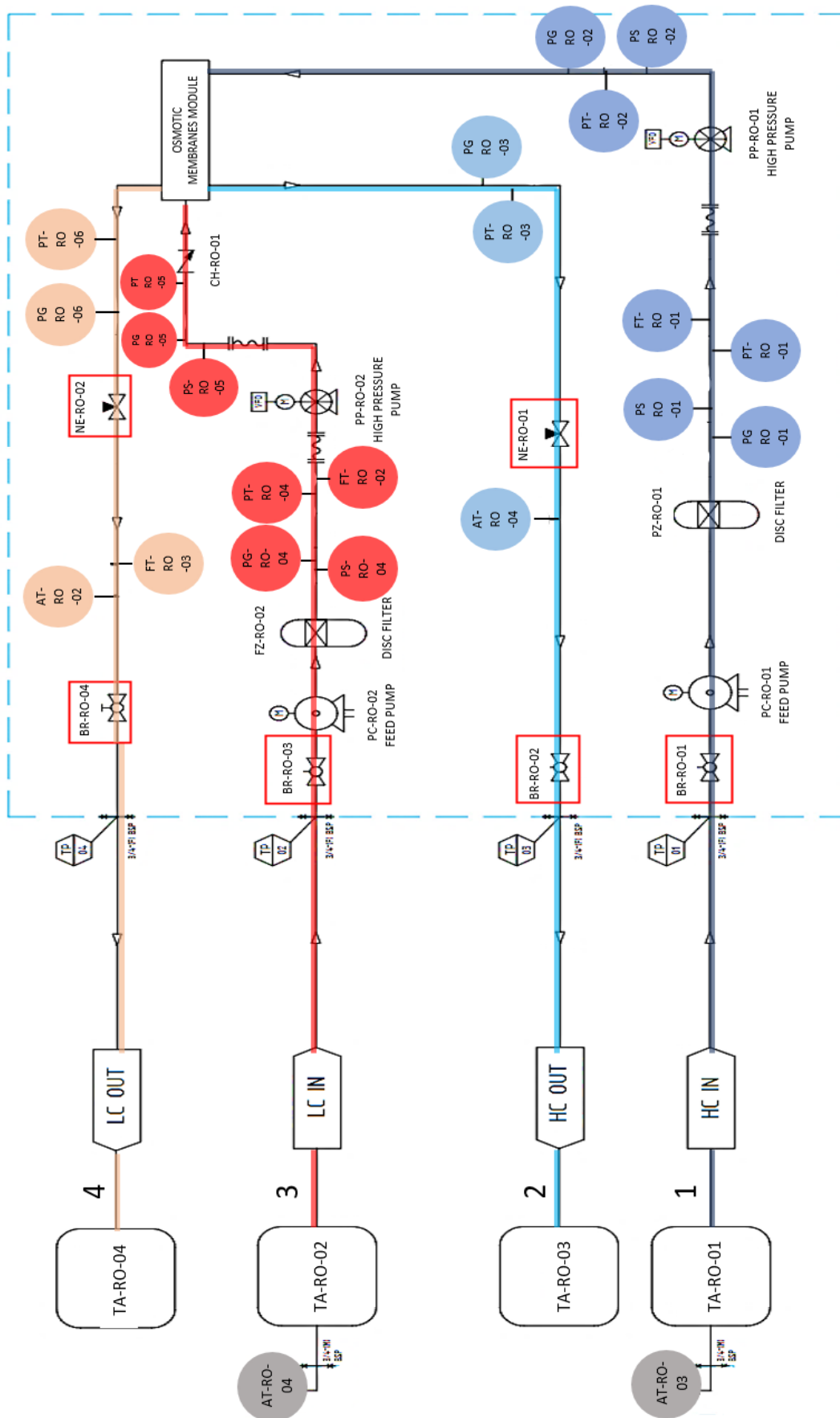


Figura 4. Diagrama de procesos e instrumentación de la instalación.



Como se puede apreciar en el diagrama de la instalación (*Figura 4*) existen cuatro corrientes, dos de entrada y dos de salida.

- ❖ La corriente 1 es la entrada a alta presión principal de agua sin tratar al sistema de ósmosis inversa. El agua proviene del depósito TA-RO-01. Antes de ingresar al sistema, es necesario un proceso previo de filtración y eliminación de sedimentos para proteger la membrana. Corresponde a la entrada de alta concentración.
- ❖ La corriente 2 es la corriente a alta presión y concentración que, tras circular a través del módulo de membranas sale con mayor concentración a la de entrada, siendo su presión igual a la de entrada menos una cierta pérdida de carga.
- ❖ La corriente 3 es la entrada de segunda corriente y corresponde a baja presión y concentración.
- ❖ La corriente 4 es la corriente de baja presión y concentración, diluida a su paso por el módulo de membranas.

En el diagrama se puede observar la diferente instrumentación y dispositivos de los que dispone la instalación los cuales serán explicados detenidamente a continuación.

#### ▪ Bombas

Las bombas de alimentación permiten transportar el agua desde los tanques de alimentación hasta la entrada del equipo, de forma que el agua llegue con presión suficiente a la aspiración de la bomba de alta presión (*Figura 5*) y baja presión (*Figura 6*) del módulo de ósmosis inversa. Las bombas que incorpora la instalación son bombas de desplazamiento positivo, por lo que, a diferencia de las bombas centrífugas, el caudal depende fundamentalmente de la frecuencia de excitación y la dependencia de la presión del sistema es despreciable.



*Figura 5. Bomba de alimentación.*



*Figura 6. Bomba de alta presión.*

- **Módulo de membrana**

Un módulo de membrana es un componente esencial en los sistemas de ósmosis inversa. Su diseño permite el paso selectivo del agua, mientras retiene las sales y los contaminantes no deseados. El módulo se compone de una carcasa, membranas semipermeables arrolladas en espiral, espaciadores, entradas y salidas de agua, y sellado adecuado para garantizar un funcionamiento eficiente y fiable del proceso. Una fotografía de los módulos de membranas utilizados, de forma cilíndrica, se puede observar en la *Figura 7*.

Durante la operación el agua con alta concentración entra a presión por un lado de la membrana, a medida que esta fluye de forma paralela al eje del cilindro. Parte de ese caudal atraviesa las membranas mezclándose con la corriente que circula al otro lado, la corriente de baja concentración. Por ambas bases del cilindro existe una salida y una entrada de modo que circulan a contracorriente, el flujo de alta presión y concentración y el flujo de baja presión y concentración.



*Figura 7. Membrana Toray F4040*

## **2.2.2 Instrumentación**

Continuaremos con la instrumentación utilizada en la instalación. Se describirán los diferentes dispositivos que se van a usar para medir, convertir y registrar las variables del proceso para luego poder transmitirlos y evaluarlos.

- **Manómetro**

Los manómetros (*Figura 8*) son instrumentos de medida de la presión de fluidos en circuitos cerrados. Son los encargados de comparar la presión atmosférica con la de dentro del circuito por donde circula el fluido. En el caso de nuestra instalación 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 la eficiencia del proceso de purificación.



*Figura 8. Manómetros*

- **Presostato**

El presostato desempeña un papel crucial 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. 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.

Los presostatos (*Figura 9*) 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.



*Figura 9. Presostato*

- **Transmisor de presión**

Un transmisor de presión (*Figura 10*) 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. Esta señal eléctrica es utilizada para monitorear la presión en un panel de control. Estos transmisores no disponen de indicador local.



*Figura 10. Transmisor de presión.*

- Transmisor de caudal

Un transmisor de caudal (*Figura 11*) 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.

En una planta de desalación por ósmosis inversa el transmisor de caudal se instala generalmente en la línea de alimentación de agua de mar o en la línea de salida del permeado. Está diseñado para resistir las condiciones y los fluidos corrosivos asociados con el proceso de ósmosis inversa.



*Figura 11. Transmisor de caudal*

- Analizador de conductividad

Los sensores utilizados para medir la conductividad para esta instalación son los inductivos debido a que se utilizan para medir la conductividad electrolítica, un parámetro analítico para determinar la salinidad del agua.

Un analizador de conductividad (*Figura 12*) es un dispositivo utilizado para medir la conductividad del agua en tiempo real.



*Figura 12. Analizador de conductividad (PT100)*

## 2.3 Gestión de datos

Para la gestión de los datos se ha utilizado el registrador de datos MultiCon CMC-99/141 (*Figura 13*). 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.



*Figura 13. Registrador de datos MultiCon CMC-99/141.*

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.

Dependiendo de las necesidades, se pueden añadir más o menos módulos. En nuestro caso tenemos conectados los sensores de caudal ( FT1, FT2, FT3), presión (PT1 , PT2, PT3, PT4, PT5, PT6) y salinidad (AT1, AT2, AT3 ,AT4) que mostrará el MultiCon CMC-99/141 en la pantalla (Figura 14 )

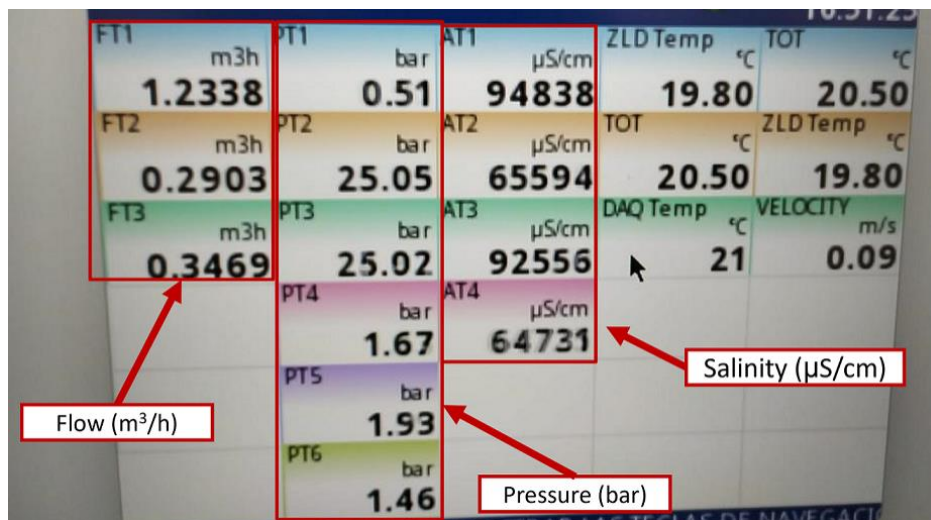


Figura 14. Grupos y canales lógicos

## 3 HERRAMIENTA DE CÁLCULO

En este capítulo exponemos el cálculo a partir de la experimentación a través de un proceso iterativo la salinidad del agua y como interpretar los valores recogidos por los sensores que nos proporciona el DAQ (data acquisition)

Para este proceso he creado una herramienta en Excel programada a través de VBA (Visual Basic for Applications), donde con tan solo pulsar una serie de botones que se encuentran en la página principal de Excel se calcularán todas las variables deseadas y se representarán de forma automática mediante gráficos.

### 3.1 Hoja de Instrucciones.

Para comenzar, en la primera hoja de la herramienta nos encontramos con la hoja de instrucciones, donde se encontrarán los pasos que hay que ir siguiendo y el orden de los botones que deberemos de pulsar para que recorra las macros deseadas. Además de contar con macros para el cálculo de las variables necesarias, contará con otra para eliminar todos los datos obtenidos en ese ensayo y gráficos representados para comenzar con otro ensayo distinto si lo deseamos.

#### 3.1.1 Importación de los archivos del DAQ.

En primer lugar, el paso más importante para que el resto de las variables en concreto la salinidad, que es lo que deseamos obtener de manera experimental, se puedan calcular y representar, tendremos que comenzar con importar los valores captados por los sensores que encontramos en la instalación y recogidos a través de un archivo de Excel en el DAQ en formato .csv, de presión (bar), temperatura (°C), conductividad (ppm) y caudal (m3h).

Para ello haremos click en los botones de importar archivos (*Figura 15*) y se abrirá una pestaña de nuestro ordenador, pidiéndonos que insertemos el archivo deseado en formato Excel. Una vez seleccionado, se irán adjuntando todos los valores en las siguientes hojas de nuestra herramienta Excel. Este proceso se repetirá cuatro veces para los cuatro archivos que queremos importar. Para cada uno de ellos tendremos su propio botón.

2. Introducir Datos DAQ, para importar los datos automáticamente de los excel generados por el DAQ de Presión, Temperatura,Flujo y Conductividad. Para ello se ha desarrollado una macro, en la que hemos establecido en la hoja en la que queremos copiarlos y en la casilla en la que queremos empezar a copiar	
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

Figura 15.Hoja de instrucciones de la herramienta Excel.

Para que este botón de importar archivos haga lo que comentaba anteriormente, se le ha asociado previamente una macro desarrollada en VBA. Esta macro consta de una estructura if/ end if, cuyo funcionamiento lo comentaré a continuación.

En primer lugar, declararemos las variables de origen y destino, que harán referencia al Excel que queremos importar y al Excel de la herramienta. Ambas variables han sido declaradas de tipo “workbook” (*Figura 16*). Guardar como “workbook” en macros nos permite automatizar la tarea de guardar archivos en Excel con todas sus funcionalidades y configuraciones personalizadas.

En segundo lugar, declararemos un comando para poder almacenar la ubicación del archivo que queremos abrir, y por ello necesitaremos declarar la variable ruta como String, lo que nos permitirá almacenar y manipular textos o cadenas de caracteres.

A continuación, le daremos valor a esa ruta con la función “GetOpenFilename”, con la finalidad de mostrar un cuadro de diálogo de selección de un archivo al usuario, donde seleccionaremos los libros de Excel referidos a datos de presión, temperatura, caudal y conductividad.

Por un lado, si la ruta no es correcta, aquí es donde aparece la función de if, o deseamos cancelar el proceso de selección nuestra macro parará.

```
Sub ImportarArchivoPresion()  
'Macro para insertar datos de presion  
  
Dim LibroDestino As Workbook  
Dim LibroOrigen As Workbook  
Dim Ruta As String  
  
Set LibroDestino = ThisWorkbook  
  
Ruta = Application.GetOpenFilename(Title:="Por favor, selecciona un archivo")  
  
If Ruta = "False" Then  
Exit Sub
```

*Figura 16. Código importación de archivos. (1)*

Por otro lado, si la ruta es correcta, para poder abrir el archivo he desarrollado un código (*Figura 17*) con la función “Workbooks.OpenText” que sirve para abrir un archivo de texto delimitado y configurar como se importan los datos en una hoja de cálculo de Excel. Los parámetros especificados controlan como se interpretan los delimitadores, el tipo de datos y las configuraciones de los campos y otros aspectos relacionados con la importación de los datos.



```

End If

Workbooks.OpenText Filename:= _
    Ruta, Origin _
    :=65001, StartRow:=1, DataType:=xlDelimited, TextQualifier:= _
    xlDoubleQuote, ConsecutiveDelimiter:=False, Tab:=True, Semicolon:=True, _
    Comma:=False, Space:=False, Other:=False, FieldInfo:=Array(Array(1, 2), _
    Array(2, 2), Array(3, 1), Array(4, 1), Array(5, 1), Array(6, 1), Array(7, 1), Array(8, 1)), _
    TrailingMinusNumbers:=True

Set LibroOrigen = Workbooks.Open(Ruta)

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

LibroOrigen.Close

End Sub

```

Figura 17. Código importación de archivos. (2)

A continuación, vamos a ver la función que tienen cada uno de estos parámetros específicos para que pueda ejecutarse el código:

- **Filename:** Especifica la ruta y el nombre del archivo de texto que se va a abrir.
- **Origin:** Especifica el origen de los datos en el archivo de texto.
- **StartRow:** Especifica la fila en la que se inicia la importación de datos en la hoja de cálculo.
- **DataType:** Especifica el tipo de datos que se va a importar. En este caso, **xlDelimited** indica que los datos están separados por un delimitador, como comas, puntos y comas, o tabulaciones.
- **TextQualifier:** Especifica el carácter utilizado para calificar o delimitar el texto. En este caso, **xlDoubleQuote** indica que se utilizan comillas dobles.
- **ConsecutiveDelimiter:** Especifica si se deben considerar los delimitadores consecutivos como uno solo. En este caso, se establece en **False**, lo que significa que los delimitadores consecutivos se tratarán como campos vacíos.
- **Tab, Semicolon, Comma, Space y Other:** Estos parámetros especifican el delimitador utilizado en el archivo de texto. En tu código, se establece **Tab** en **True** y **Semicolon, Comma** y **Space** en **False**, lo que significa que se utiliza un tabulador como delimitador.
- **FieldInfo:** Este parámetro permite especificar información adicional sobre cómo se deben interpretar los campos en el archivo de texto. En tu código, se proporciona una matriz de configuraciones para cada campo. Por ejemplo, **Array (1, 2)** indica que el primer campo se interpreta como texto, y **Array (2, 2)** indica que el segundo campo también se interpreta como texto.
- **TrailingMinusNumbers:** Especifica si los números precedidos por un signo negativo deben tratarse como números negativos. En tu código, se establece en **True**.

Por último, ya solamente nos quedaría especificar que hoja es la que queremos copiar, en nuestro caso el archivo de Excel que queremos importar tiene una única hoja, pero en el caso en el que tuviera varias y quisiéramos copiar solo una en concreto lo especificaríamos con el número entre paréntesis continuo a la palabra **sheets**, en la antepenúltima línea del código como podemos ver en la figura 17. Si continuamos con la línea del código indicada, vemos como en **sheets** encontramos un **3**, eso significa que lo queremos copiar en la hoja 3 de nuestra herramienta.

Finalmente, la macro terminará de ejecutarse, y podremos pasar al siguiente paso en la hoja de instrucciones.

### 3.2 Cálculo experimental de la salinidad.

En este apartado de la herramienta, que se encontrará en otra hoja diferente a las de las instrucciones, lo que queremos es calcular la salinidad de forma experimental, para ello necesitamos conocer el valor de la conductividad eléctrica en micro Siemens por cm ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Este parámetro, como he comentado antes se mide con los sensores en la instalación a cada segundo del ensayo y los obtendremos recogidos en un libro de Excel, que nos lo proporcionará el DAQ. Este es uno de los archivos que importaremos en nuestra herramienta como veíamos anteriormente.

A continuación, una vez tenemos la conductividad eléctrica importada, procederemos al cálculo de la concentración de sales en partes por millón (ppm), para ello emplearemos la siguiente ecuación:

$$C = (0.0000016291 * k + 0.5363719781) * k \quad (1)$$

- C, concentración de sales en el agua ( $\text{mg}/\text{L}$ )
- k, conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

Esta ecuación es una recta de regresión lineal que se ha determinado experimentalmente haciendo ensayos con una balanza de precisión, y los valores numéricos que podemos ver son siempre constantes.

Una vez obtenidas las concentraciones a cada segundo del ensayo lo que queremos es llegar al cálculo de la salinidad.

En primer lugar, necesitaremos conocer la densidad, cuya ecuación y condiciones de operación podemos consultarlas en el artículo Sharqawy de propiedades termofísicas del agua de mar [2].

$$\rho_{sw} = (a_1 + a_2t + a_3t^2 + a_4t^3 + a_5t^4) + (b_1S + b_2St + b_3St^2 + b_4St^3 + b_5S^2t^2) \quad (2)$$

$$a_1 = 9.999 \times 10^2, a_2 = 2.034 \times 10^{-2}, a_3 = -6.162 \times 10^{-3}, a_4 = 2.261 \times 10^{-5}, a_5 = -4.657 \times 10^{-8}, \\ b_1 = 8.020 \times 10^2, b_2 = -2.001, b_3 = 1.677 \times 10^{-2}, b_4 = -3.060 \times 10^{-5}, b_5 = -1.613 \times 10^{-5}$$

*Figura 18: Valores de las constantes a y b de la ecuación de densidad del agua salina de la correlación de Sharqawy. [2].*

- $\rho_{sw}$ , densidad del agua salada ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- t, temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). Para poder utilizar esta expresión tiene que estar comprendida entre  $0^{\circ}\text{C} < t < 180^{\circ}\text{C}$ .
- S, salinidad del agua ( $\text{kg}/\text{kg}$ ). Para poder utilizar esta expresión tiene que estar comprendida entre  $0 \text{ kg}/\text{kg} < S < 0.16 \text{ kg}/\text{kg}$ .
- Margen de error:  $\pm 0.1\%$

En esta ecuación las variables de a y b son constantes conocidas al igual que la temperatura que también es conocida proporcionada por los sensores. Sin embargo, tanto la densidad como la salinidad son variables desconocidas que deseamos calcular.

Como podemos ver necesitamos de otra ecuación que nos permita el cálculo de ambas propiedades. Para ello utilizaremos la ecuación referida a la salinidad:

$$S = \frac{C}{1000 * \rho_{sw}} \quad (3)$$

- $\rho_{sw}$ , densidad del agua salada ( $\text{kg/m}^3$ ), función de S y T.
- S, salinidad del agua ( $\text{kg/kg}$ )
- C, concentración de sales ( $\text{mg/L}$ )

Gracias a esa expresión podemos formar ya un sistema de ecuaciones donde la densidad es función de la salinidad y viceversa.

Para agilizar el cálculo de este sistema de ecuaciones que implica llevar a cabo un proceso iterativo bastante largo y teniendo en cuenta la cantidad de veces que necesitaríamos resolverlo por cada ensayo, se ha desarrollado una macro que nos permitirá resolverlo de manera rápida, sencilla y sin posibilidad de error.

En primer lugar, uní las dos ecuaciones dejando una sola incógnita que sería la de la salinidad e iguale la ecuación anterior a 1, como podemos ver a continuación.

$$1 = \frac{C}{1000 * \rho_{sw} * S} \quad (4)$$

Gracias a esto y a la función de análisis de hipótesis que podemos encontrar en la barra de herramientas de Excel, buscas un objetivo y le das el valor que desees.

	P	Q	R	S	T	U
1	Salinidad 1[kg/kg]	Salinidad 2[kg/kg]	Salinidad 3[kg/kg]	Salinidad 4[kg/kg]	f(s1)	f(s2)
5	0,049894143	0,037697747	0,043466481	0,034653564	0,999988	1,000715
2	0,049890494	0,037686739	0,043460932	0,034651883	0,999987	1,000731
7	0,049891729	0,037688881	0,043460932	0,034663272	0,999987	1,000758
3	0,049851911			0,03467359	0,999982	1,000758
3	0,049837289			0,034671908	0,999998	1,000752
7	0,049806783			0,034665561	0,999978	1,000788
7	0,04980253			0,034656774	0,999977	1,00079
4	0,049779315			0,03466388	0,999976	1,000758
3	0,049782979			0,034668924	0,999976	1,000777
3	0,049777482			0,034643706	0,999976	1,000771
5	0,049759154			0,034647068	0,999975	1,00081
1	0,049749985			0,034650429	0,999974	1,000835
	0,049737144			0,034638664	0,999974	1,000835
5	0,049720269	0,037605847	0,043462782	0,034641797	0,999974	1,000852

Figura 19. Ejemplo cálculo de salinidad de la herramienta de Excel.

En este ejemplo podemos ver como definimos una celda objetivo, esta celda se corresponde con f(s1), que es donde hemos impuesto la ecuación anterior, y le damos el valor de 1. Para ello solo va a poder variar un único valor que será el de la salinidad. De esta forma Excel probará con todos los números comenzando desde cero para que esta solución se cumpla, y cuando lo haga nos mostrará su valor.

Como podemos comprobar hay veces en las que el valor de la ecuación que es el expresado en la columna T de

la imagen no es uno, esto se debe a un mínimo porcentaje de error. Si el valor de nuestra salinidad estuviera expresado con más decimales este error se iría acercando cada vez más a cero.

Cada ensayo cuenta con cuatro conductividades eléctricas, es decir, dos en la entrada y salida de alta concentración y otras dos en la entrada y salida de baja concentración además de recoger valores diferentes de este parámetro a cada segundo, por lo tanto, desarrolle una macro para poder calcular este proceso para cada uno de estos valores. (Figura 20)

```
Dim LastRow As Long
Dim i As Long
LastRow = ActiveSheet.Cells(Rows.Count, 16).End(xlUp).Row
For i = 2 To LastRow

    Sheets("Cálculo salinidad").Select
    Range("T" & i).Select
    Application.CutCopyMode = False
    Application.CutCopyMode = False
    Application.CutCopyMode = False
    Range("T" & i).GoalSeek Goal:=1, ChangingCell:=Range("P" & i)

Next
```

*Figura 20: Código cálculo de salinidad*

1. En primer lugar, declaré las variables **LastRow** y **i** como tipo de datos Long. **LastRow** se utilizará para almacenar el número de la última fila en una hoja de cálculo, ya que los ensayos pueden ser de extensiones variables e **i** que se utiliza como contador del bucle.
2. **LastRow = ActiveSheet.Cells(Rows.Count, 16).End(xlUp).Row**: Esta línea determina el número de la última fila en la hoja de cálculo activa. **Rows.Count** devuelve el número total de filas en la hoja de cálculo, y **ActiveSheet.Cells(Rows.Count, 16).End(xlUp).Row** encuentra la última fila en la columna 16 recorriendo hacia arriba desde la última fila de la hoja de cálculo. La columna 16 hace referencia a la columna P, es decir, donde comenzamos a calcular la salinidad.
3. **For i = 2 To LastRow**: Esta línea inicia un bucle **For** que se ejecutará desde el valor 2 hasta el valor de **LastRow**. Esto significa que el bucle se ejecutará para cada número de fila desde la fila 2 hasta la última fila en la columna 16.
4. **Application.CutCopyMode = False**: Estas líneas desactivan el modo de cortar/copiar en la aplicación de Excel. No es necesario en este caso, ya que no se realiza ninguna operación de cortar o copiar.
5. **Range("T" & i).GoalSeek Goal:=1, ChangingCell:=Range("P" & i)**: Esta línea realiza la operación de búsqueda de objetivo. Establece la celda en la columna T de la fila actual del bucle como la celda objetivo con un valor objetivo de 1. La celda en la columna P de la misma fila se establece como la celda que se cambiará durante la búsqueda del objetivo. En resumen, está ejecutando la búsqueda de objetivo que comentaba anteriormente.

Finalmente, en la hoja de instrucciones se encontrará un botón con esta macro asociada para que este proceso comience a ejecutarse de manera automática sin necesidad de abrir el código.

### 3.3 Datos ordenados y representación de gráficos.

Finalmente llegamos a la última página de la herramienta de Excel, en la que encontraremos todos los valores calculados anteriormente ordenados además de otras propiedades que veremos a continuación.

Además de estos cálculos, nos encontraremos con la representación gráfica de algunos parámetros con respecto de otros, por lo que podremos ver su evolución temporal y comportamiento, hacer comparativas entre ellos y ver la posible relación que pueden tener y así sacar nuestras propias conclusiones sobre el ensayo en transitorio.

En primer lugar, vamos a ir viendo uno a uno los nuevos parámetros que hemos calculado que serán clave para poder conocer mejor el comportamiento del ensayo y ver si estos valores están dentro del rango deseado.

1. En primer lugar, comenzaremos con la resolución del coeficiente osmótico. El coeficiente osmótico es una medida de la capacidad de una sustancia para desplazar el agua a través de una membrana semipermeable debido a las diferencias de concentración. Para calcularla hemos utilizado la siguiente ecuación (Figura 21) proporcionada por el artículo Sharqawy de propiedades termofísicas del agua de mar [2].

$$\varphi = a_1 + a_2t + a_3t^2 + a_4t^4 + a_5S + a_6St + a_7St^3 + a_8S^2 + a_9S^2t + a_{10}S^2t^2 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= 8.9453 \times 10^{-1}, a_2 = 4.1561 \times 10^{-4}, a_3 = -4.6262 \times 10^{-6}, a_4 = 2.2211 \times 10^{-11} \\ a_5 &= -1.1445 \times 10^{-1}, a_6 = -1.4783 \times 10^{-3}, a_7 = -1.3526 \times 10^{-8}, a_8 = 7.0132 \\ a_9 &= 5.696 \times 10^{-2}, a_{10} = -2.8624 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Figura 21. Valores de la constante  $a$  de la ecuación de coeficiente osmótico del agua de la correlación Sharqawy.[2].

- $t$ , temperatura (°C). Para poder utilizar esta expresión tiene que estar comprendida entre  $0^\circ\text{C} < t < 200^\circ\text{C}$ .
- $S$ , salinidad del agua (kg/kg). Para poder utilizar esta expresión tiene que estar comprendida entre  $10 \text{ g/kg} < S < 120 \text{ g/kg}$ .
- Margen de error:  $\pm 1.4\%$

Al tener cuatro salinidades diferentes, entrada y salida de alta y baja concentración, será necesario calcular cuatro coeficientes osmóticos diferentes con sus respectivas temperaturas, la temperatura de alta y la de baja concentración. Este parámetro tiene unidades de presión.

2. En segundo lugar, continuaremos con uno de los parámetros más interesantes a conocer en este tipo de instalaciones de desalación de agua salina. Este parámetro es la presión osmótica.

La presión osmótica es una presión ejercida por un solvente puro o una solución cuando se encuentra separado por una membrana semipermeable de una solución con mayor concentración. En un proceso de ósmosis, el solvente se desplaza desde una solución de menor concentración hacia una de mayor concentración a través de la membrana semipermeable.

La presión osmótica está relacionada con el coeficiente osmótico, entre otros parámetros, y puede ser calculada utilizando la siguiente expresión:

$$\Pi(t, S) = \varphi * \rho_{sw} * R * t * 2 * \frac{S}{M_s * (1-S)} \quad (6)$$

- $\Pi(t, S)$ , presión osmótica (bar).
- $\varphi$ , coeficiente osmótico.
- $\rho_{sw}$ , densidad del agua de mar (mg/L)
- R, constante universal de gases de valor 8.314472 (J/(mol.K))
- t, temperatura (K)
- S, salinidad del agua (mg/kg)
- $M_s$ , masa molar aparente de las sales del agua de mar, con valor de 0.062808 (kg/mol)

Al igual que ocurría anteriormente, al tener cuatro densidades diferentes, cuatro salinidades y dos temperaturas en el lado de alta y baja presión, también tendremos cuatro valores de presiones osmóticas por cada segundo del ensayo a la entrada y salida del lado de alta concentración y a la entrada y salida del lado de baja concentración. Este es uno de los parámetros clave que representaremos gráficamente de cada ensayo como veremos en el siguiente capítulo.

3. En tercer lugar, otro parámetro también muy importante a conocer en este proceso es la NDP (Net Driving Pressure), fuerza motriz del proceso.

La NDP, está directamente relacionada con la presión aplicada sobre la solución de mayor concentración para forzar el paso del solvente a través de una membrana semipermeable hacia la solución de menor concentración. En la ósmosis inversa, a diferencia de la ósmosis natural, se invierte el flujo del solvente, lo que requiere una presión externa mayor que la diferencia de presión osmótica para lograr este efecto.

Esta variable la calcularemos como una diferencia de presiones.

Como podemos ver en la figura 4 del diagrama de la instalación, tenemos dos presiones tanto de alimentación como osmótica en el lado de alta y otras dos en el lado de baja, por lo que, según la siguiente ecuación, tendremos que calcular dos fuerzas motrices del proceso, la de entrada y la de salida.

$$NDP = [(P_{HC} - P_{LC}) - (\pi_{HC} - \pi_{LC})] \quad (7)$$

- $P_{HC}$ , presión en el lado de alta concentración (bar)
- $P_{LC}$ , presión en el lado de baja concentración (bar)
- $\pi_{HC}$ , presión osmótica en el lado de alta concentración (bar)
- $\pi_{LC}$ , presión osmótica en el lado de baja concentración (bar)

4. En cuarto lugar, calcularemos el caudal transferido mediante un balance de materia. Como bien comentaba anteriormente uno de los archivos a importar era el del caudal. Pues para calcular el caudal transferido de agua tan solo habrá que hacer la diferencia de caudales entre la entrada y salida. En este caso se ha hecho con el caudal de baja concentración, pero se ha comprobado que haciéndolo con el de alta, sale el mismo resultado.

$$q_{Vw} = Q_{LC\_OUT} - Q_{LC\_IN} \quad (8)$$

- $q_{Vw}$ , caudal transferido ( $m^3/h$ )
- $Q_{LC\_OUT}$ , caudal de salida en la corriente de baja concentración ( $m^3/h$ )
- $Q_{LC\_IN}$ , caudal de entrada en la corriente de baja concentración ( $m^3/h$ )

Como podemos ver, este balance de materia esta aplicado con caudales volumétricos, esto es porque estamos asumiendo que la densidad es constante e iguales para todos. Para el cálculo del caudal de agua transferida, se ha hecho a través de una aproximación, es decir, se ha despreciado la presencia de sales, ya que su paso es muy pequeño. Por lo tanto, identificamos que el caudal volumétrico de permeado es igual al caudal volumétrico de agua.

5. En último lugar, calculamos el caudal de sales transferidas. La cantidad de sales transferidas depende de varios factores, el gradiente de concentración de las sales a ambos lados de la membrana y las características de la membrana, que a su vez dependen de la presión y la temperatura. Para poder calcularla, haremos la diferencia entre el caudal por la concentración de salida menos el caudal por la concentración de entrada. En nuestro caso lo hemos hecho con la corriente de baja concentración, pero al igual que antes, obtendríamos el mismo valor con cualquiera de las dos corrientes que decidamos coger.

$$q_{sal\_transfer} = Q_{LC\_OUT} * C_{LC\_OUT} - Q_{LC\_IN} * C_{LC\_IN} \quad (9)$$

- $q_{sal\_transfer}$ , caudal de sales transferidas ( $g/h$ )
- $Q_{LC\_OUT}$ , caudal de salida en la corriente de baja concentración ( $m^3/h$ )
- $C_{LC\_OUT}$ , concentración en el caudal de salida de la corriente de baja concentración ( $ppm=mg/L=g/m^3$ )
- $Q_{LC\_IN}$ , caudal de entrada en la corriente de baja concentración ( $m^3/h$ )
- $C_{LC\_IN}$  concentración en el caudal de entrada de la corriente de baja concentración ( $ppm=mg/L=g/m^3$ )

Finalmente, para concluir este capítulo, con todos los parámetros tanto los obtenidos por los sensores como los calculados, crearemos una tabla dinámica para representar mediante gráficos y de forma automática las variables que deseemos frente a otras. Estos gráficos los veremos más en detalle en el siguiente capítulo con los resultados de cada ensayo individual.

Como conclusión, gracias a la creación de esta herramienta hemos automatizado los cálculos matemáticos de la variable clave de nuestro tfg, el valor experimental de la salinidad del agua, además de otras propiedades características de este proceso de ósmosis inversa y finalmente la representación gráfica del comportamiento del ensayo. Gracias a esto agilizaremos el trabajo y podremos evaluar de manera clara y sencilla tantos ensayos como queramos realizar.

## 4 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA PERMEABILIDAD DE LAS SALES EN LA MEMBRANA FO4040

---

EN este capítulo calcularemos de manera experimental también al igual que la salinidad, la permeabilidad de las sales a la membrana y para ello utilizaremos la segunda ecuación de transporte.

Para la determinación de este parámetro, se ha utilizado en la instalación una membrana muy pequeña, de unos 3m<sup>2</sup> de superficie, por lo tanto, la variación de salinidad en el canal de alta concentración (HC), va a ser pequeña, al igual que la variación de salinidad en el canal de baja concentración (LC). Es por ello por lo que tomaremos el promedio de  $S_{F-C}$ , que es la fuente de permeado, como la aproximación de la media aritmética de salinidades en el canal de alta concentración, HC. Esta misma aproximación la consideraremos para las salinidades del canal de baja concentración, LC.

De modo que:

$$q_s = L_s * A * (S_{HC} - S_{LC}) \quad (10)$$

- $q_s$ , caudal transferido de sales transferidas (g/h)
- $A$ , área de la membrana (m<sup>2</sup>)
- $S_{HC}$ , promedio de salinidades en el canal de alta concentración (g/L)
- $S_{LC}$ , promedio de salinidades en el canal de baja concentración (g/L)
- $L_s$ , permeabilidad de las sales a la membrana (L/hm<sup>2</sup>)

### 4.1 Resultado de ensayos.

A continuación, vamos a ver los diferentes ensayos cuyo objetivo ha sido tanto evaluar la operación en régimen estacionario como en transitorio. Analizaremos los resultado del comportamiento y evolución temporal de los parámetros más característicos.

En un ensayo en estado transitorio, a diferencia que en estacionario, la instalación de ósmosis inversa se somete a cambios en las condiciones de operación de forma intencional. Se pueden aplicar variaciones en la presión, el caudal de alimentación o la concentración de las soluciones de manera controlada. Estos cambios pueden simular condiciones reales de operación, como fluctuaciones en la demanda de agua o variaciones en la calidad del agua de alimentación. Los ensayos en estado transitorio permiten evaluar el comportamiento de la instalación de ósmosis inversa frente a cambios bruscos en las condiciones de operación y determinar su capacidad de respuesta y adaptación.

A continuación, en la siguiente tabla se muestra la relación que existe entre las diferentes nomenclaturas para facilitar la comprensión de los datos obtenidos.



Etiqueta plano	Descripción	Nomenclatura
PT- RO - 01	Presión alimentación HPP	P_AlimHPP_HC
PT - RO - 02	Presión entrada membrana	P_IN_HC
PT - RO - 03	Presión salida membrana	P_OUT_HC
PT- RO - 04	Presión alimentación LPP	P_AlimHPP_LC
PT - RO - 05	Presión entrada membrana	P_IN_LC
PT - RO - 06	Presión salida membrana	P_OUT_LC
FT - RO - 01	Corriente de entrada HC	Q_IN_HC
-	Corriente de salida HC (Calculada)	Q_OUT_HC
FT - RO - 02	Corriente de entrada LC	Q_IN_LC
FT - RO - 03	Corriente de salida LC	Q_OUT_LC
THCout	Temperatura de HC a la salida	T_HC
TLCout	Temperatura de LC a la salida	T_LC

Tabla 1.Explicación nomenclaturas

Como comentaba anteriormente, se representará el comportamiento de los parámetros más característicos de la instalación de todos los ensayos realizados. Cada ensayo contiene las figuras de los valores recogidos directamente de la instalación, como son el caudal, temperatura y las presiones, además de la representación de las salinidades calculadas mediante la herramienta, una figura comparativa donde podremos observar la dependencia que existe entre el caudal de agua transferido y la fuerza motriz del proceso en ambos canales de la instalación y las presiones osmóticas.

Todos los ensayos se han realizado con el objetivo de tener una presión de baja de 2.5 bar y una presión de alta de 25 bar, en régimen estacionario, veremos como en régimen transitorio esta variable podrá verse modificada.

### 4.1.1 Ensayo 1

Se muestran a continuación diversas figuras correspondientes a resultados del ensayo 1.

Fecha	Duración
24-03-2023	39:50 minutos

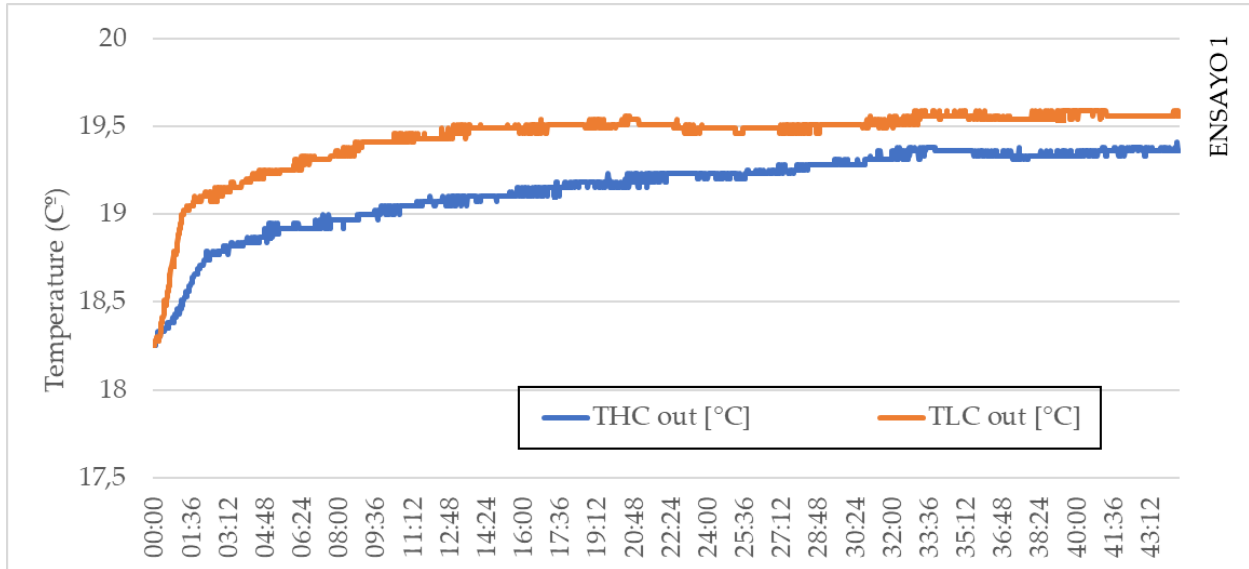


Figura 23. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 1 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $T_{HC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión;  $T_{LC}$ , temperatura de salida de dicha corriente

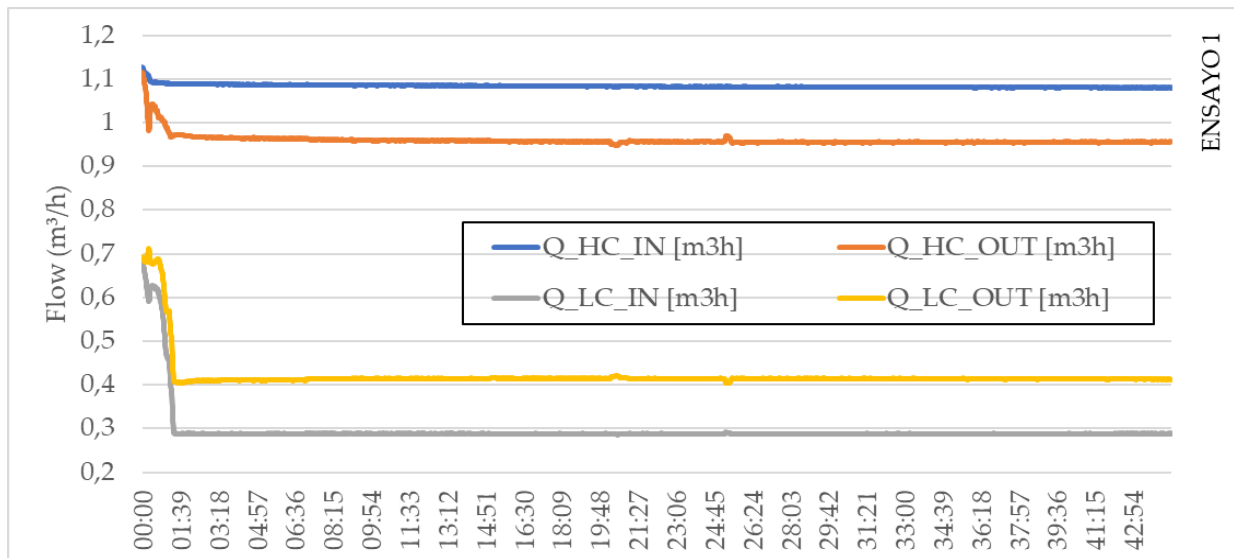


Figura 22. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 1. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como  $Q_{HC\_IN}$  y  $Q_{HC\_OUT}$  (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como  $Q_{LC\_IN}$  y  $Q_{LC\_OUT}$

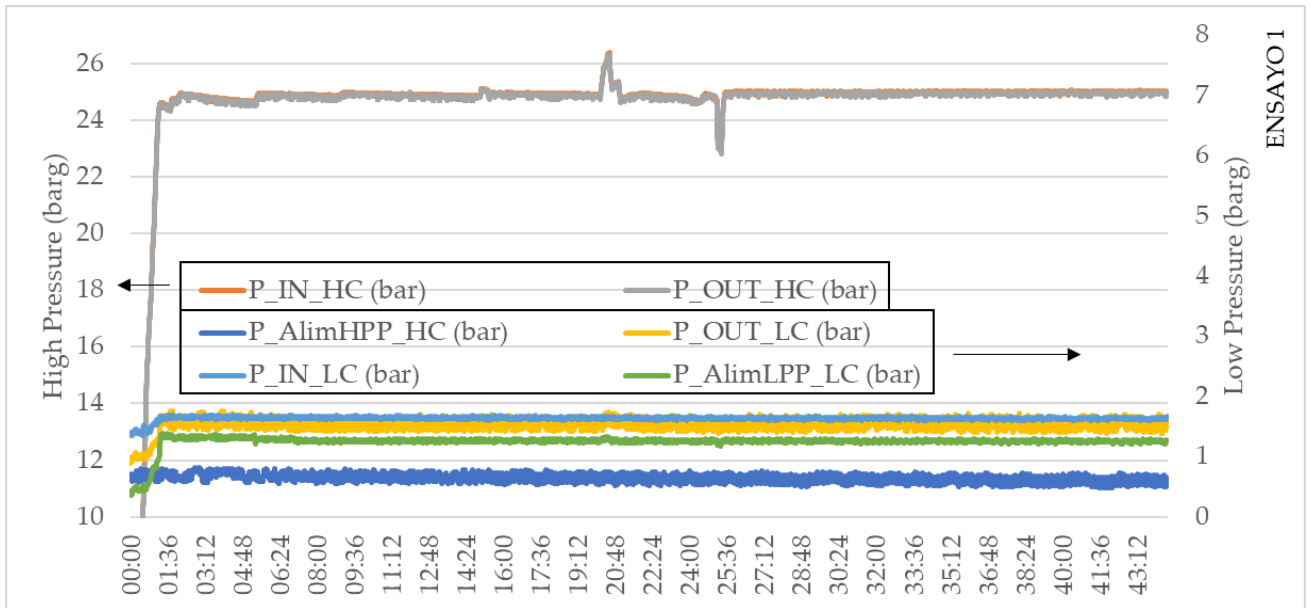


Figura 24. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 1 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; P\_AlímHPP\_HC, alimentación de la bomba HPP. P\_IN\_HC y P\_OUT\_HC, entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.

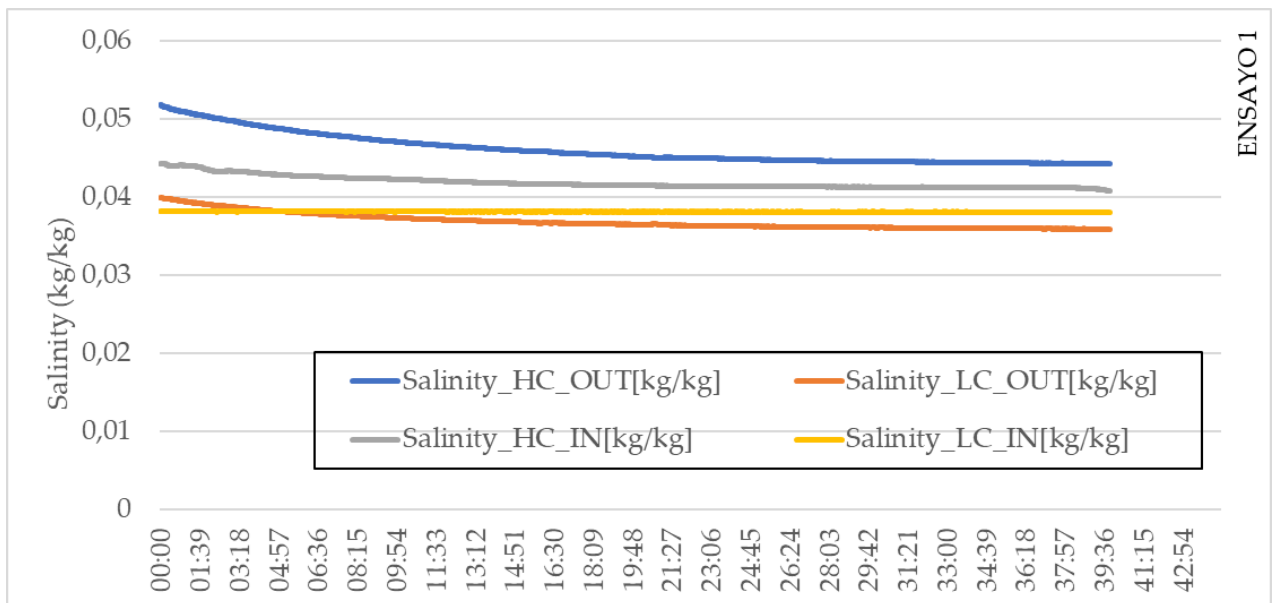


Figura 25. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 1 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.

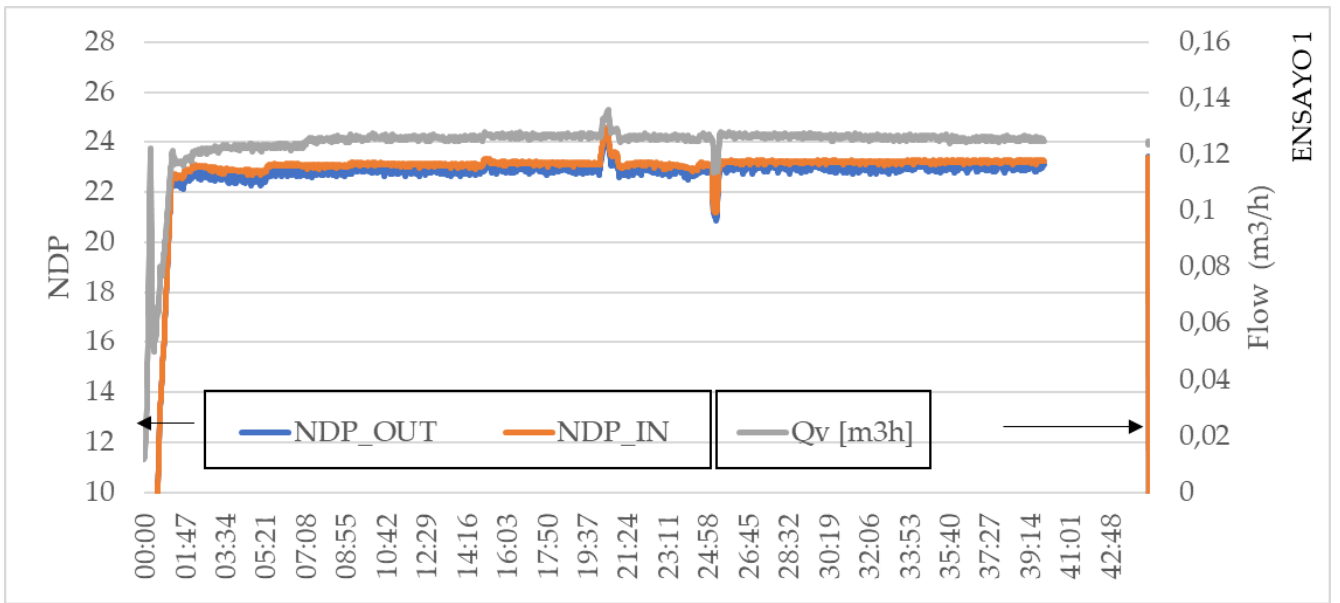


Figura 26. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 1. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido,  $q_v$ .

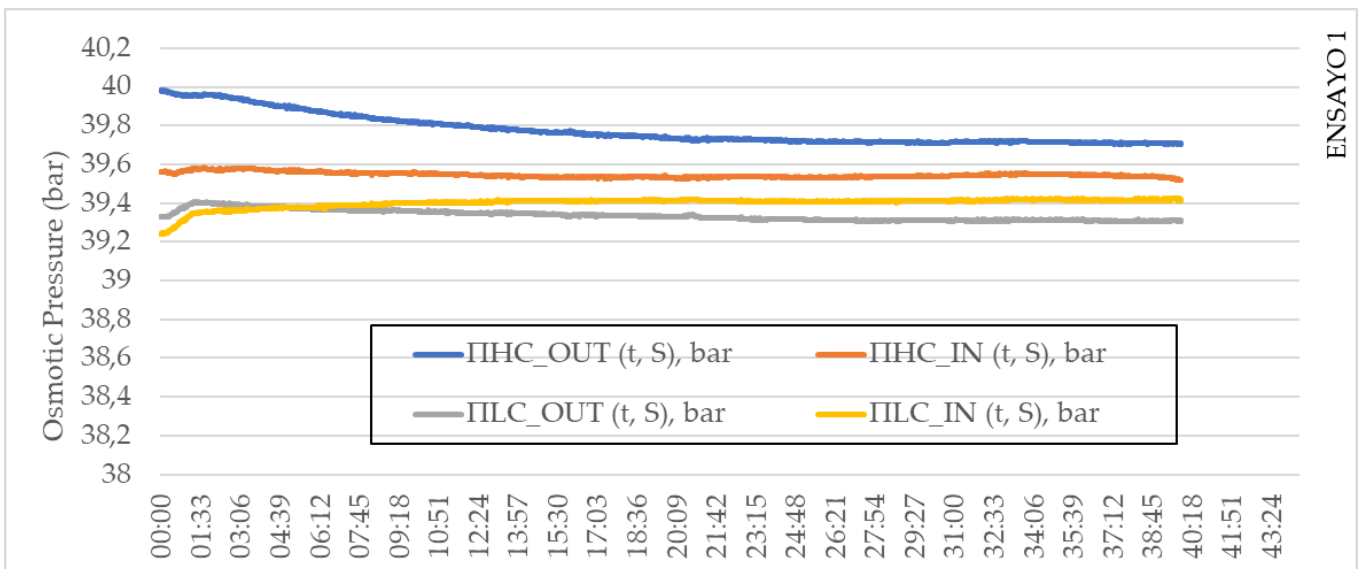


Figura 27. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 1. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.

## 4.1.2 Ensayo 2

Se muestran a continuación diversas figuras correspondientes a resultados del ensayo 2.

Fecha	Duración
28-03-2023	51:00 minutos

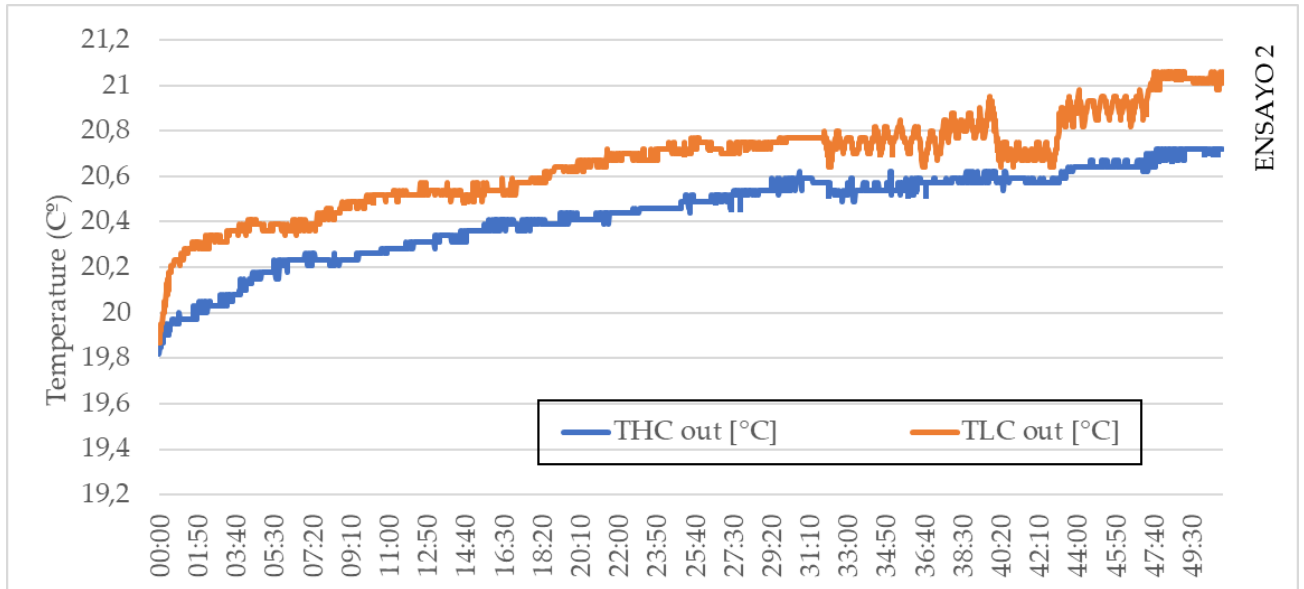


Figura 28. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 2 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $T_{HC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión;  $T_{LC}$ , temperatura de salida de dicha corriente

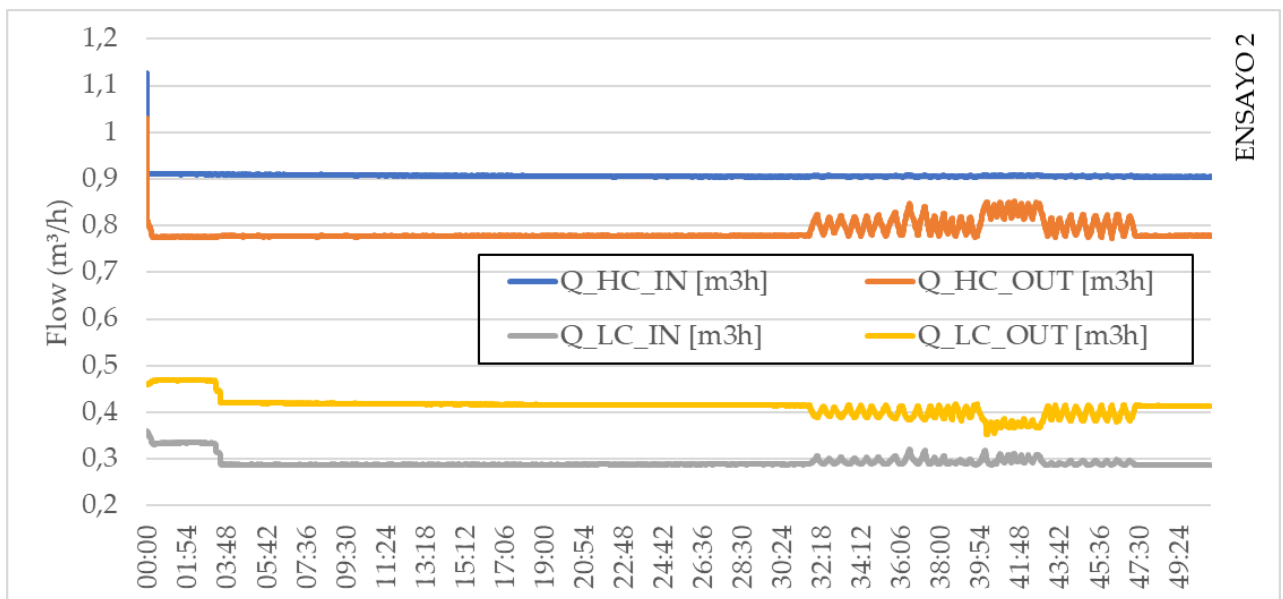


Figura 29. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 2. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como  $Q_{HC\_IN}$  y  $Q_{HC\_OUT}$  (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como  $Q_{LC\_IN}$  y  $Q_{LC\_OUT}$

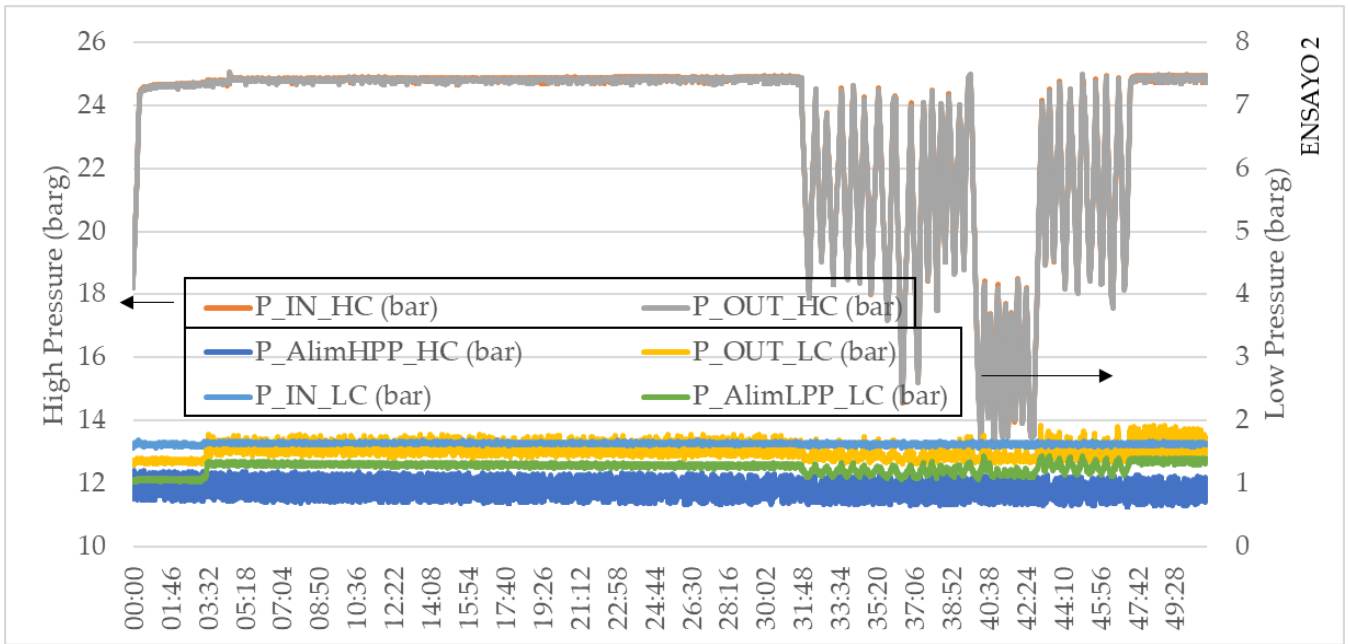


Figura 30. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 2 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $P_{AlímHPP\_HC}$ , alimentación de la bomba HPP.  $P_{IN\_HC}$  y  $P_{OUT\_HC}$ , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.

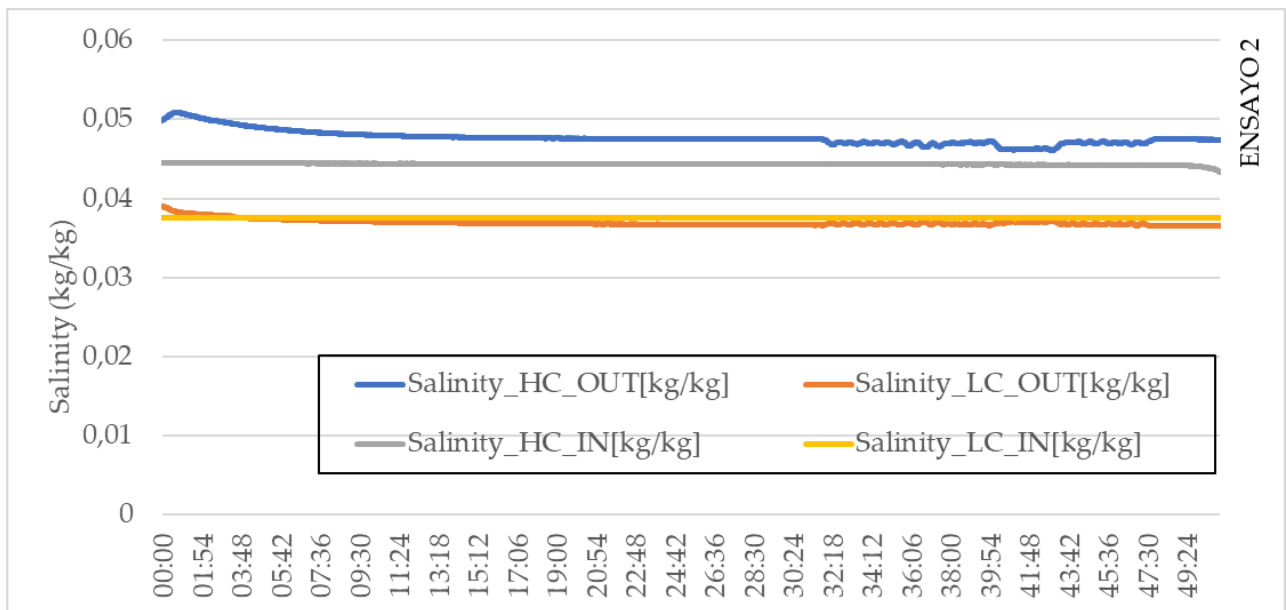


Figura 31. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 2 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.

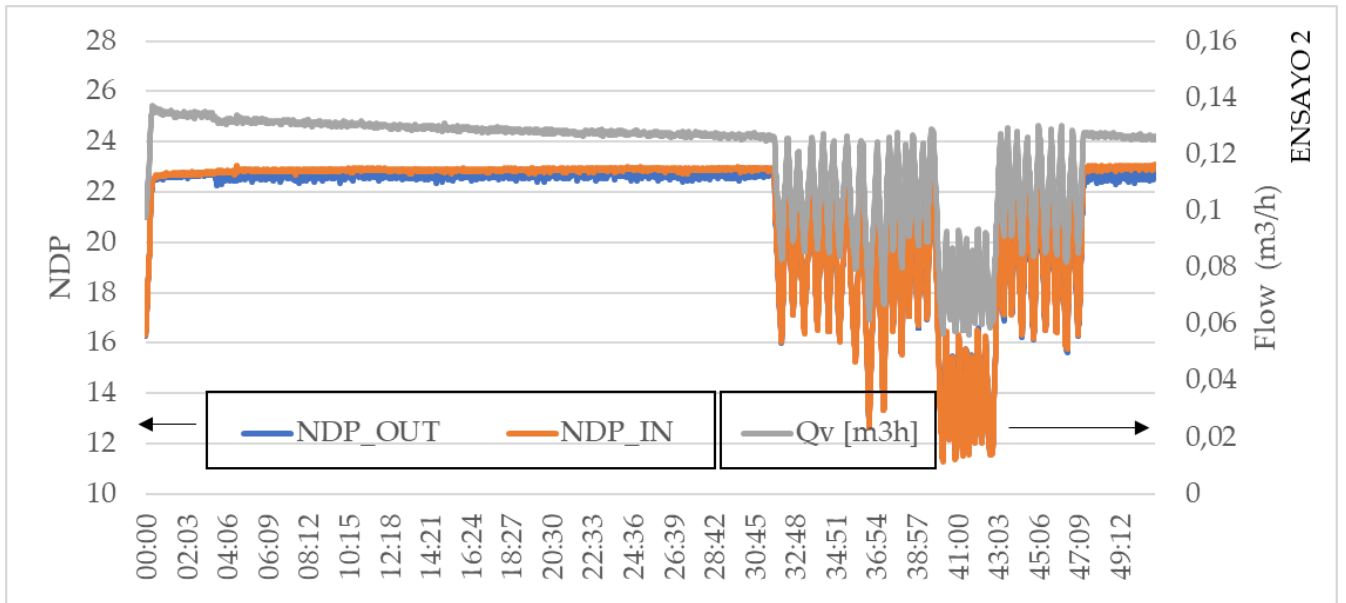


Figura 32. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 2. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido,  $q_v$ .

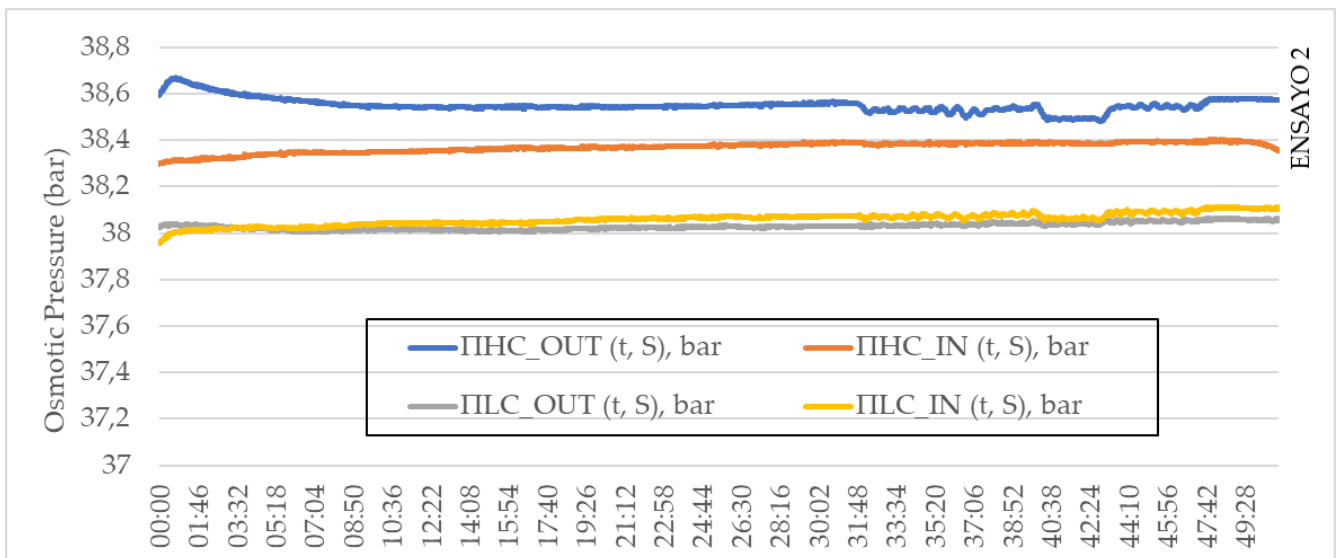


Figura 33. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 2. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.

### 4.1.3 Ensayo 3

Se muestran a continuación diversas figuras correspondientes a resultados del ensayo 3.

Fecha	Duración
28-03-2023 (Ensayo 2)	51:00 minutos

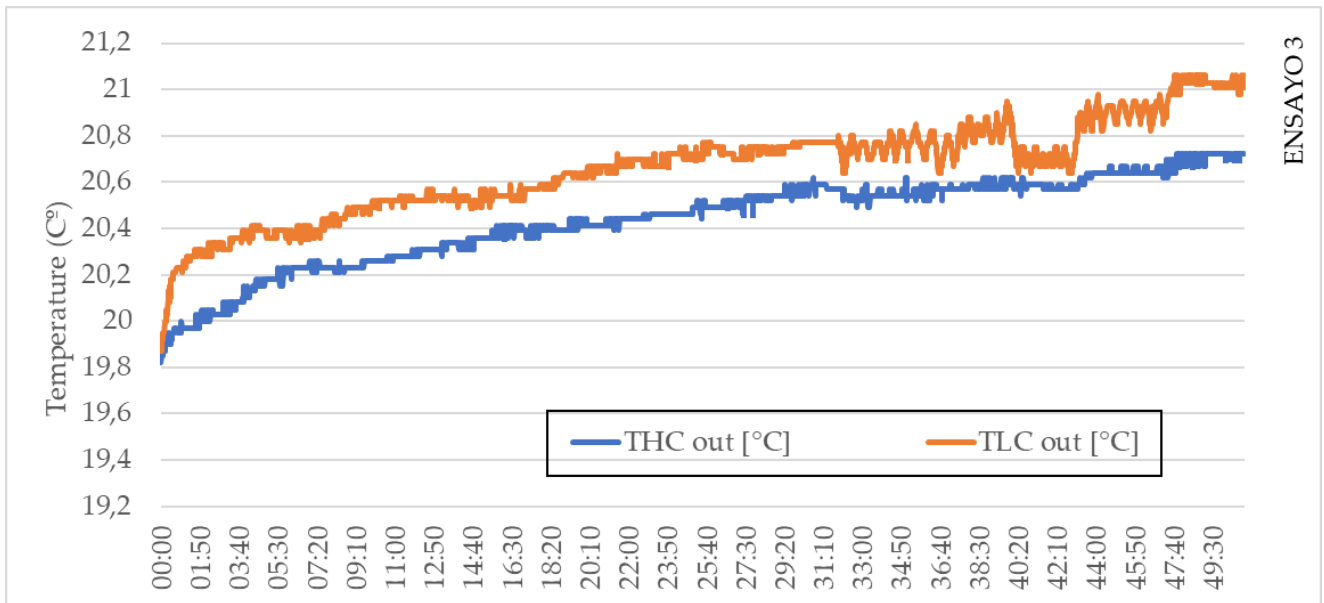


Figura 34. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 3 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $T_{HC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión;  $T_{LC}$ , temperatura de salida de dicha corriente.

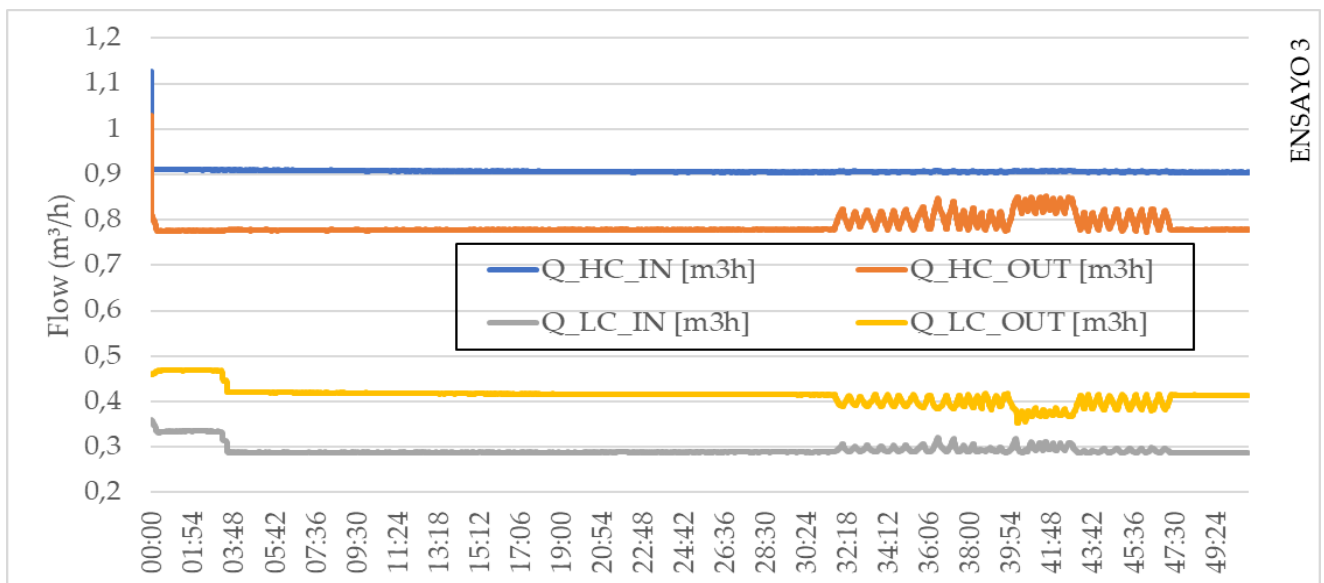


Figura 35. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 3. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como  $Q_{HC\_IN}$  y  $Q_{HC\_OUT}$  (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como  $Q_{LC\_IN}$  y  $Q_{LC\_OUT}$



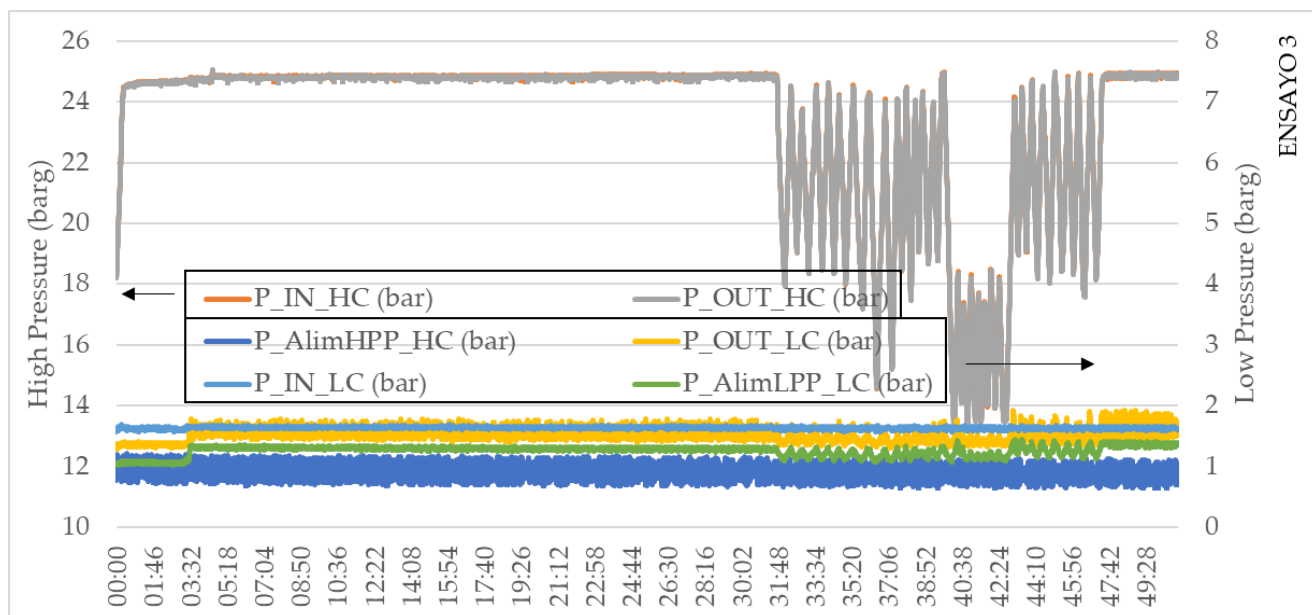


Figura 36. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 3 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; P<sub>AlímHPP\_HC</sub>, alimentación de la bomba HPP. P<sub>IN\_HC</sub> y P<sub>OUT\_HC</sub>, entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.

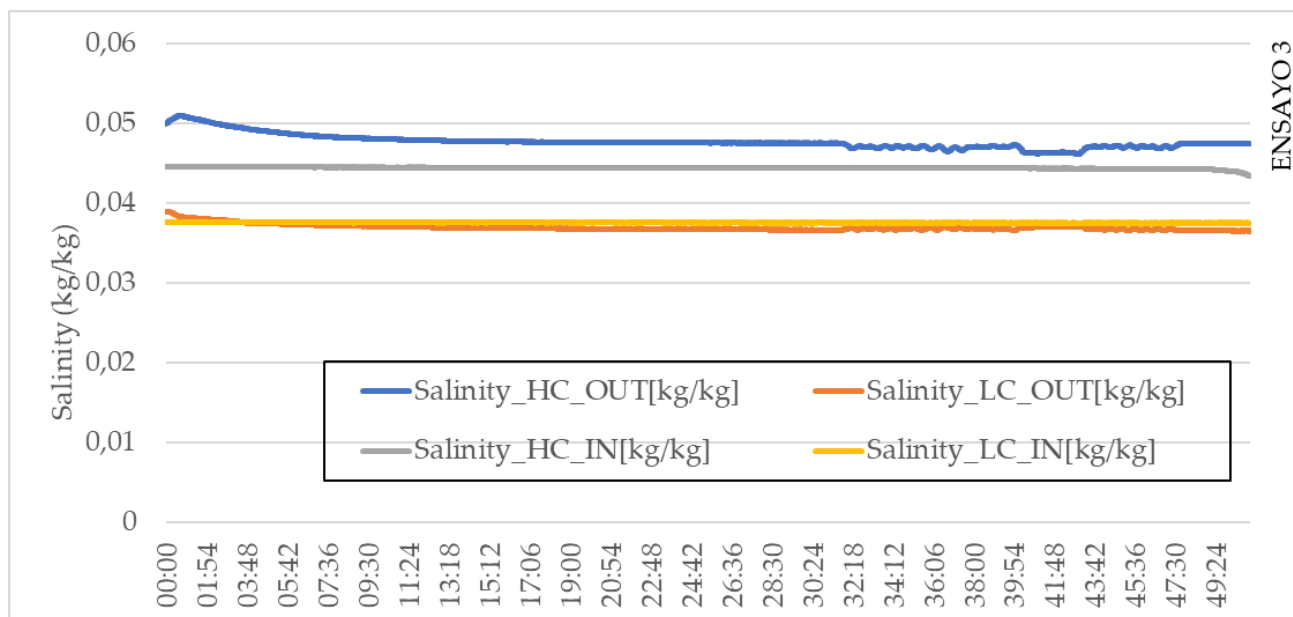


Figura 37. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 3 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.

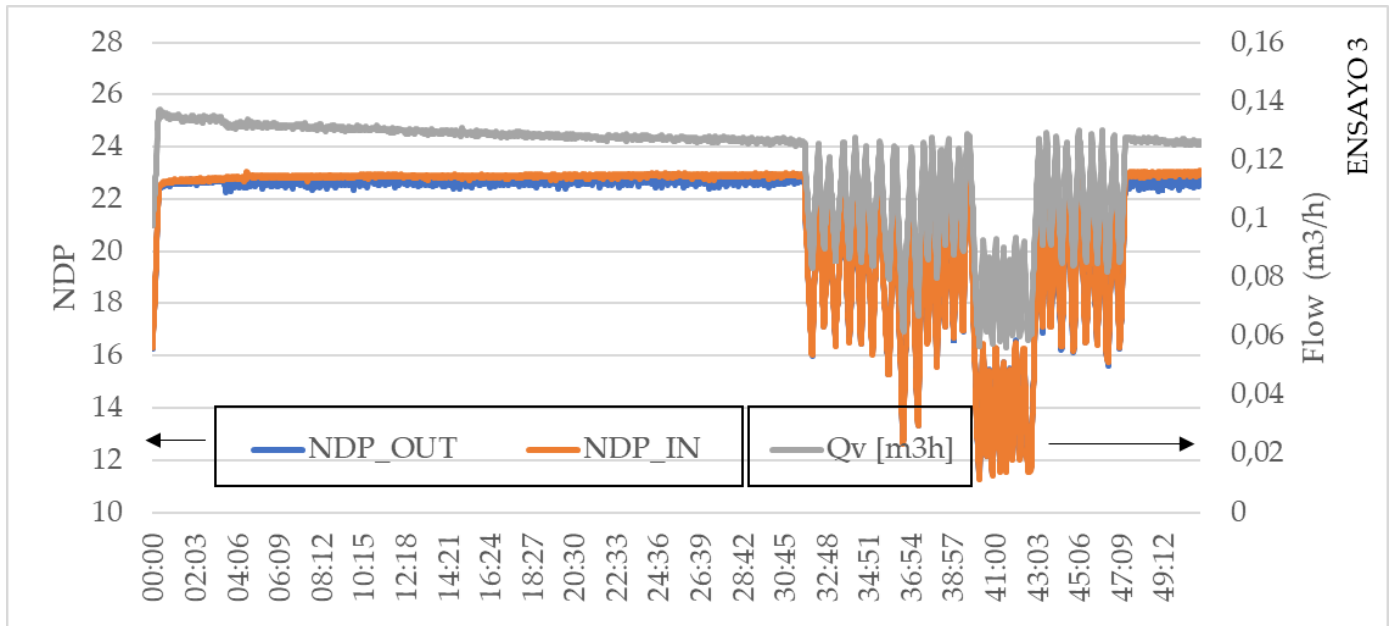


Figura 38. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 3. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido,  $q_v$ .

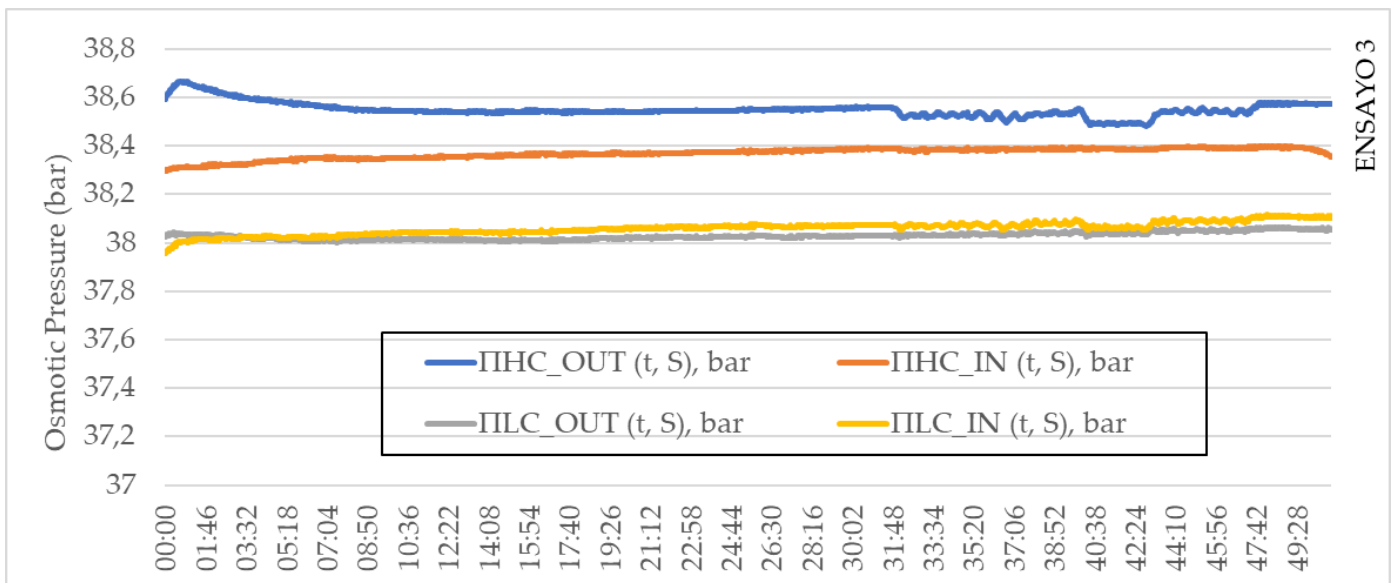


Figura 39. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 3. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.

#### 4.1.4 Ensayo 4

Se muestran a continuación diversas figuras correspondientes a resultados del ensayo 4.

Fecha	Duración
24-04-2023 (Ensayo 1)	51:00 minutos

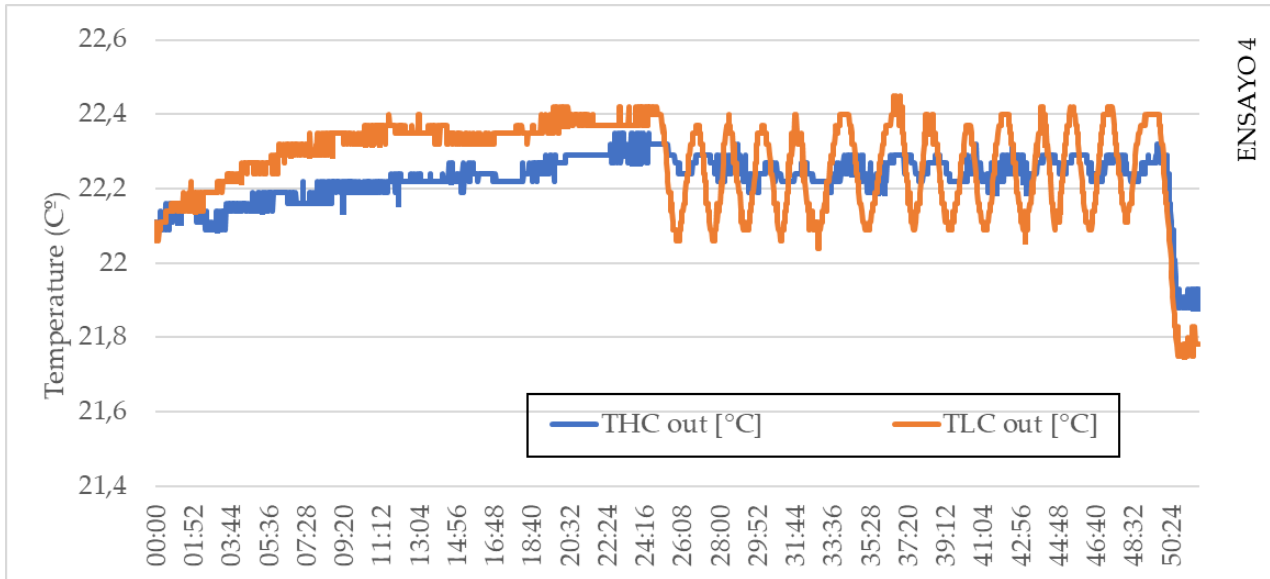


Figura 40. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 4 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $T_{HC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión;  $T_{LC}$ , temperatura de salida de dicha corriente.

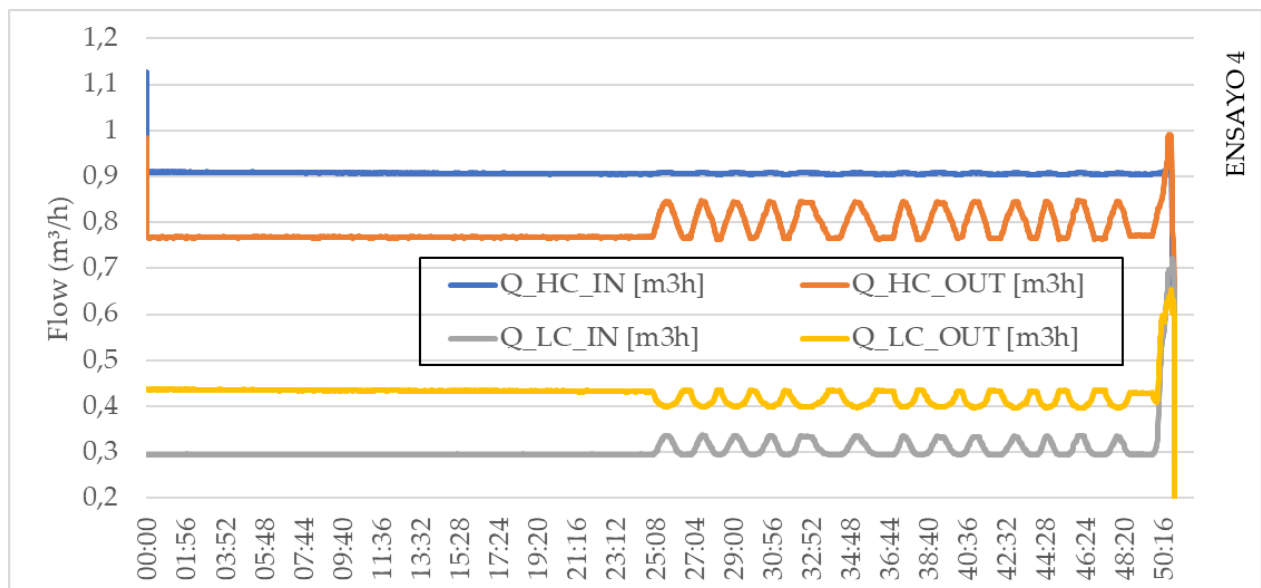


Figura 41. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 4. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como  $Q_{HC\_IN}$  y  $Q_{HC\_OUT}$  (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como  $Q_{LC\_IN}$  y  $Q_{LC\_OUT}$

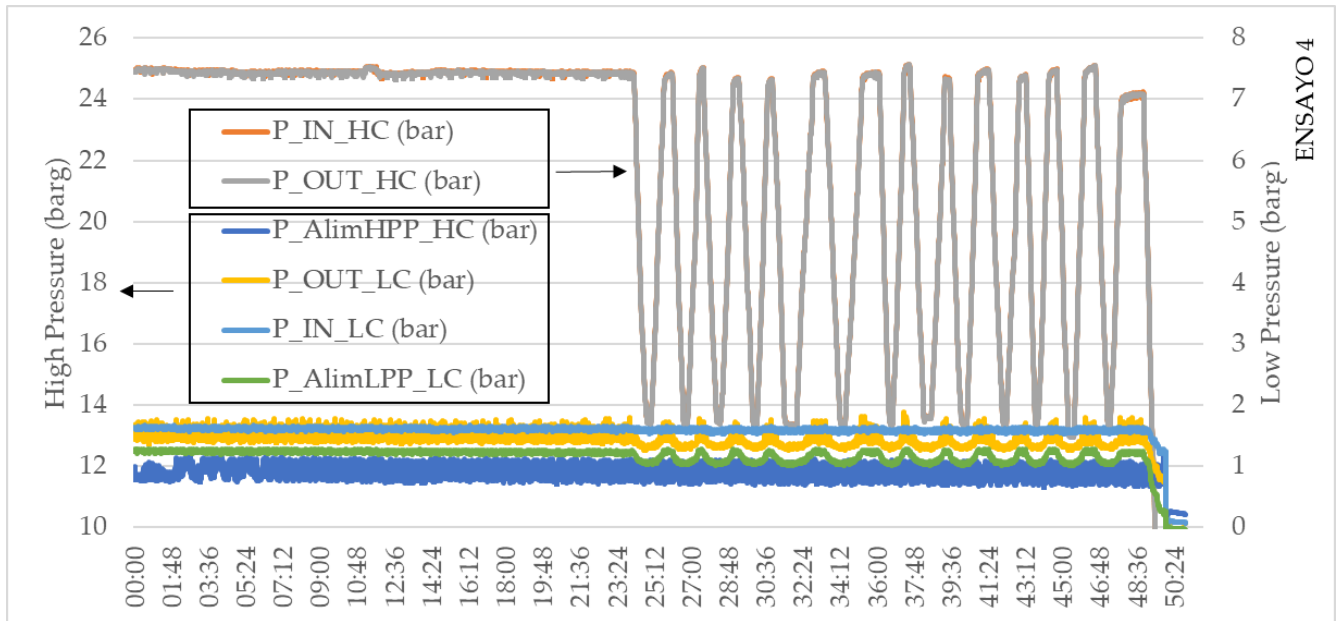


Figura 42. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 4 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $P_{AlímHPP\_HC}$ , alimentación de la bomba HPP.  $P_{IN\_HC}$  y  $P_{OUT\_HC}$ , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.

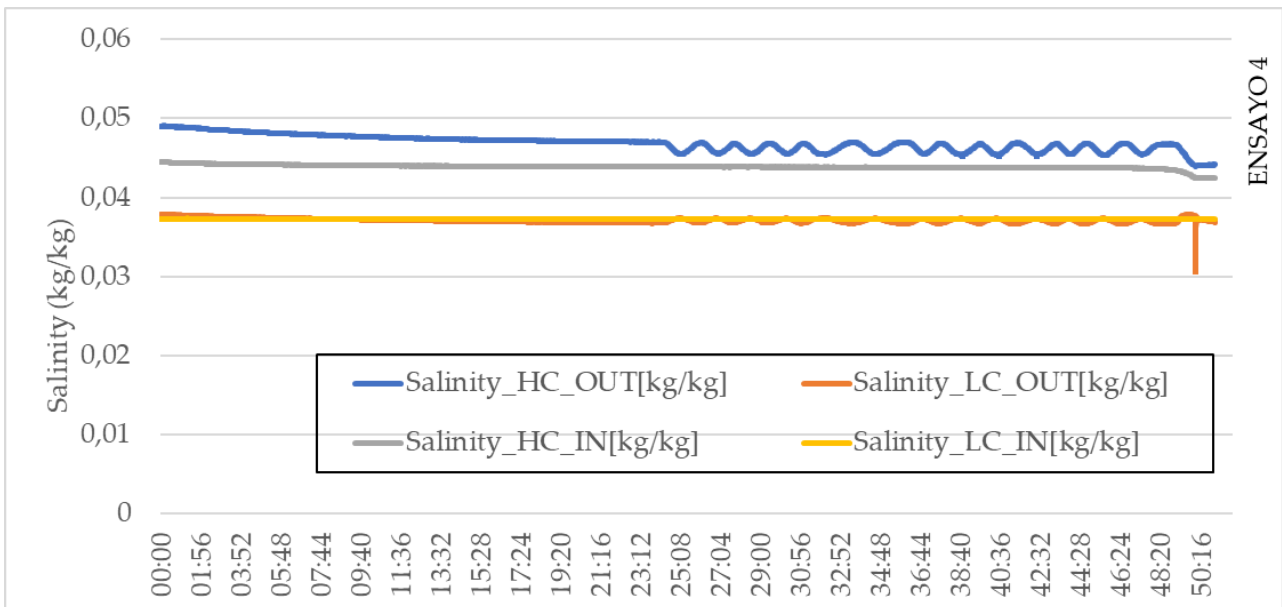


Figura 43. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 4 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.

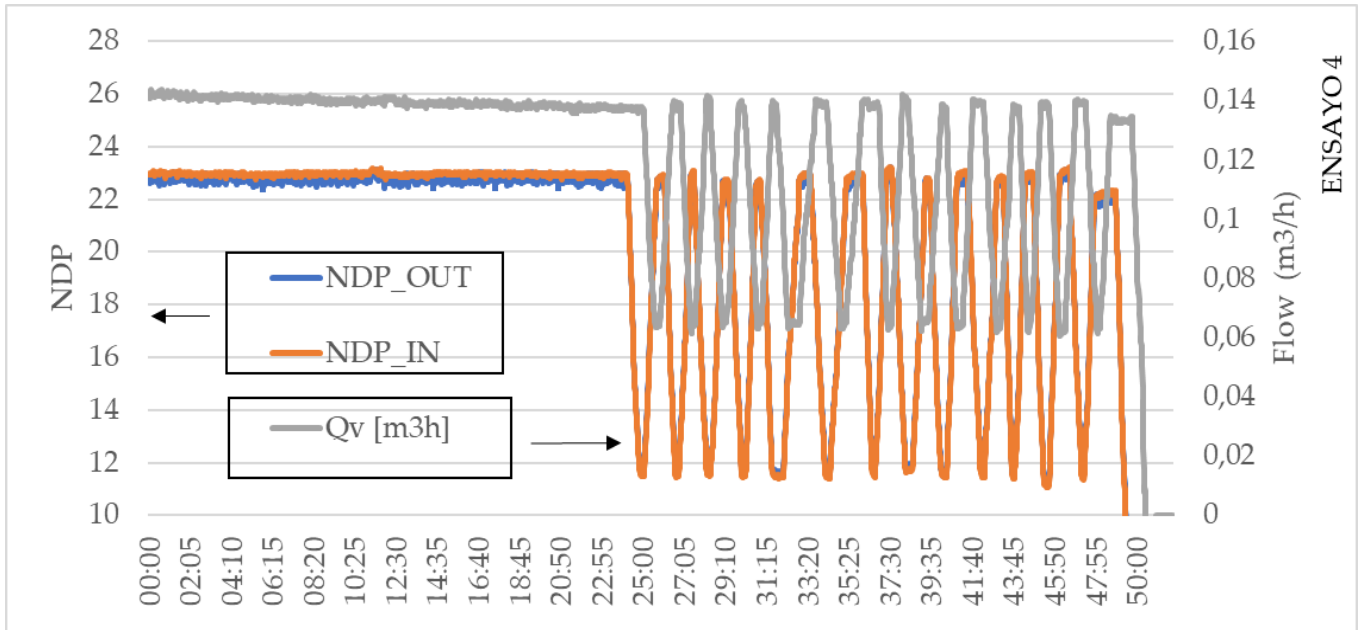


Figura 44. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 4. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido,  $q_v$ .

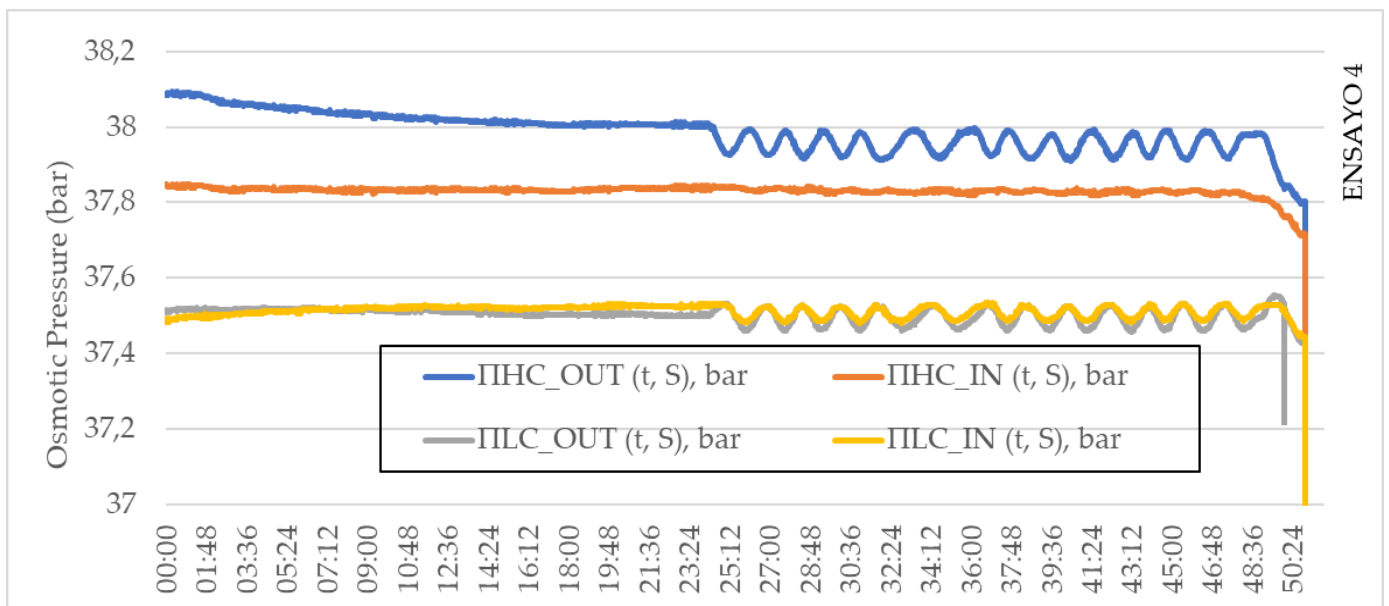


Figura 45. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 4. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.

### 4.1.5 Ensayo 5

Se muestran a continuación diversas figuras correspondientes a resultados del ensayo 5.

Fecha	Duración
24-04-2023 (Ensayo 2)	48:00 minutos

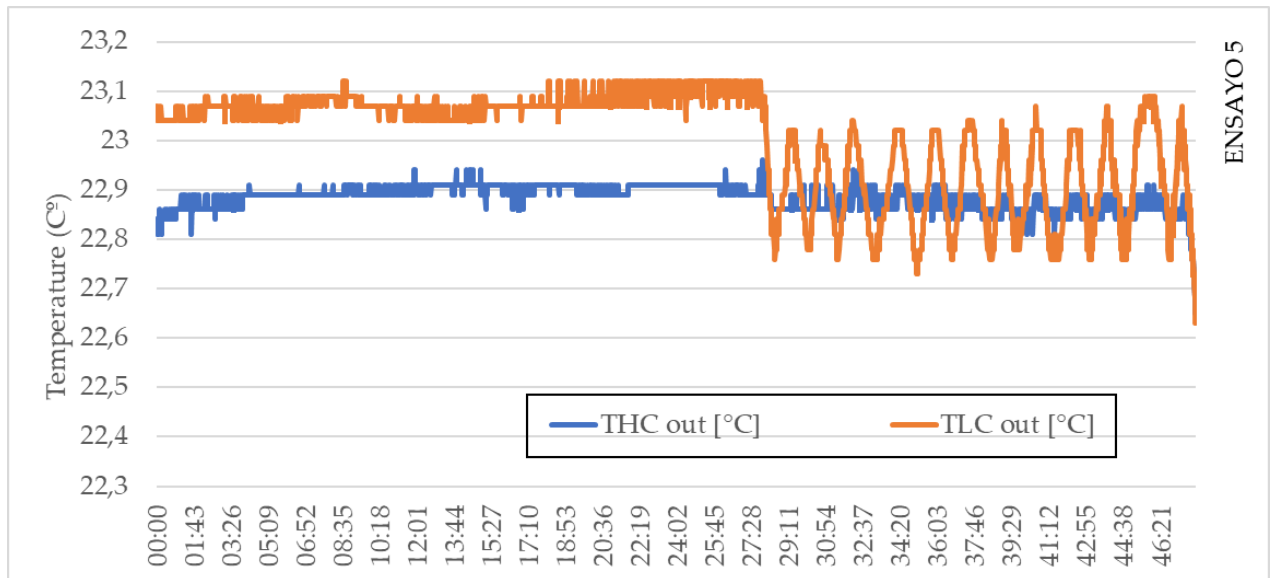


Figura 46. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 5 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $T_{HC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión;  $T_{LC}$ , temperatura de salida de dicha corriente.

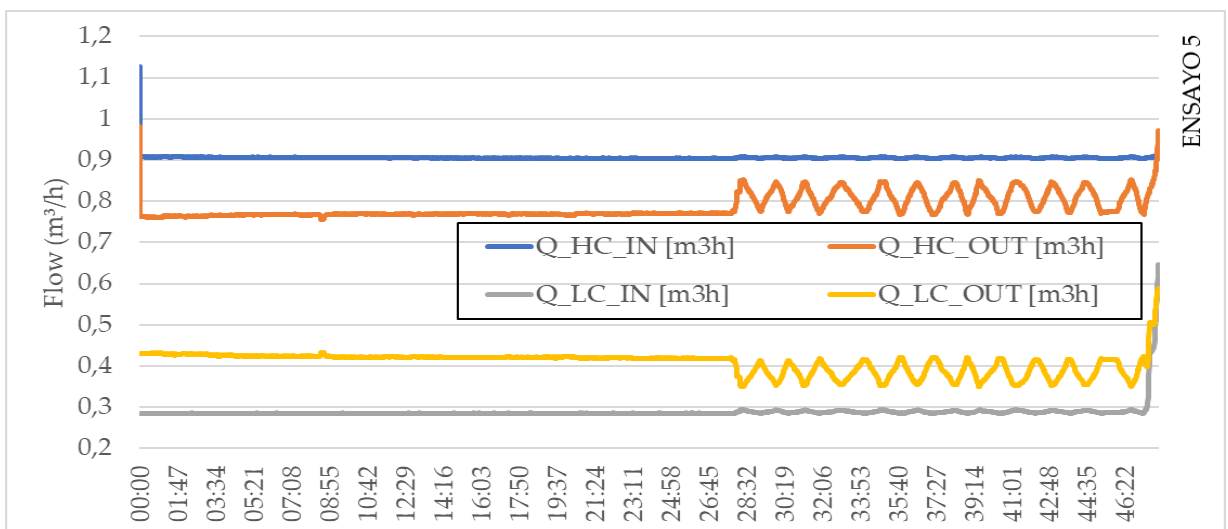


Figura 47. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 5. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como  $Q_{HC\_IN}$  y  $Q_{HC\_OUT}$  (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como  $Q_{LC\_IN}$  y  $Q_{LC\_OUT}$

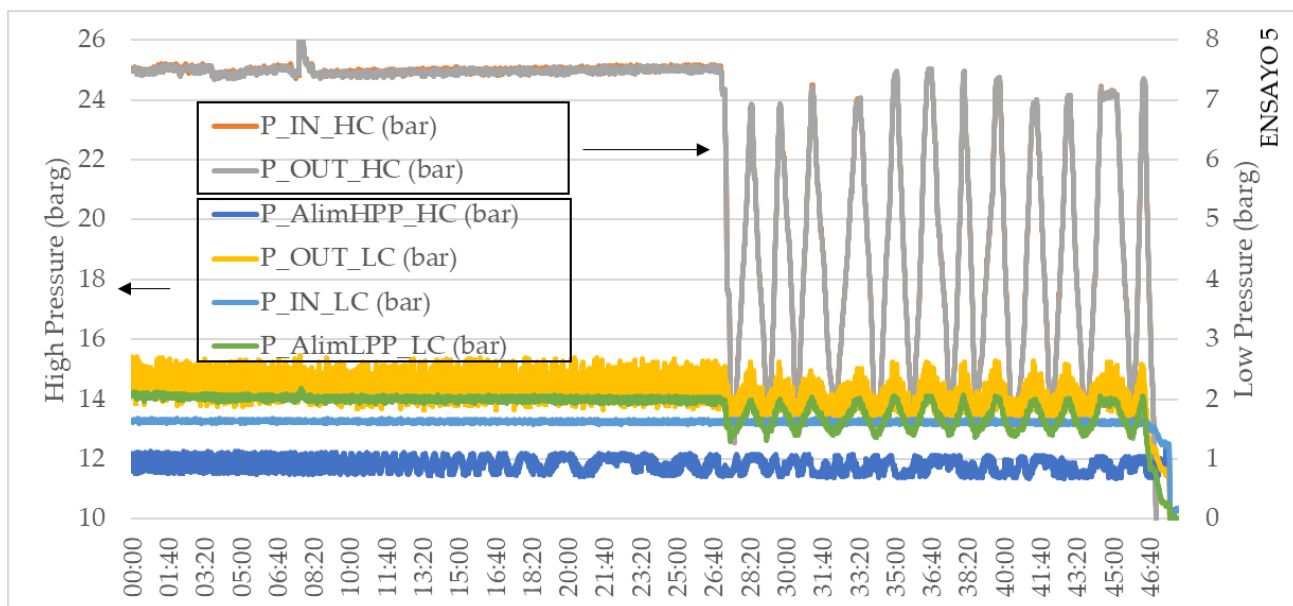


Figura 48. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 5 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; P\_AlímHPP\_HC, alimentación de la bomba HPP. P\_IN\_HC y P\_OUT\_HC, entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.

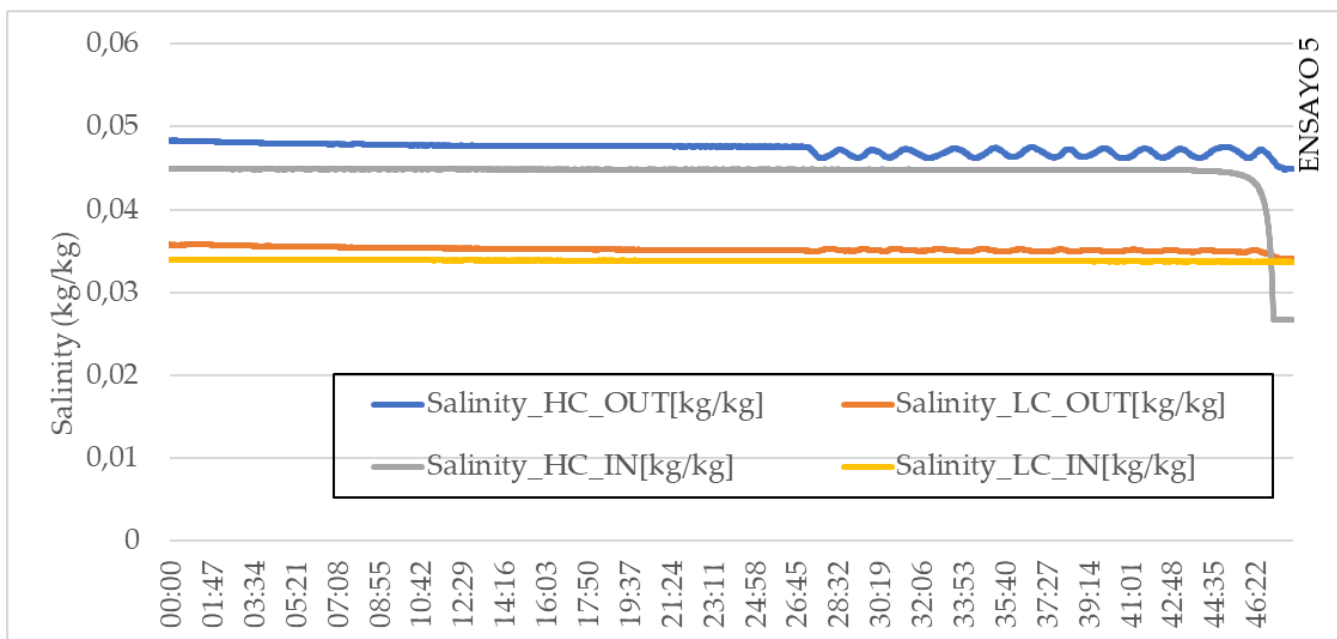


Figura 49. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 5 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.

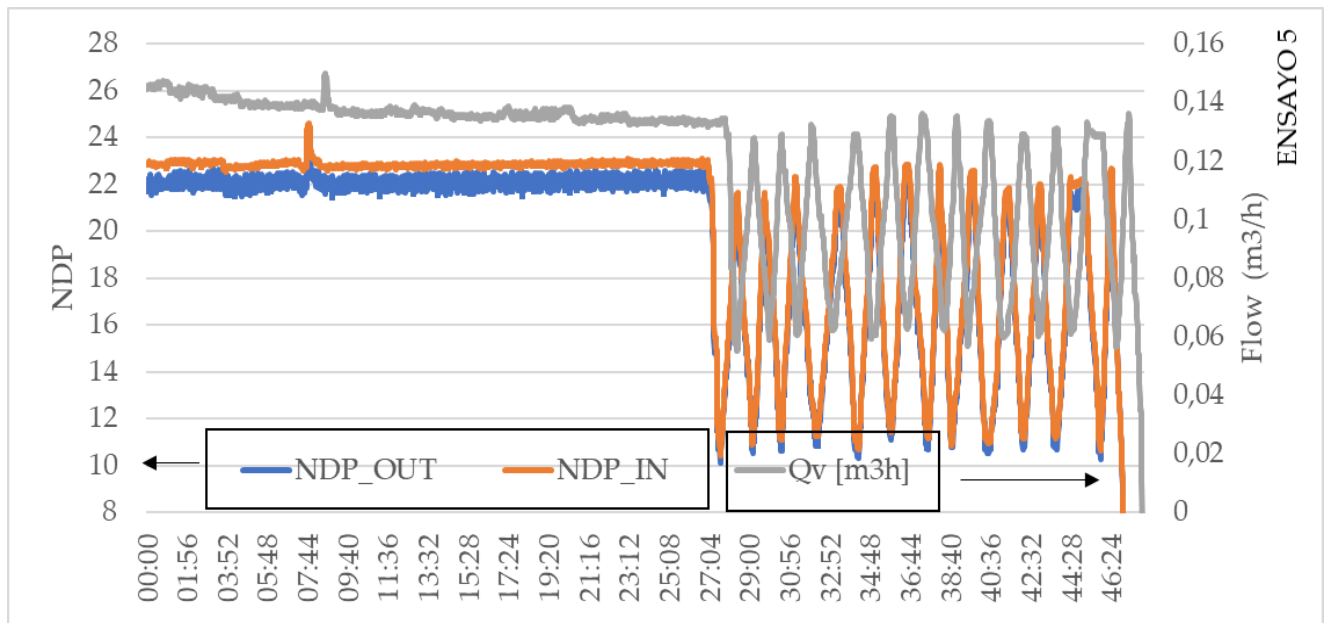


Figura 50. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 5. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido,  $q_v$ .

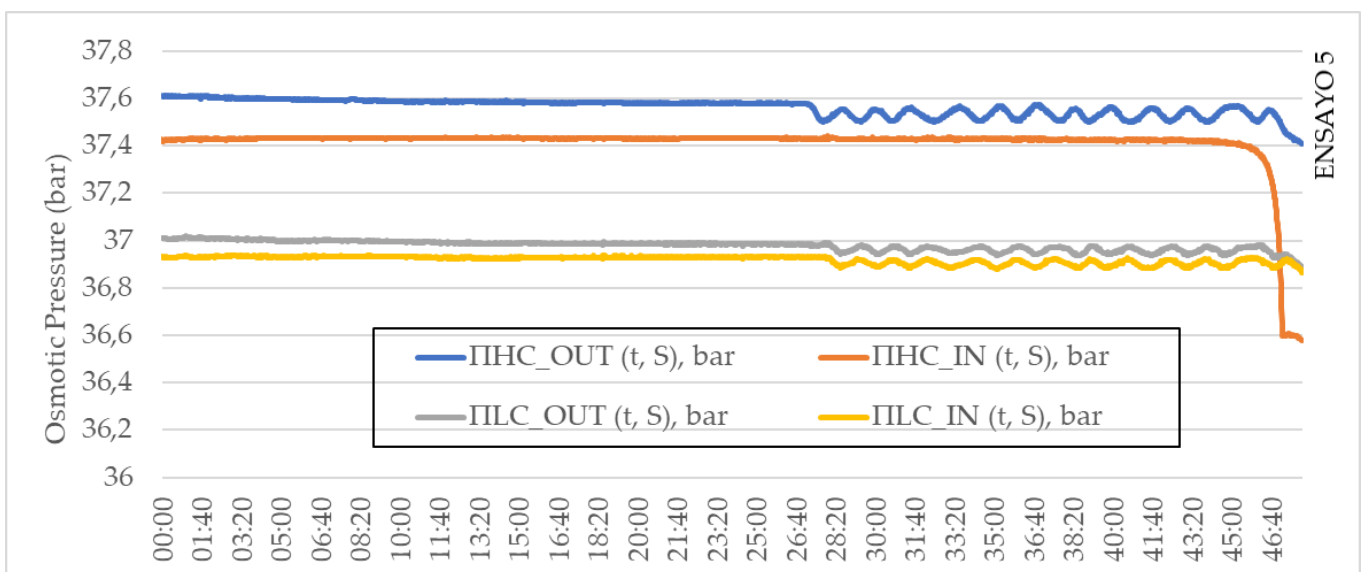


Figura 51. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 5. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.



### 4.1.6 Ensayo 6

Se muestran a continuación diversas figuras correspondientes a resultados del ensayo 6.

Fecha	Duración
24-04-2023 (Ensayo 3)	40:00 minutos

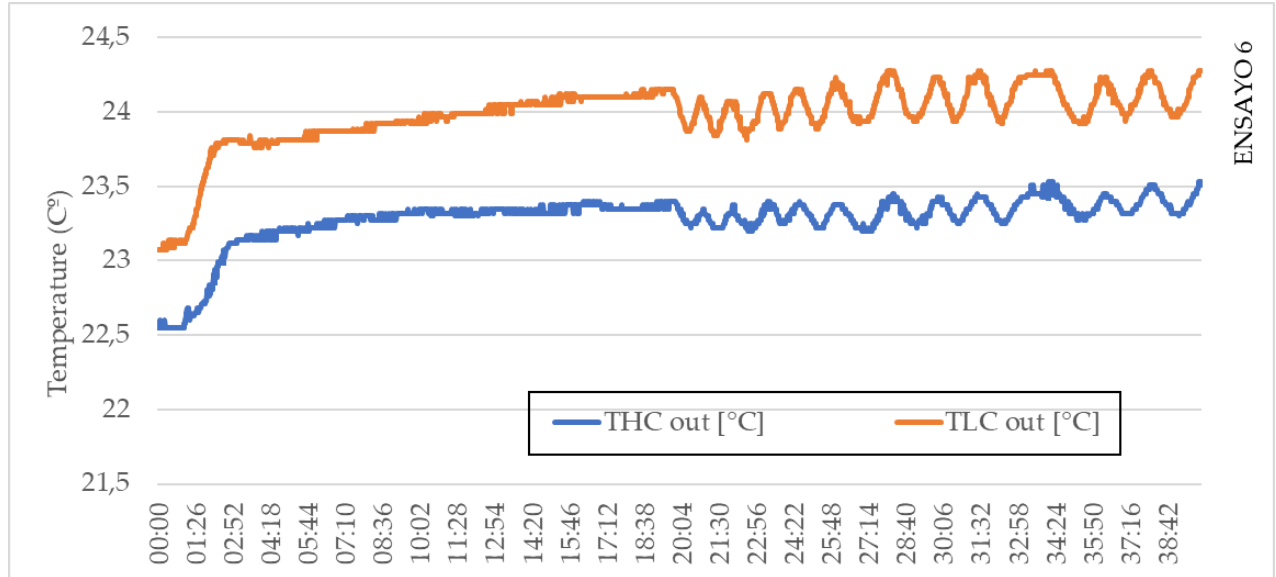


Figura 52. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 6 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $T_{HC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión;  $T_{LC}$ , temperatura de salida de dicha corriente.

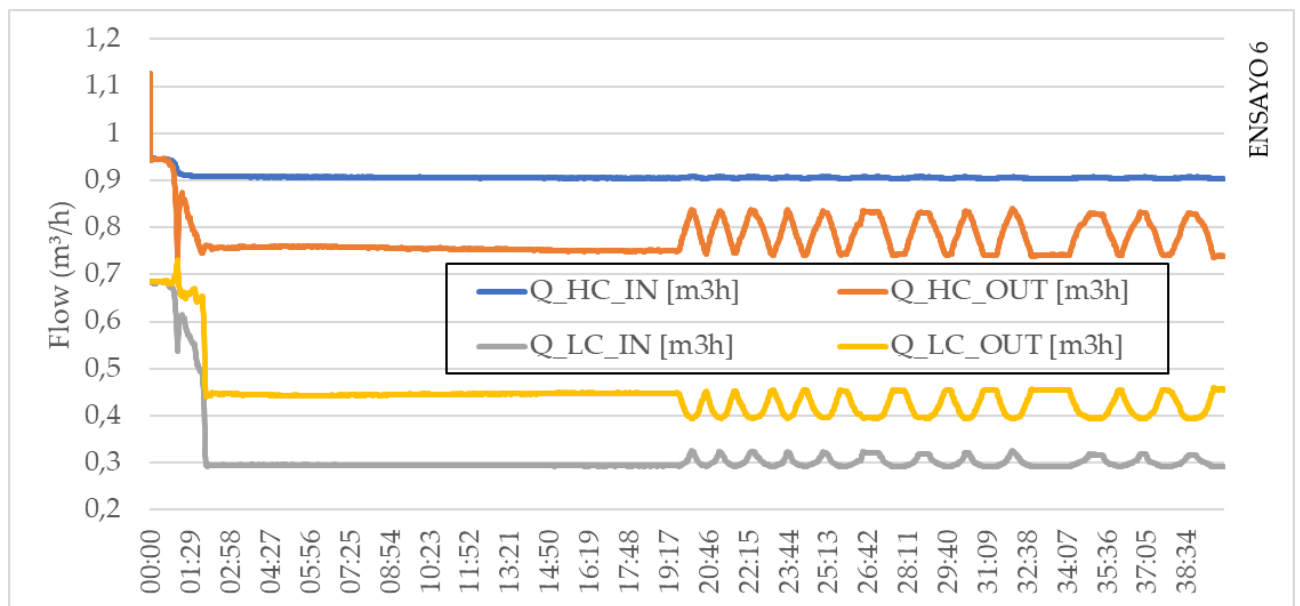


Figura 53. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 6. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como  $Q_{HC\_IN}$  y  $Q_{HC\_OUT}$  (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como  $Q_{LC\_IN}$  y  $Q_{LC\_OUT}$

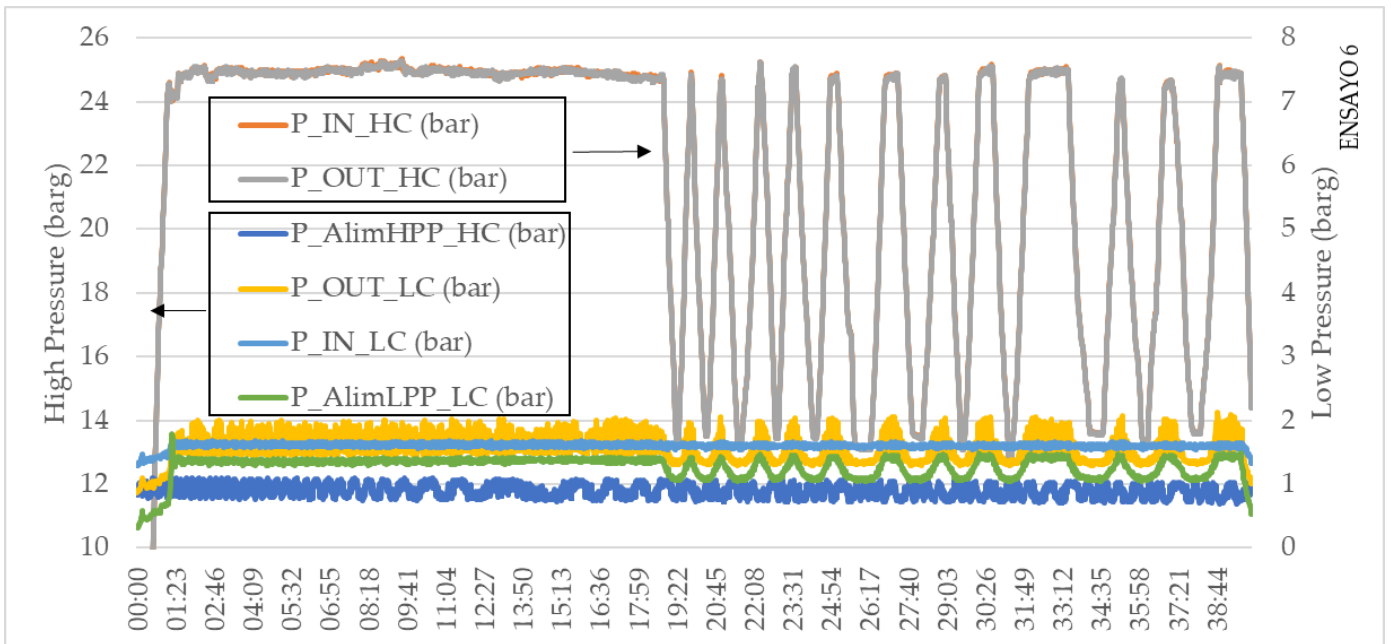


Figura 54. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 6 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; P\_AlímHPP\_HC, alimentación de la bomba HPP. P\_IN\_HC y P\_OUT\_HC, entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.

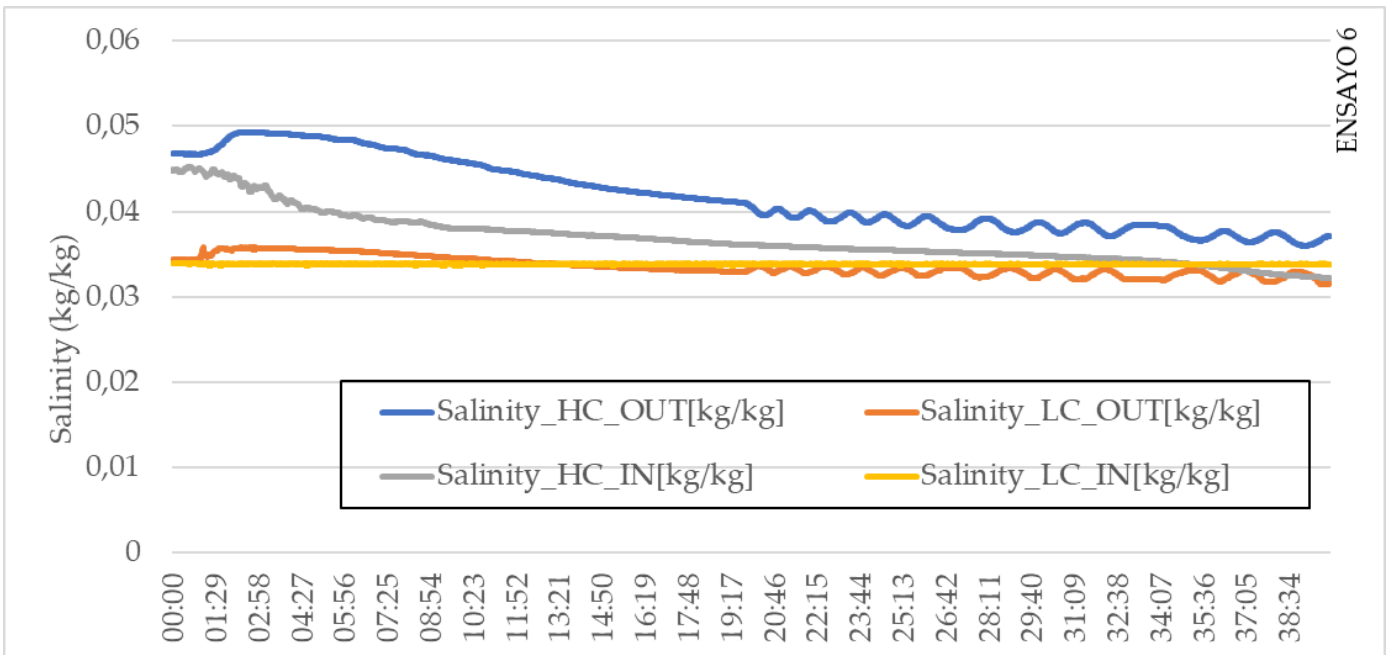


Figura 55. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 6 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.

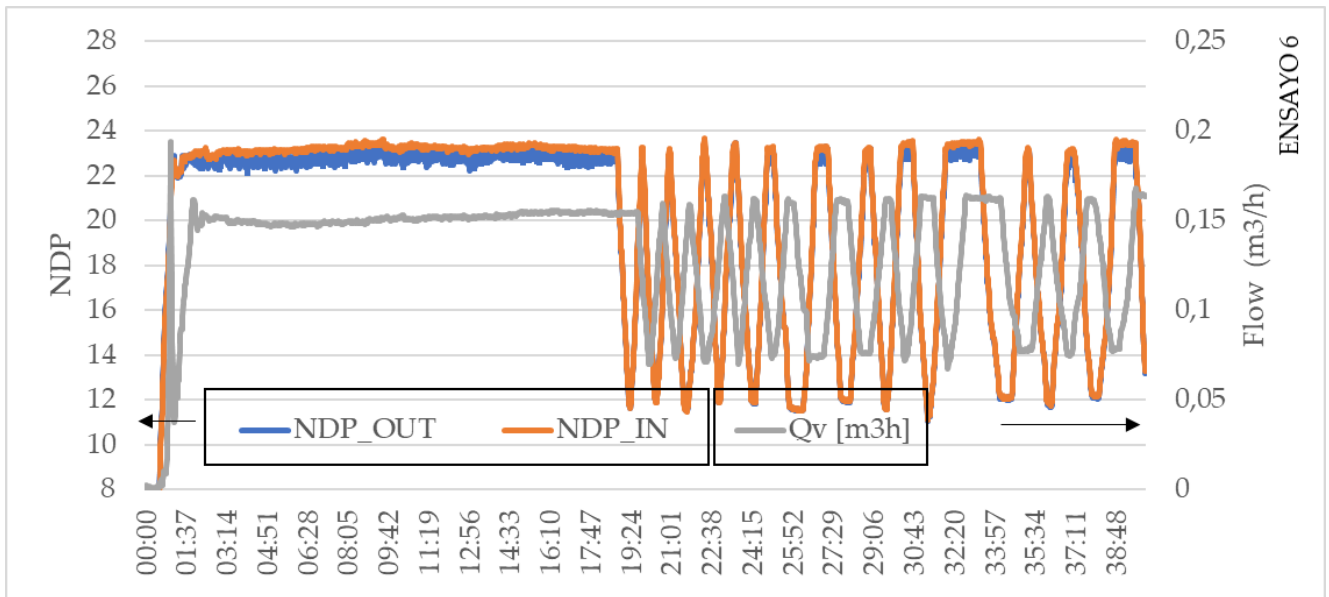


Figura 56. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 6. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido,  $q_v$ .

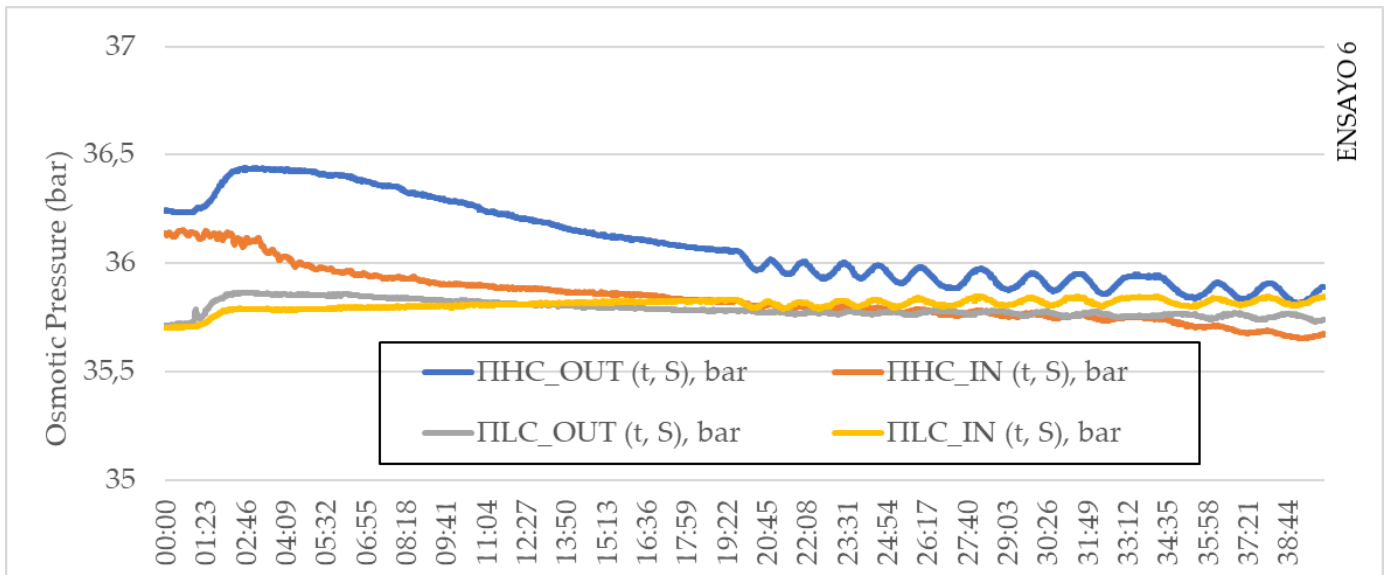


Figura 57. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 6. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.

### 4.1.7 Ensayo 7

Se muestran a continuación diversas figuras correspondientes a resultados del ensayo 7.

Fecha	Duración
25-04-2023	30:00 minutos

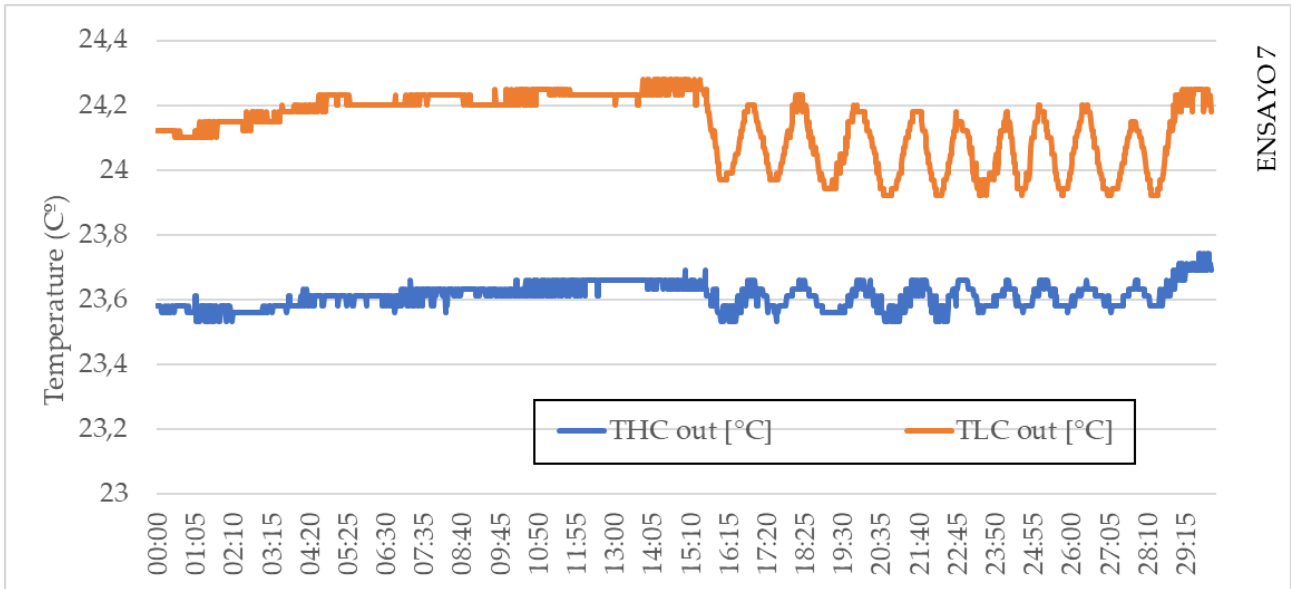


Figura 58. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 7 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $T_{HC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión;  $T_{LC}$ , temperatura de salida de dicha corriente.

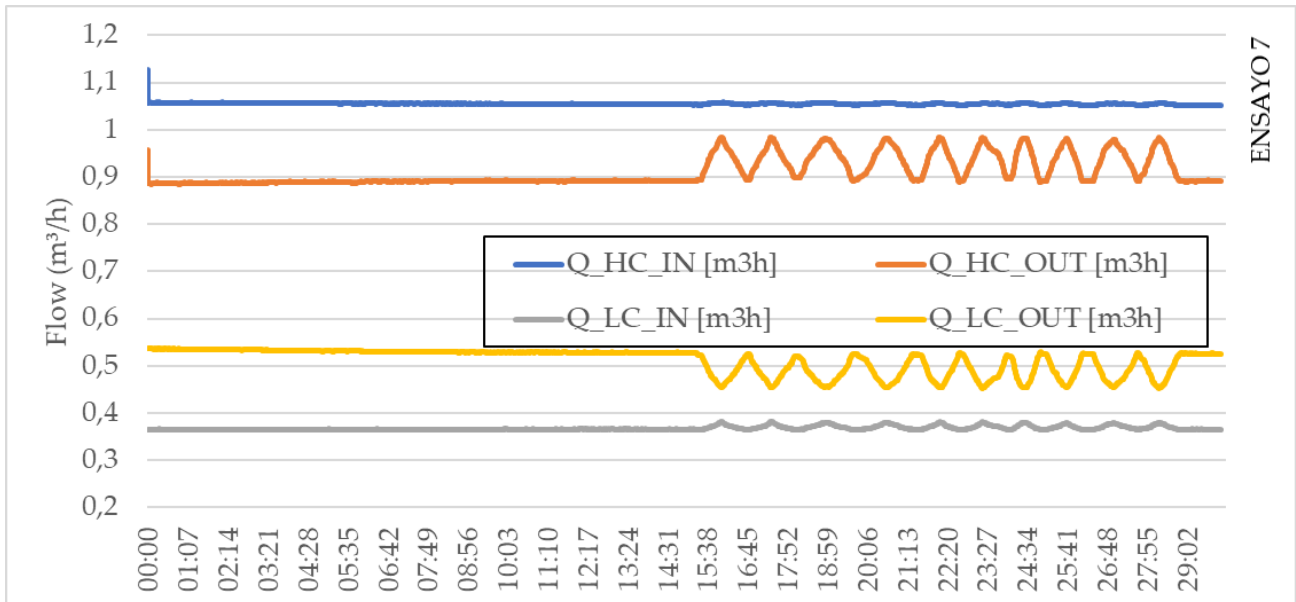


Figura 59. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 7. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como  $Q_{HC\_IN}$  y  $Q_{HC\_OUT}$  (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como  $Q_{LC\_IN}$  y  $Q_{LC\_OUT}$

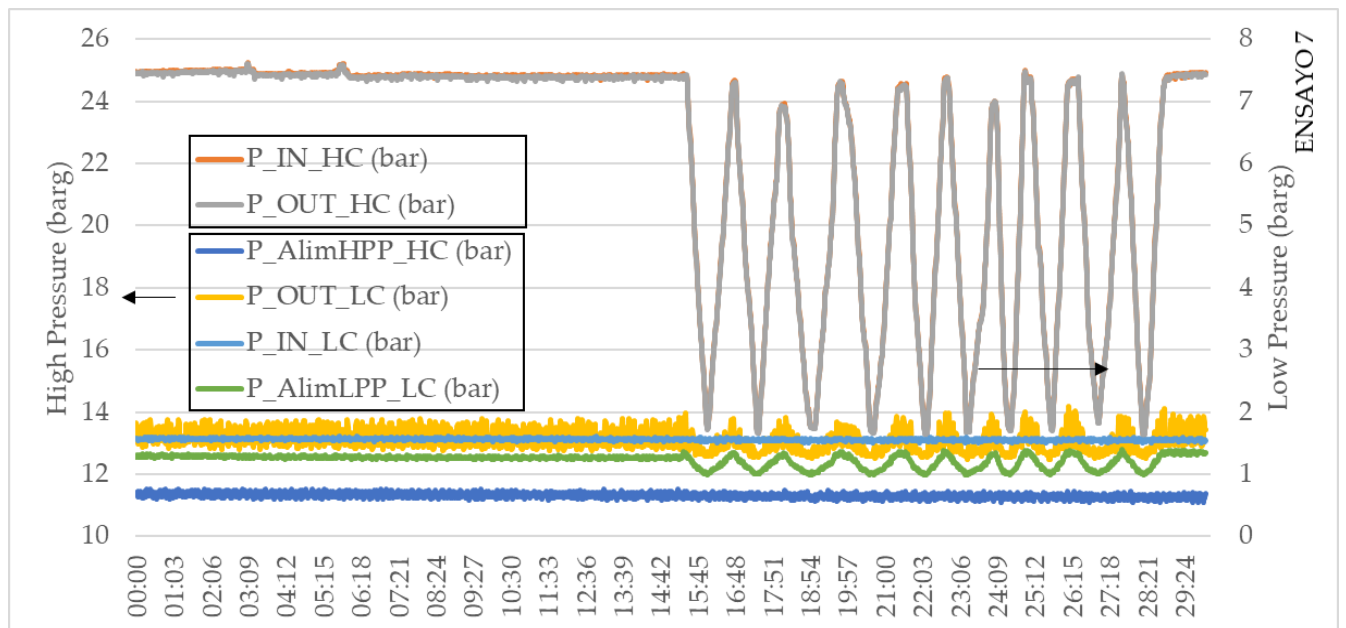


Figura 61. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 7 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; P\_AlímHPP\_HC, alimentación de la bomba HPP. P\_IN\_HC y P\_OUT\_HC, entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.

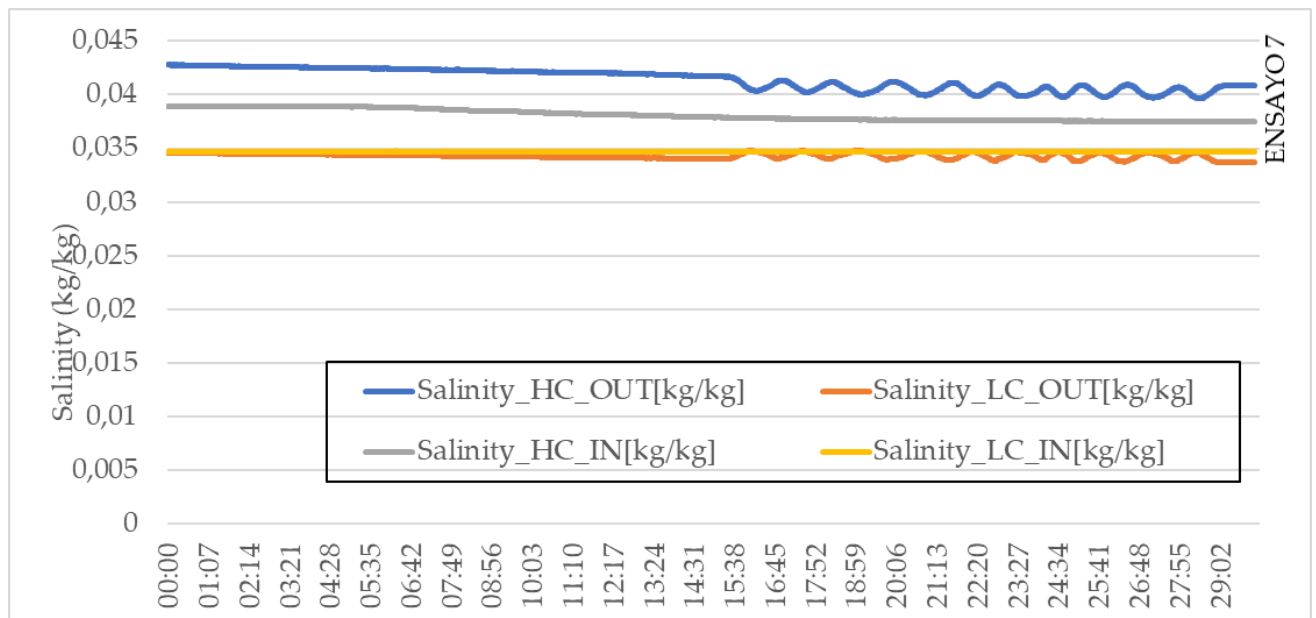


Figura 60. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 7 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.

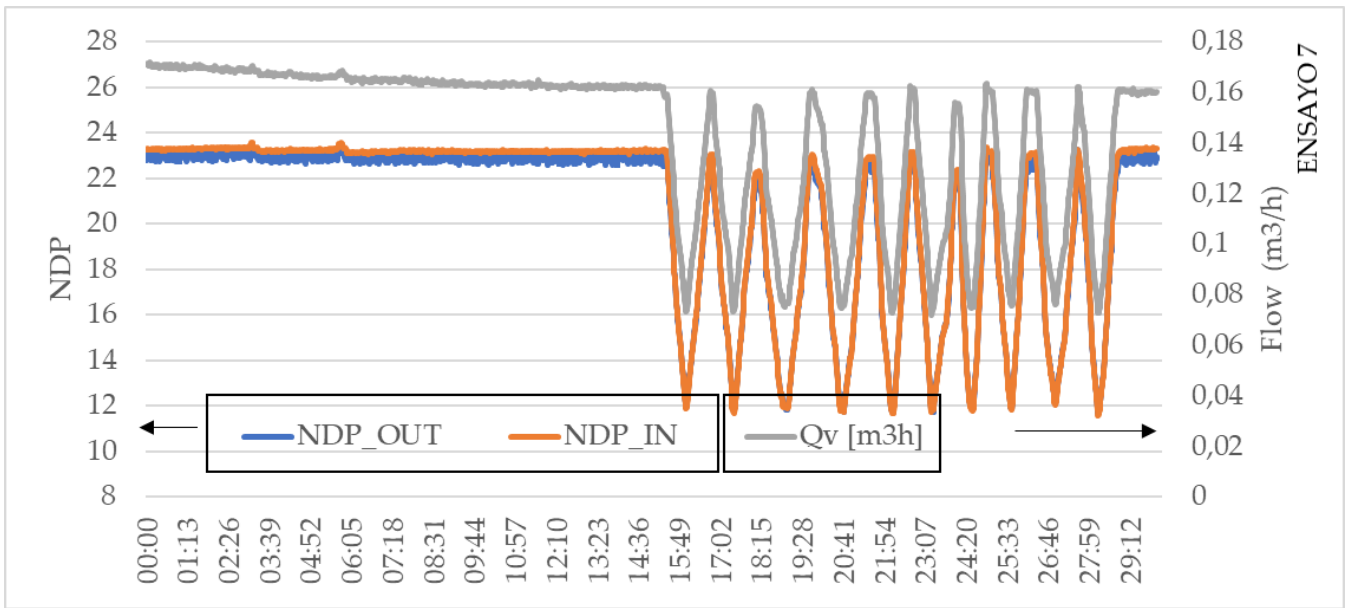


Figura 63. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 7. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido,  $q_v$ .

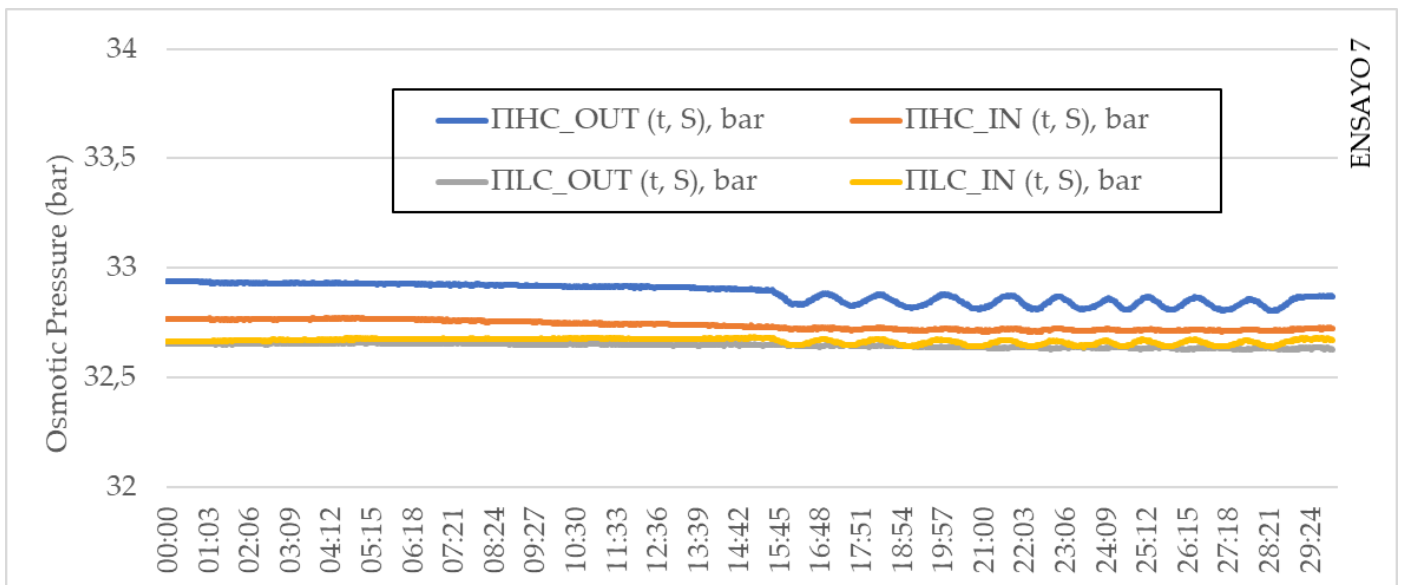


Figura 62. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 7. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.

### 4.1.8 Ensayo 8

Se muestran a continuación diversas figuras correspondientes a resultados del ensayo 8.

Fecha	Duración
02-05-2023	23:30 minutos

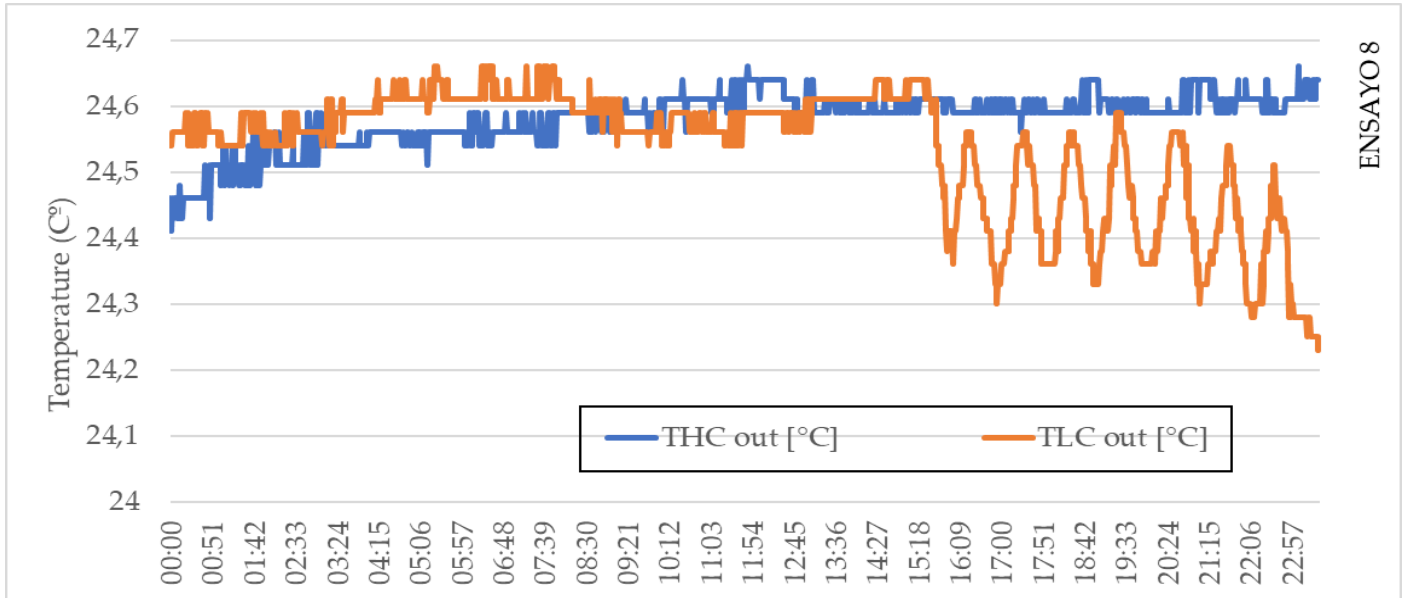


Figura 64. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 8 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $T_{HC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión;  $T_{LC}$ , temperatura de salida de dicha corriente.

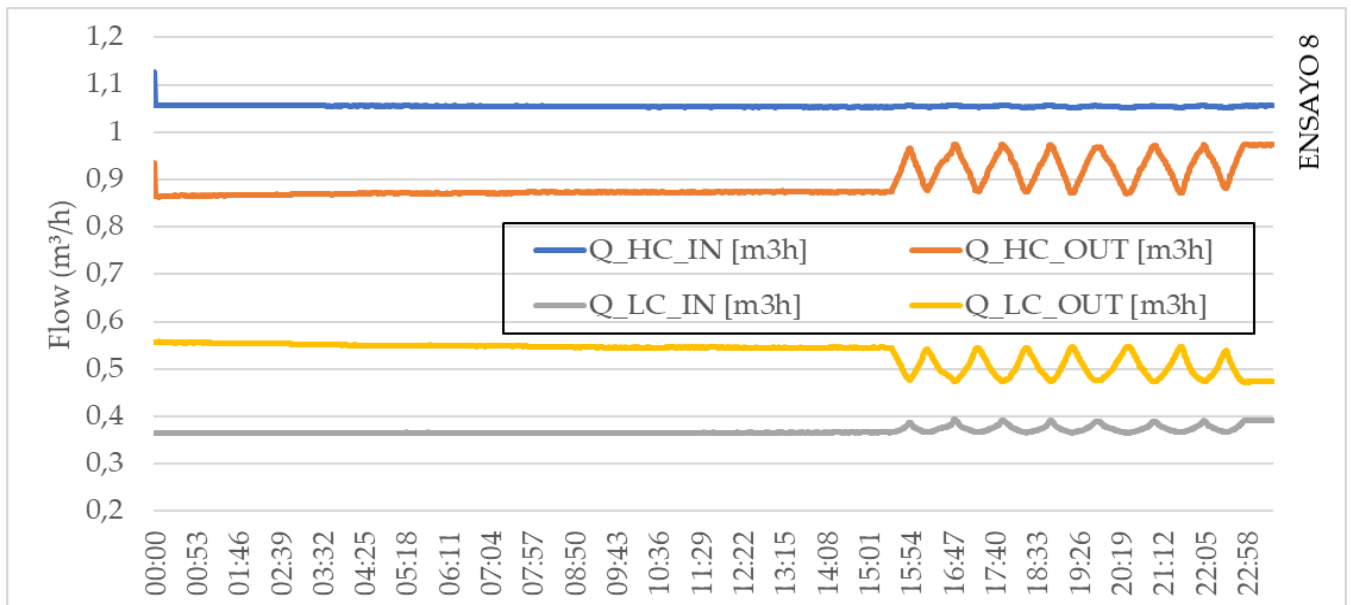


Figura 65. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 8. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como  $Q_{HC\_IN}$  y  $Q_{HC\_OUT}$  (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como  $Q_{LC\_IN}$  y  $Q_{LC\_OUT}$

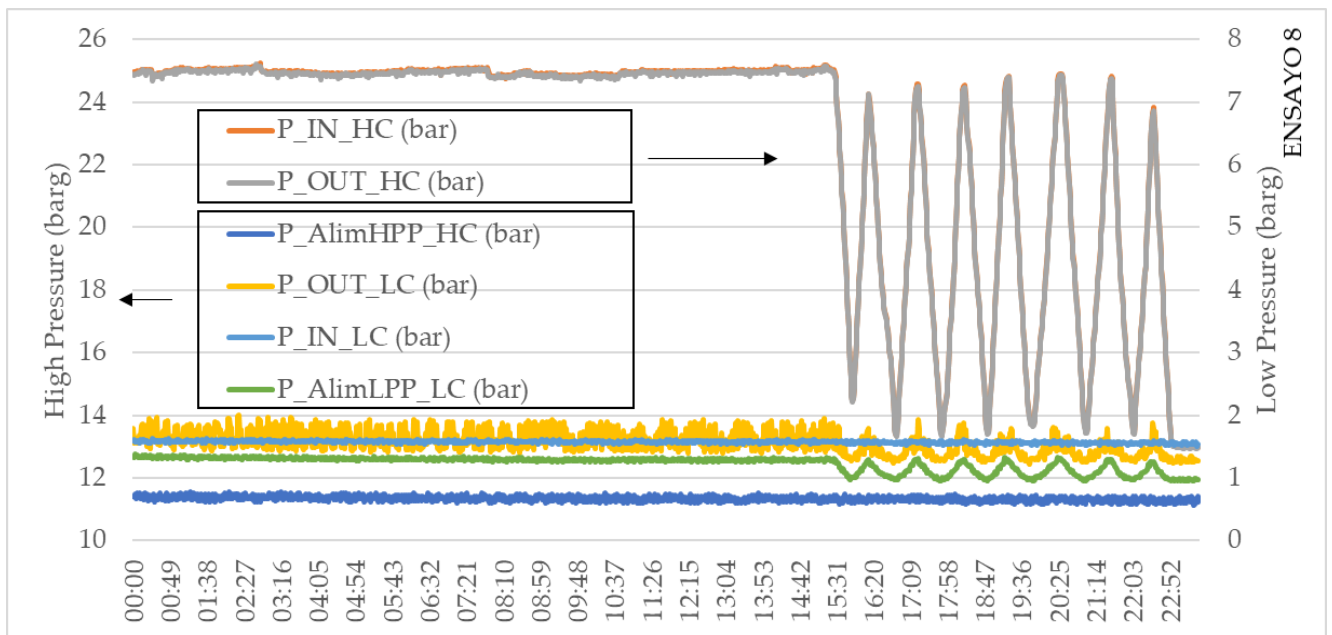


Figura 66. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 8 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; P\_AlímHPP\_HC, alimentación de la bomba HPP. P\_IN\_HC y P\_OUT\_HC, entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.

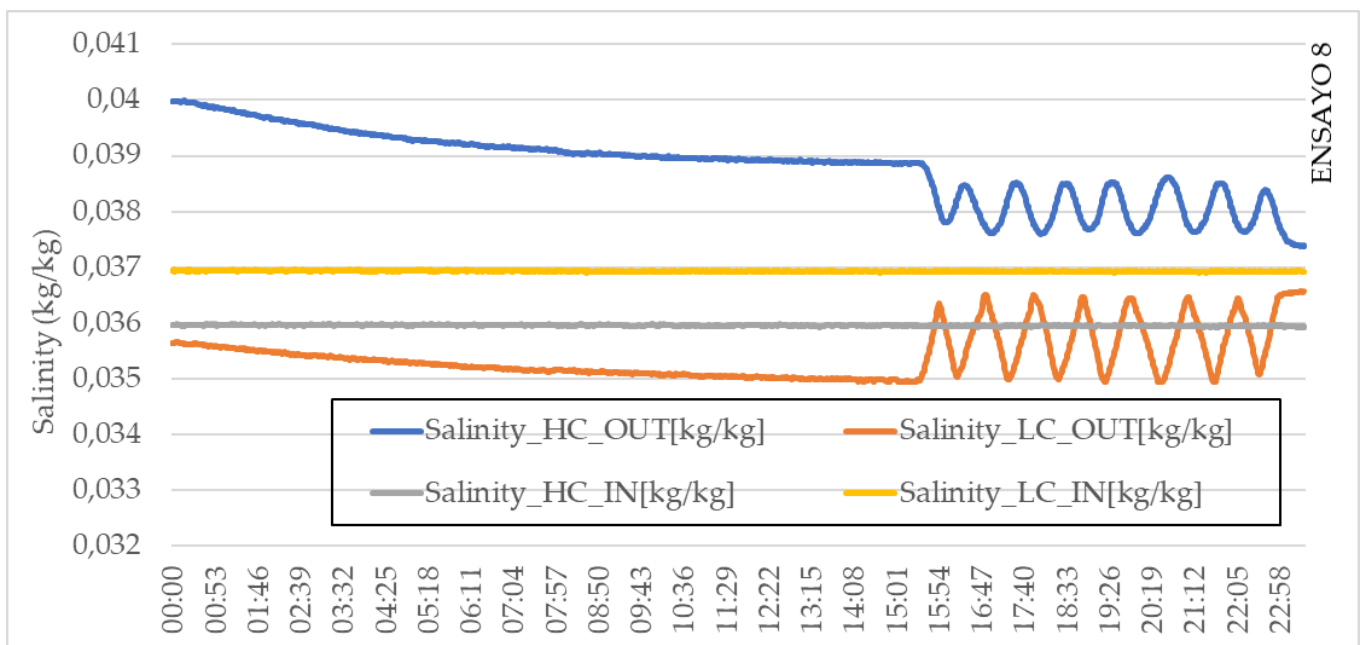


Figura 67. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 8 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.



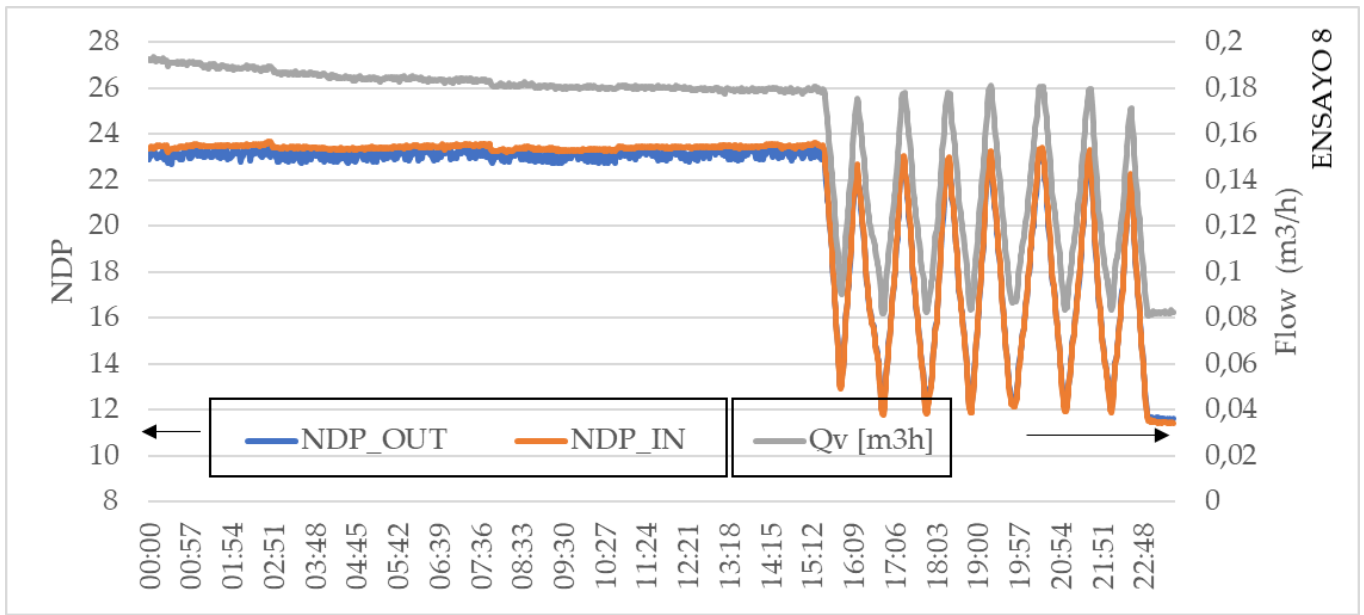


Figura 68. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 8. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido,  $q_v$ .

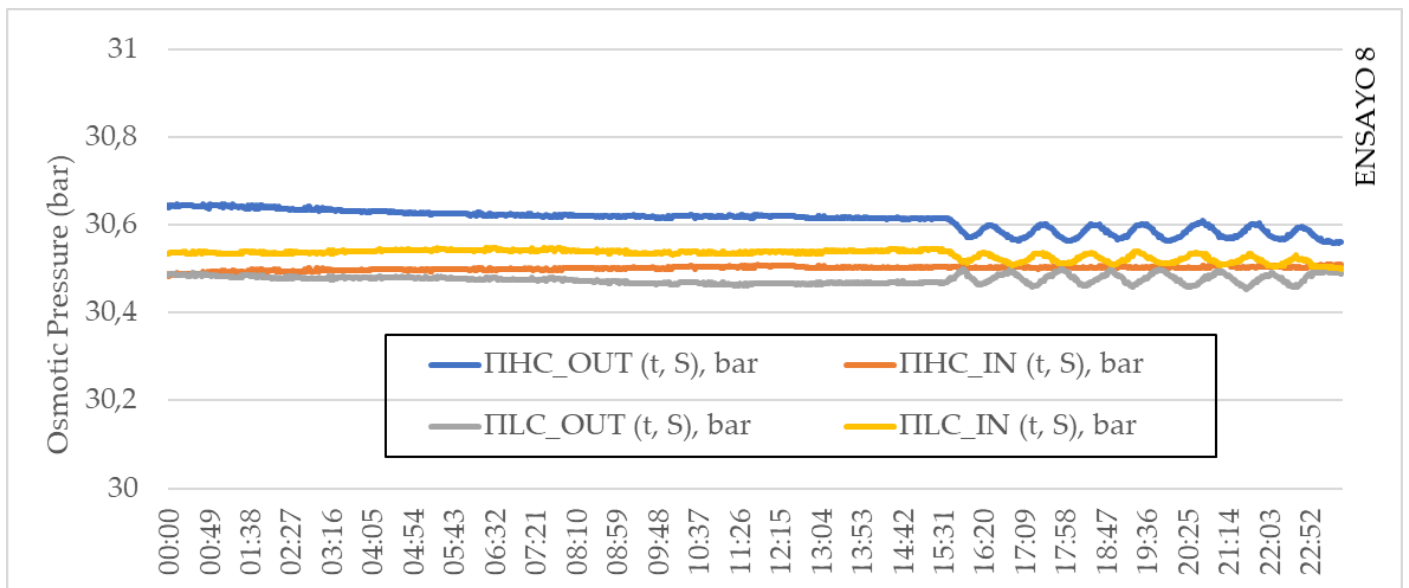


Figura 69. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 8. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.

### 4.1.9 Ensayo 9

Se muestran a continuación diversas figuras correspondientes a resultados del ensayo 9.

Fecha	Duración
02-05-2023 (Ensayo 2)	53:00 minutos

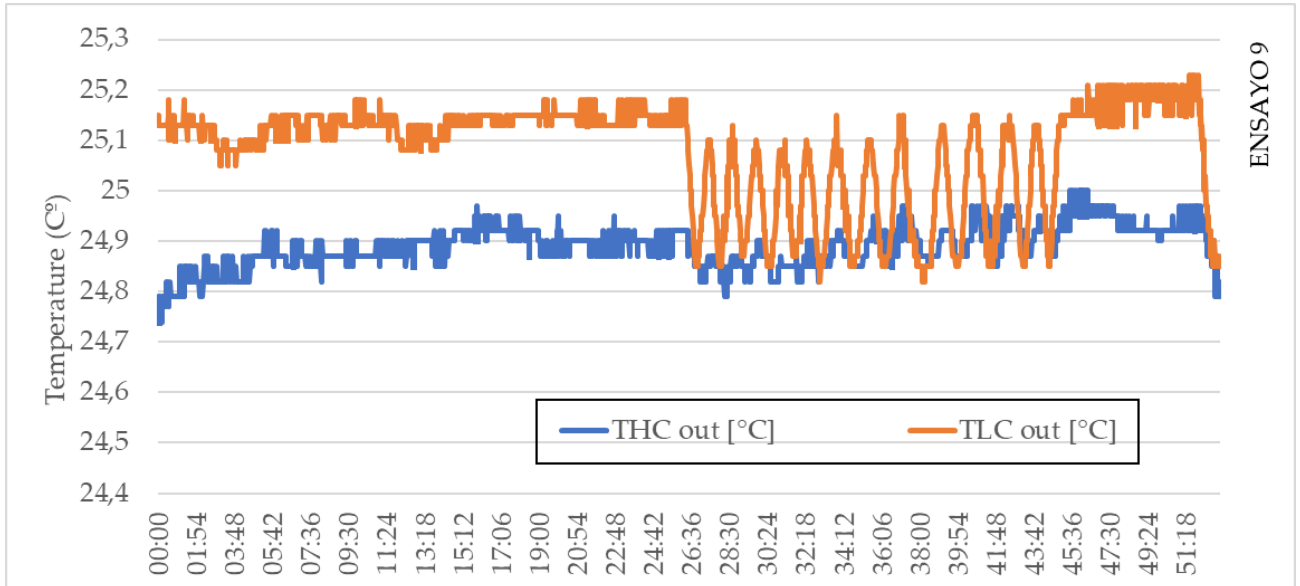


Figura 70. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 9 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $T_{HC}$ , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión;  $T_{LC}$ , temperatura de salida de dicha corriente.

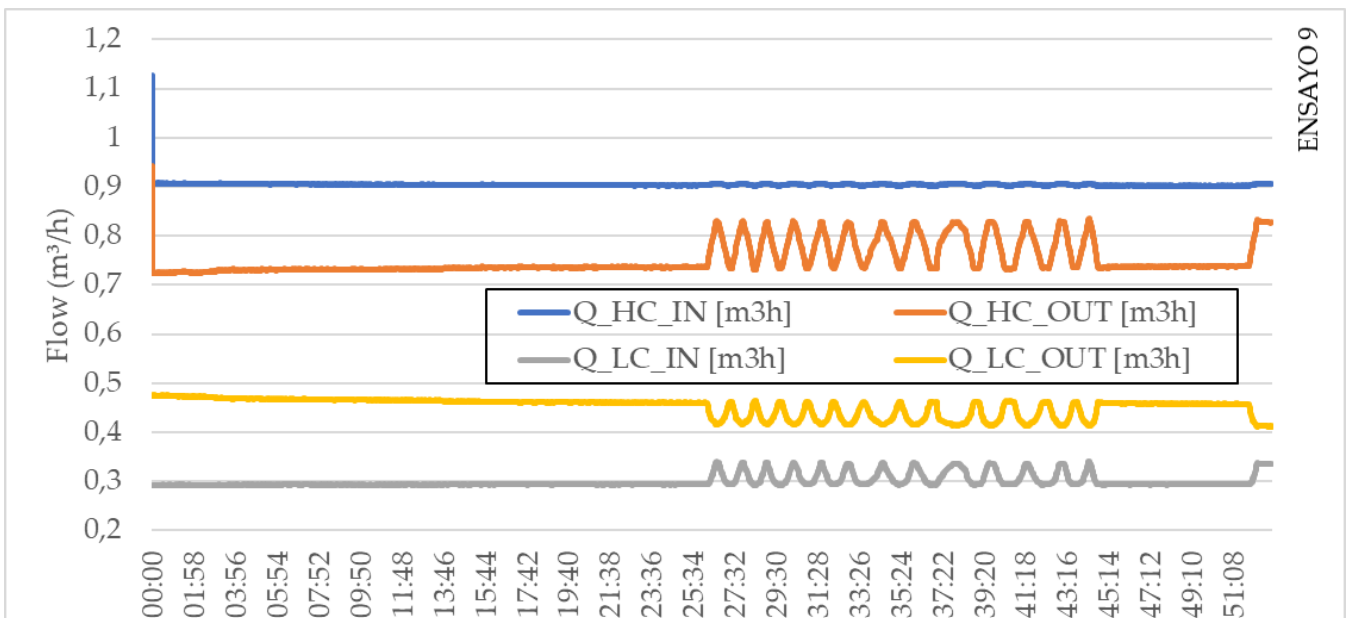


Figura 71. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 9. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como  $Q_{HC\_IN}$  y  $Q_{HC\_OUT}$  (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como  $Q_{LC\_IN}$  y  $Q_{LC\_OUT}$

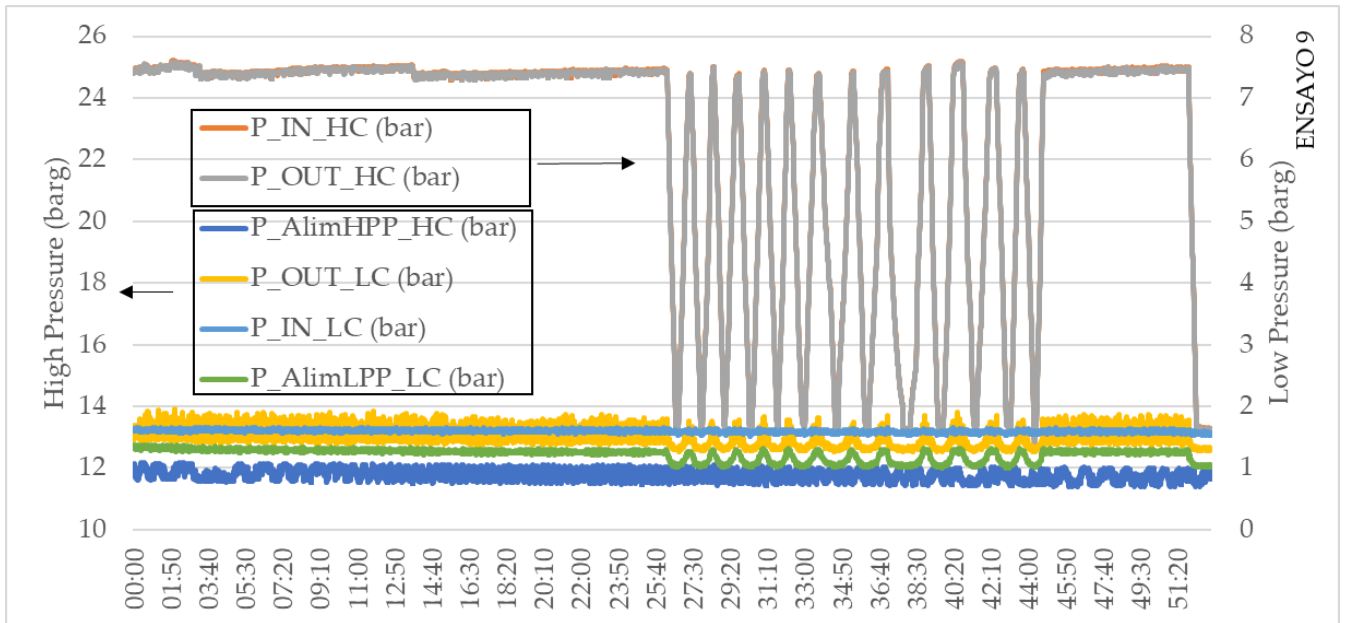


Figura 72. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 9 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión;  $P_{AlímHPP\_HC}$ , alimentación de la bomba HPP.  $P_{IN\_HC}$  y  $P_{OUT\_HC}$ , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión.

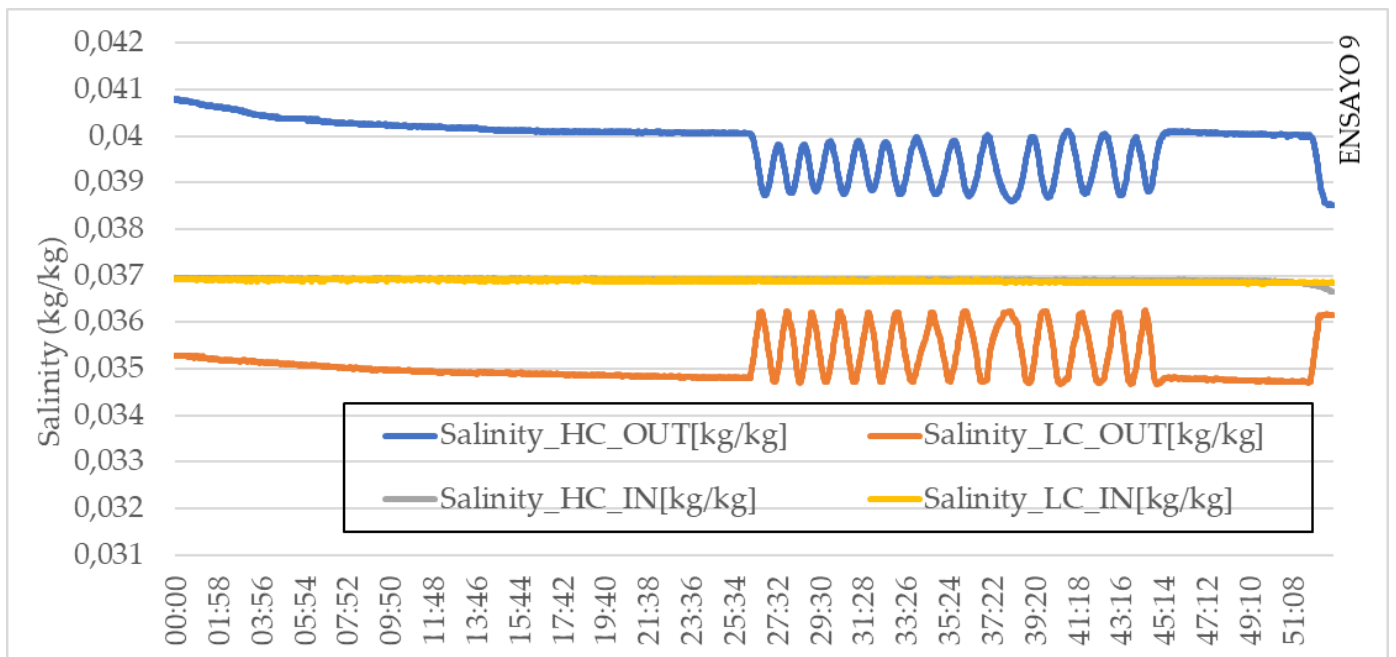


Figura 73. Evolución de la salinidad a lo largo del ensayo 9 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta concentración HC a la entrada y salida. Para la corriente de baja concentración LC a la entrada y salida.

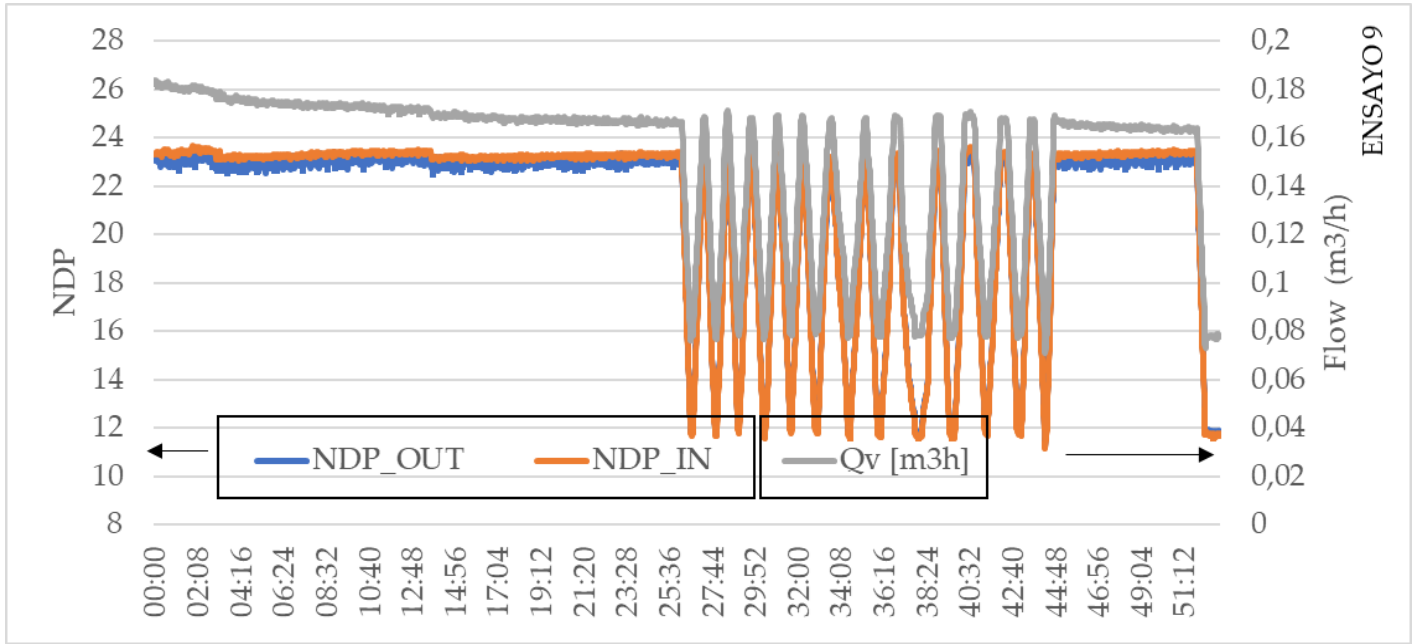


Figura 74. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 9. Para la fuerza motriz del proceso, NDP a la entrada y salida, y para el caudal transferido,  $q_v$ .

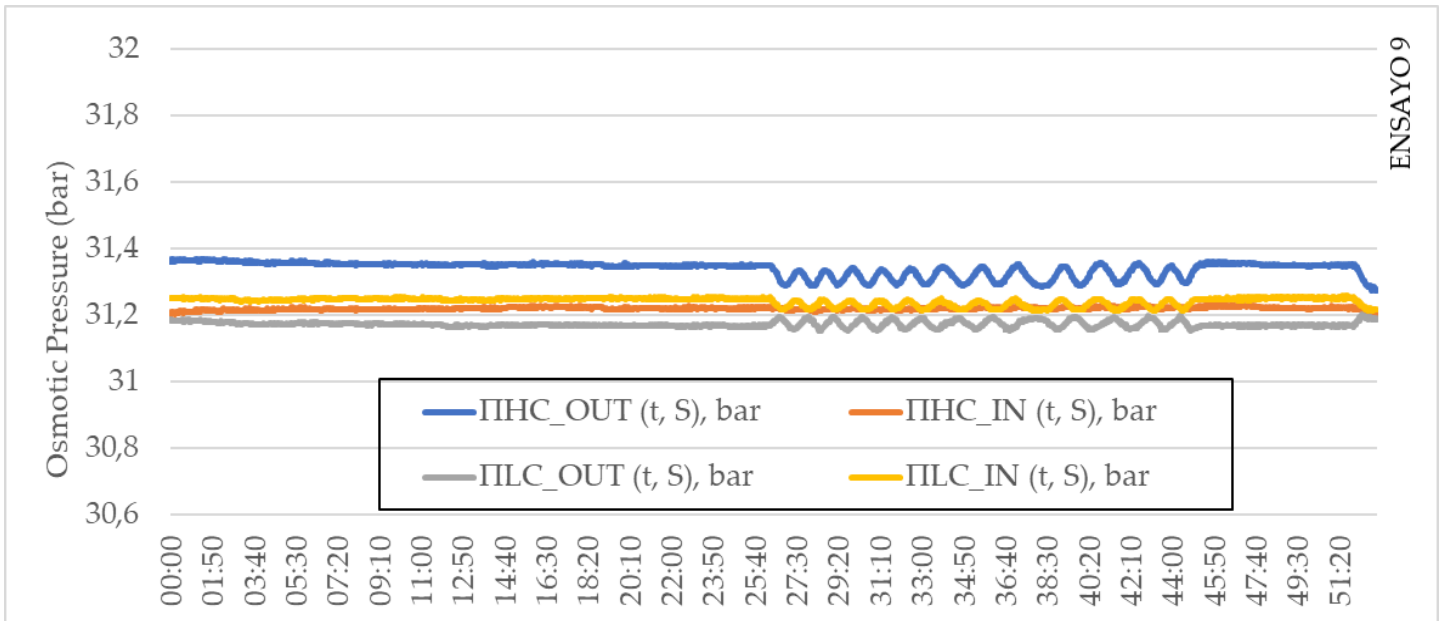


Figura 75. Evolución de la presión osmótica a lo largo del ensayo 9. Para la corriente de alta y baja concentración HC y LC respectivamente, a la entrada y salida.

## 4.2 Discusión de resultados.

En este apartado, se analizarán los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados en la instalación después de haberlos representado gráficamente.

Los ensayos realizados tienen una doble utilidad, es decir, como podemos ver en los gráficos, en primer lugar, tenemos la parte previa del ensayo, que es cuando alcanzamos el régimen estacionario, que ha servido para la determinación de los parámetros no conocidos como es la permeabilidad de las sales, la salinidad del agua y la fuerza motriz de proceso entre otros.

En segundo lugar, la parte en régimen transitorio, donde los intervalos de tiempo son muy rápidos, hemos podido observar que el tiempo de respuesta ante variaciones en el sistema son instantáneos, es decir, que cuando por ejemplo variamos la presión con la apertura de válvulas, podemos ver como inmediatamente eso se transmite en un cambio de la fuerza motriz del proceso del paso del agua y rápidamente se observa cómo varía el caudal.

Por otro lado, se recogerán mediante una tabla los distintos valores de incrementos de temperatura, la media de dos de los valores de permeabilidad de las sales, que obtendremos mirando los gráficos aproximadamente al inicio y al final del régimen estacionario, y el incremento de ambos valores.

A continuación, en la siguiente tabla se puede ver un resumen de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos.

ENSAYOS	$\Delta T$ (°C)	Duración total del ensayo (mins)	$\bar{L}_s$ (L/h/m <sup>2</sup> )	$\overline{\Delta L}_s$ (L/h/m <sup>2</sup> )
Ensayo 1	0.26	39:50	206.24	22
Ensayo 2	0.39	51:00	166.37	10
Ensayo 3	0.39	51:00	163.00	8
Ensayo 4	0.16	51:00	188.65	7
Ensayo 5	0.05	48:00	142.56	13
Ensayo 6	0.29	40:00	231.35	75
Ensayo 7	0.03	30:00	295.98	17
Ensayo 8	0.05	23:30	1175.86	42
Ensayo 9	0.05	53:00	632.56	42

Tabla 2. Comparativa de los resultados de permeabilidades obtenidos

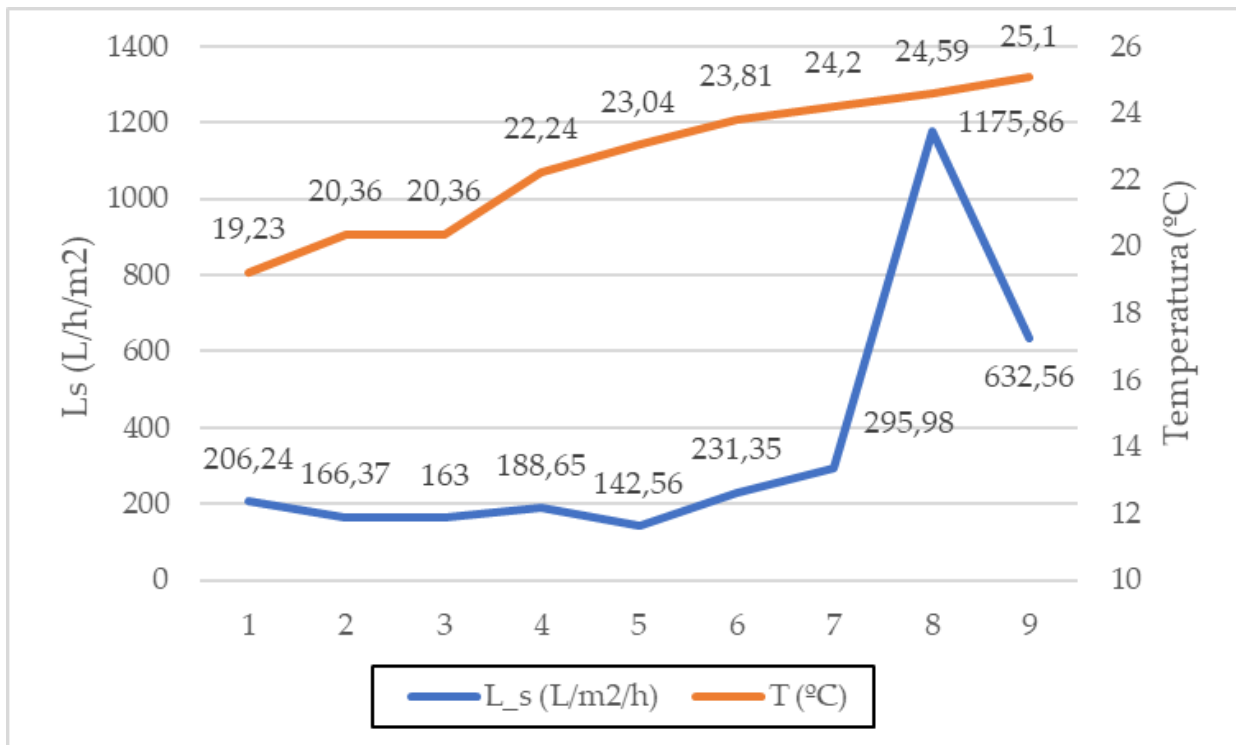


Figura 76. Evolución de la temperatura frente a la permeabilidad en los diferentes ensayos.

Por tanto, tras analizar los ensayos se ha hecho una estimación media de los valores de todos los ensayos menos el 5, 8 y 9, ya que se salen del rango, es por eso que el valor propuesto de la permeabilidad a las sales de la membrana FO4040 es de 208,6 L/h/m<sup>2</sup>.

Como podemos observar hay unas variaciones en los resultados de permeabilidad de las sales que puede deberse a los pequeños cambios de temperaturas o también a las aproximaciones realizadas en el cálculo del caudal de las sales transferidas que comentaba anteriormente. Finalmente, parece que es necesario reemplazar el filtro existente previo al módulo de membranas y la limpieza química del módulo de membranas, dado que se observa un incremento excesivo de los valores de permeabilidad a las sales. Esto indica que se han producido depósitos de sales en los poros de la membrana provocando un deficiente rechazo de sales. Tras la adecuada limpieza con productos químicos cabe esperar que se restablezcan los valores obtenidos en los ensayos previos.

## 5. CONCLUSIONES

---

EN este proyecto de desalación de agua por ósmosis inversa se ha evaluado experimentalmente el paso de agua con sales diluidas, en la membrana FO4040, de 3 m<sup>2</sup> del fabricante TORAY. Para ello se ha podido utilizar un banco de ensayos, gracias al proyecto SOLMIDIFF, en la instalación. Este trabajo se basa en la realización de 9 ensayos con una doble funcionalidad.

En primer lugar, la primera parte del ensayo en la que alcanzamos el régimen estacionario, la cual ha sido fundamental para el cálculo experimental de la permeabilidad a las sales en la membrana FO4040, resultando un valor promedio de 208,6 (L/h/m<sup>2</sup>). Así como para la obtención de la salinidad del flujo que atraviesa la membrana (permeado) a partir de la experimentación a cada instante del ensayo.

En segundo lugar, la parte posterior a este régimen estacionario, haremos variaciones en los parámetros de la instalación como puede ser la presión, en intervalos muy rápido de tiempo, alcanzando el régimen transitorio, que nos ayudará a determinar el tiempo de respuesta del sistema, siendo prácticamente instantáneo, como hemos podido corroborar en los gráficos representados.

Finalmente, respecto a trabajos futuros, observando los resultados obtenidos, sobre todo en los de permeabilidad a las sales, se podrían hacer las siguientes recomendaciones:

- Incrementos de temperatura mayores, es decir, mayores saltos térmicos podrían determinar mejor la dependencia de la permeabilidad con la temperatura.
- Considerar la realización de una limpieza en el filtro previo a la membrana o directamente la sustitución por uno nuevo si la obstrucción por sales es alta.
- Ensayos con diferentes membranas, para determinar cómo se ve afectado el rendimiento general del sistema.
- Realizar ensayos con diversas concentraciones de sales en el canal de alta concentración.

# REFERENCIAS

---

1. Millero, F. J.; Feistel, R.; Wright, D. G., McDougall, T. J., *The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 55(1), 2008, pp. 50-72.
2. Sharqawy, M. H.; Lienhard, J. H., and Zubair, S. M. *Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlation and data. Desalination and Water Treatment*, 16, 2010, pp. 354-380.
3. Multicon. (s.f) MultiCon CMC-14. <https://www.multicon24.eu/en/catalog/multicon/multicon-cmc-141>
4. Sánchez, D., et al. (s.f) SOLMIDIFF. <http://institucional.us.es/solmideff/>
5. Trabajo Fin de Grado, Grado en Ingeniería de la Energía, curso 2022-2023, María Cascajo González, *Análisis experimental de la permeabilidad del agua en módulos de membranas para desalación eficiente de agua de mar.*



